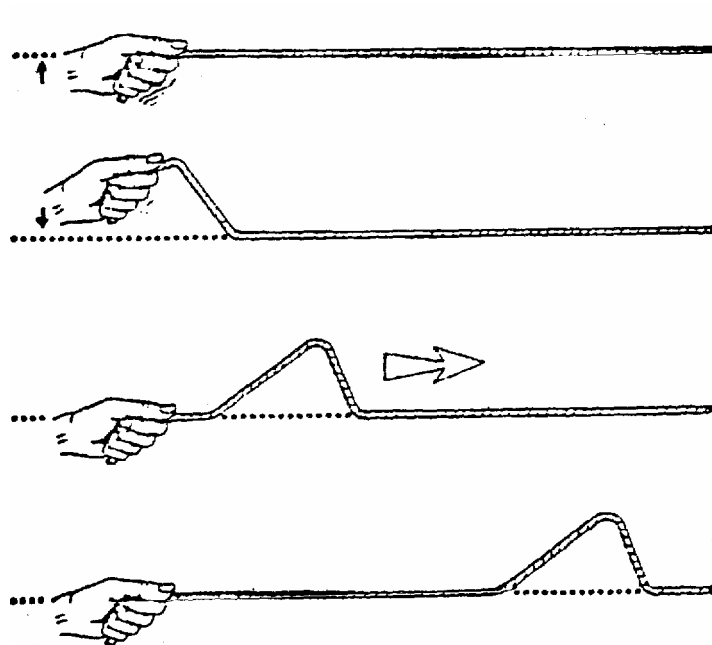


## BREVE INTRODUÇÃO SOBRE ONDAS

Onda é a manifestação de um fenômeno físico no qual uma fonte perturbadora fornece energia a um sistema e essa energia desloca-se através de pontos desse sistema. Observemos a propagação de um impulso numa corda para melhor entendermos esse conceito.



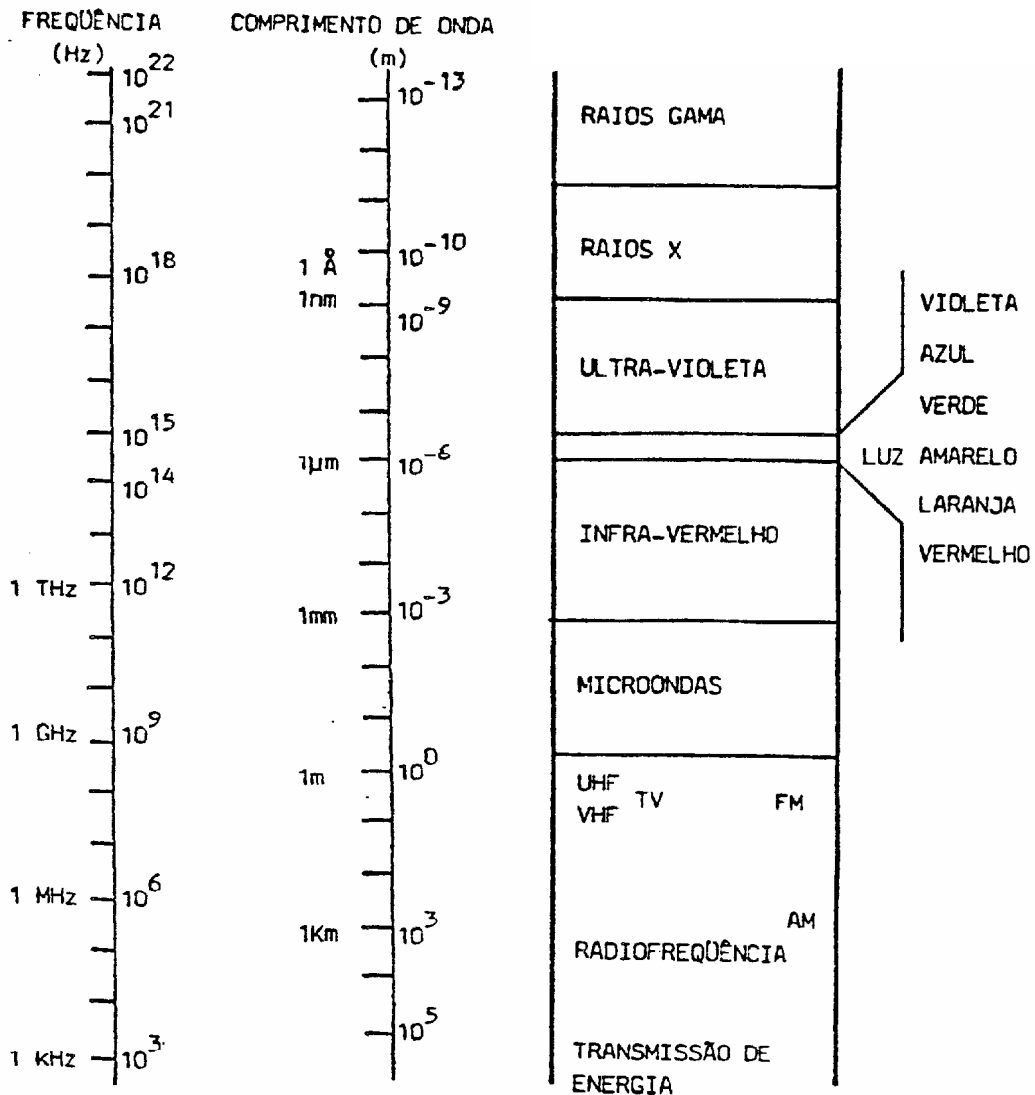
**UMA ONDA EM UMA CORDA**

Cabe ressaltar que não é a onda que se movimenta mas a energia fornecida pela mão (fonte perturbadora). Existem três tipos de ondas quanto à direção de propagação:

- Unidimensionais
- Bidimensionais
- Tridimensionais

Cabe ressaltar também que dependendo do meio sob o qual a energia propaga-se, temos uma velocidade de propagação correspondente. Ondas harmônicas são tipos de ondas cuja fonte perturbadora executa um movimento uniforme. O comprimento de onda é o período espacial correspondente ao período temporal  $T$ . Conhecendo-se a velocidade de propagação podemos caracterizar uma onda através da frequência ou do comprimento de onda ( $v=\lambda.f$ ).

## ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO



## A NATUREZA DA LUZ

A natureza da luz sempre foi um dos temas que sempre chamaram a atenção dos grandes cientistas da humanidade. Desde a antiguidade (300 a. C.) com Euclides até Einstein e Planck, no séc. XX. Hoje em dia, duas teorias que explicam a natureza da luz são aceitas: a *teoria corpuscular* e a *teoria ondulatória*. Na teoria ondulatória, a luz é tratada como sendo campos eletromagnéticos oscilantes propagando-se no espaço. Essa teoria explica fenômenos como reflexão, refração, difração, etc. Na teoria corpuscular, a luz é tratada como sendo pacotes de energia chamados fótons. Essa teoria explica fenômenos como o efeito Compton e o desvio do raio luminoso ao passar perto de corpos celestes.

A velocidade da luz no vácuo pode ser considerada como sendo 300000 km/s, o que nos dá um erro menor que 0,1 %.

## ÍNDICE DE REFRAÇÃO

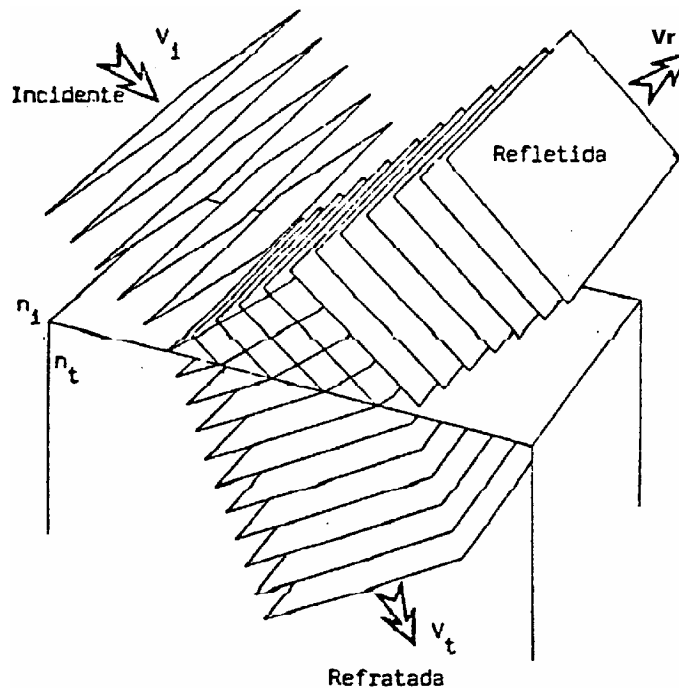
Grandeza que expressa a velocidade que a luz possui num determinado meio de transmissão. É definido por  $n=c/v$ , onde

- $c$  é a velocidade da luz no vácuo
- $v$  é a velocidade da luz no meio em questão

Cabe salientar que o índice de refração depende do comprimento de onda da luz, o que, nas fibras ópticas, irá provocar a dispersão do impulso luminoso, limitando a capacidade de transmissão de sinais. Esse efeito explica a experiência de Newton da decomposição da luz branca através de um prisma, como também a formação do arco-íris. Exemplos: vácuo  $n=1,0$ ; água  $n=1,3$ ; vidro  $n=1,5$ ; diamantes  $n=2,0$ .

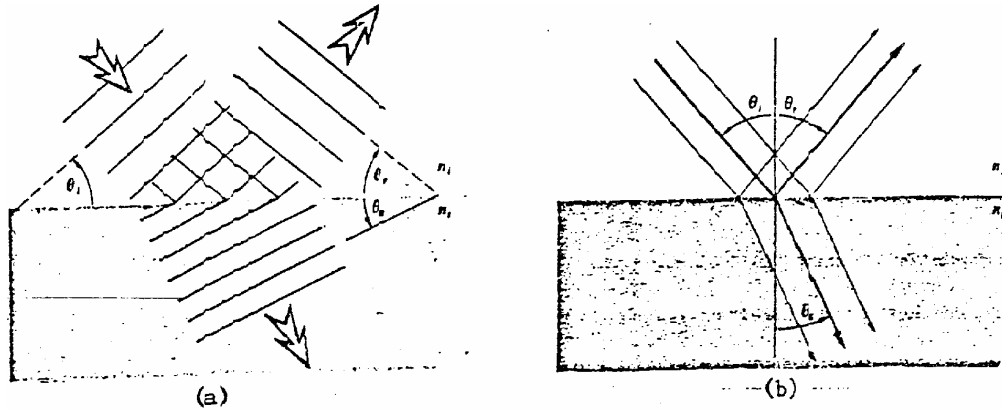
## REFLEXÃO E REFRAÇÃO

Quando uma onda incide numa superfície de separação de dois meios de índice de refração diferentes, com uma certa inclinação, uma parcela da energia atravessará a superfície e propagará através do meio de transmissão, enquanto que outra parcela refletirá na superfície, continuando no meio incidente.



Ao passar para o meio de transmissão, a onda sofre um desvio de sua direção natural regido pela lei de Snell ( $n_i \cdot \text{sen}\theta_i = n_t \cdot \text{sen}\theta_t$ ).

## RAIOS DE LUZ

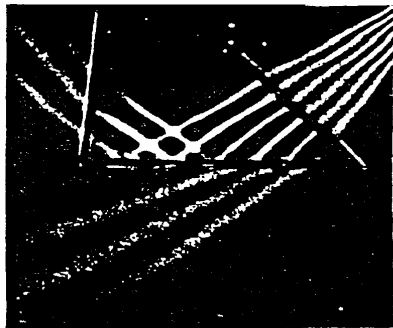


(a) - REPRESENTAÇÃO POR ONDAS  
(b) - REPRESENTAÇÃO POR RAIOS

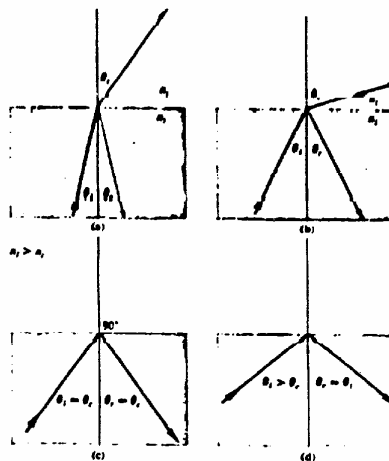
Podemos, por simplicidade, representar a luz indicando apenas a sua direção de propagação utilizando os raios de luz.

## ÂNGULO CRÍTICO E REFLEXÃO INTERNA TOTAL

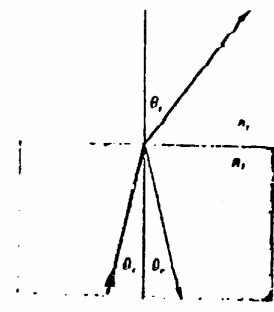
Quando um raio de luz muda de um meio que tem índice de refração grande para um meio que tem índice de refração pequeno a direção da onda transmitida afasta-se da normal (perpendicular). A medida que aumentamos o ângulo de incidência  $i$ , o ângulo do raio refratado tende a  $90^\circ$ . Quando isso acontece, o ângulo de incidência recebe o nome de ângulo crítico. Uma incidência com ângulo maior do que este sofre o fenômeno da reflexão interna total.



REFLEXÃO INTERNA TOTAL



REFLEXÃO INTERNA TOTAL  
E ÂNGULO CRÍTICO



REFLEXÃO E REFRAÇÃO

## FIBRAS ÓPTICAS

Uma fibra óptica é um capilar formado por materiais cristalinos e homogêneos, transparentes o bastante para guiar um feixe de luz (visível ou infravermelho) através de um trajeto qualquer. A estrutura básica desses capilares são cilindros concêntricos com determinadas espessuras e com índices de refração tais que permitam o fenômeno da reflexão interna total. O centro (miolo) da fibra é chamado de núcleo e a região externa é chamada de casca. Para que ocorra o fenômeno da reflexão interna total é necessário que o índice de refração do núcleo seja maior que o índice de refração da casca. Os tipos básicos de fibras ópticas são:

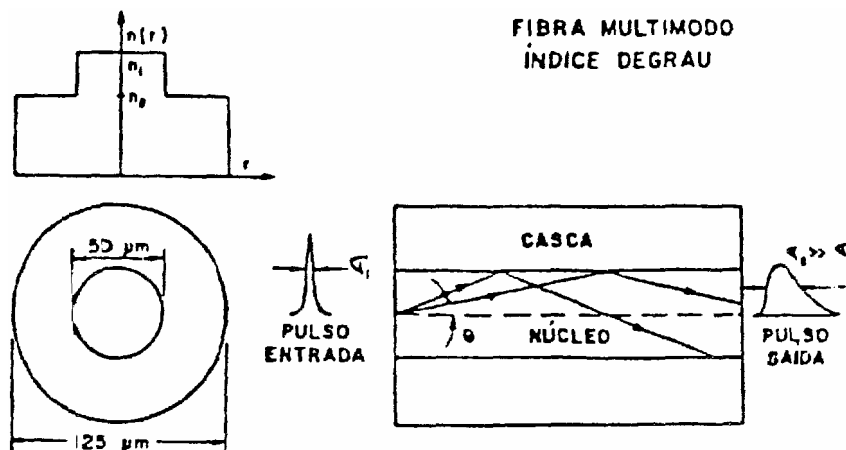
- fibra de índice degrau
- fibra de índice gradual
- fibra monomodo

### FIBRA DE ÍNDICE DEGRAU (STEP INDEX)

Este tipo de fibra foi o primeiro a surgir e é o tipo mais simples. Constitui-se basicamente de um único tipo de vidro para compor o núcleo, ou seja, com índice de refração constante. O núcleo pode ser feito de vários materiais como plástico, vidro, etc. e com dimensões que variam de 50 a 400  $\mu\text{m}$ , conforme o tipo de aplicação.

A casca, cuja a função básica de garantir a condição de aguiamento da luz pode ser feita de vidro, plástico e até mesmo o próprio ar pode atuar como casca (essas fibras são chamadas de *bundle*).

Essas fibras são limitadas quanto à capacidade de transmissão. Possuem atenuação elevada (maior que 5 dB/km) e pequena largura de banda (menor que 30 MHz.km) e são utilizadas em transmissão de dados em curtas distâncias e iluminação.



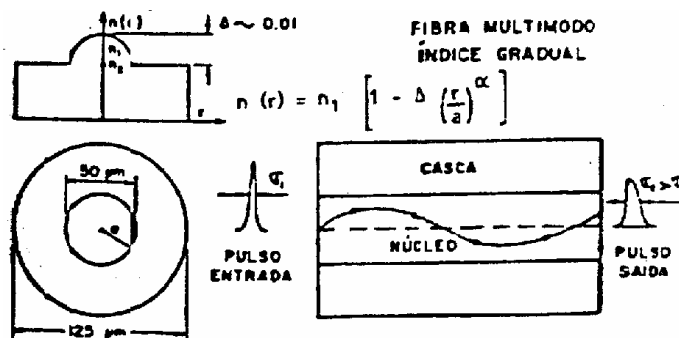
### FIBRA DE ÍNDICE GRADUAL (GRADED INDEX)

Este tipo de fibra tem seu núcleo composto por vidros especiais com diferentes valores de índice de refração, os quais temo o objetivo de diminuir as diferenças de tempos de propagação da luz no núcleo, devido aos vários caminhos possíveis que a luz pode tomar no interior da fibra, diminuindo a dispersão do impulso e aumentando a largura de banda passante da fibra óptica.

A variação do índice de refração em função do raio do núcleo obedece à seguinte equação  $n(r) = n_1 \cdot (1 - (r/a)^\alpha \cdot \Delta)$ , onde

- $n(r)$  é o índice de refração do ponto  $r$
- $n_1$  é o índice de refração do núcleo
- $r$  é a posição sobre o raio do núcleo
- $\alpha$  é o coeficiente de otimização
- $\Delta$  é a diferença entre o índice de refração da casca e do núcleo

Os materiais tipicamente empregados na fabricação dessas fibras são sílica pura para a casca e sílica dopada para o núcleo com dimensões típicas de 125 e 50  $\mu\text{m}$  respectivamente. Essas fibras apresentam baixas atenuações (3 dB/km em 850 nm) e capacidade de transmissão elevadas. São, por esse motivo, empregadas em telecomunicações.

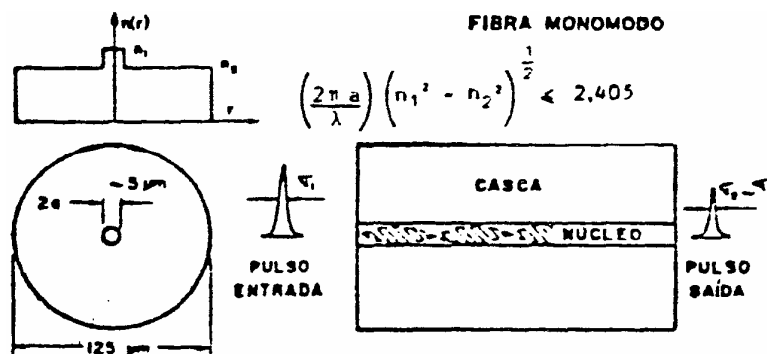


## FIBRA MONOMODO

Esta fibra, ao contrário das anteriores, é construída de tal forma que apenas o modo fundamental de distribuição eletromagnética (raio axial) é guiado, evitando assim os vários caminhos de propagação da luz dentro do núcleo, conseqüentemente diminuindo a dispersão do impulso luminoso.

Para que isso ocorra, é necessário que o diâmetro do núcleo seja poucas vezes maior que o comprimento de onda da luz utilizado para a transmissão. As dimensões típicas são 2 a 10  $\mu\text{m}$  para o núcleo e 80 a 125  $\mu\text{m}$  para a casca. Os materiais utilizados para a sua fabricação são sílica e sílica dopada.

São empregadas basicamente em telecomunicações pois possuem baixa atenuação (0,7 dB/km em 1300 nm e 0,2 dB/km em 1550 nm) e grande largura de banda (10 a 100 GHz.km).



## GUIAMENTO DE LUZ EM FIBRAS ÓPTICAS

### ABERTURA NUMÉRICA

É um parâmetro básico para fibras multimodos (degrau e gradual) que representa o ângulo máximo de incidência que um raio deve ter, em relação ao eixo da fibra, para que ele sofra a reflexão interna total no interior do núcleo e propague-se ao longo da fibra através de reflexões sucessivas.

### MODOS DE PROPAGAÇÃO

Quando tratamos a luz pela teoria ondulatória, a luz é regida pelas equações de Maxwell. Assim, se resolvermos as equações de Maxwell para as condições (chamadas condições de contorno) da fibra, que é um guia de onda, tais como diâmetro do núcleo, comprimento de onda, abertura numérica, etc. encontramos um certo número de soluções finitas. Dessa maneira, a luz que percorre a fibra óptica não se propaga aleatoriamente, mas é canalizada em certos modos.

Modo de propagação é, portanto, uma onda com determinada distribuição de campo eletromagnético que satisfaz as equações de Maxwell e que transporta uma parcela individual (mas não igual) da energia luminosa total transmitida. Esses modos podem ser entendidos e representados como sendo os possíveis caminhos que a luz pode ter no interior do núcleo. Numa fibra óptica, o número de modos está relacionado com a *freqüência normalizada*  $V$  que é uma grandeza definida por  $V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot AN}{\lambda}$ , onde

- $a$  é o raio do núcleo
- $\lambda$  é o comprimento de onda
- $AN$  é a abertura numérica

A relação entre a freqüência normalizada e o número de modos  $M$  é dada por

$$M = \frac{V^2}{4} \text{ para fibras de índice gradual}$$

$$M = \frac{V^2}{2} \text{ para fibras de índice degrau}$$

### PROPRIEDADES DAS FIBRAS ÓPTICAS

A fibra óptica apresenta certas características particulares, que podemos tratar como vantagens, quando comparadas com os meios de transmissão formados por condutores metálicos, tais como

- imunidade a ruídos externos em geral e interferências eletromagnéticas em particular, como as causadas por descargas atmosféricas e instalações elétricas de altas tensões;
- imunidade a interferências de freqüências de rádio de estações de rádio e radar, e impulsos eletromagnéticos causados por explosões nucleares;
- imune a influência do meio ambiente, como por exemplo umidade;

- ausência de diafonia;
- grande confiabilidade no que diz respeito ao sigilo das informações transmitidas;
- capacidade de transmissão muito superior a dos meios que utilizam condutores metálicos;
- baixa atenuação, grandes distâncias entre pontos de regeneração;
- cabos de pequenas dimensões (pequeno diâmetro e pequeno peso) o que implica em economia no transporte e instalação.

## **APLICAÇÕES DAS FIBRAS ÓPTICAS**

Redes de telecomunicações

- entroncamentos locais
- entroncamentos interurbanos
- conexões de assinantes

Redes de comunicação em ferrovias

Redes de distribuição de energia elétrica (monitoração, controle e proteção)

Redes de transmissão de dados e fac-símile

Redes de distribuição de radiodifusão e televisão

Redes de estúdios, cabos de câmeras de TV

Redes internas industriais

Equipamentos de sistemas militares

Aplicações de controle em geral

Veículos motorizados, aeronaves, navios, instrumentos, etc.

## **CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISSÃO DA FIBRA ÓPTICA**

### **ATENUAÇÃO**

A atenuação ou perda de transmissão pode ser definida como a diminuição da intensidade de energia de um sinal ao propagar-se através de um meio de transmissão.

A fórmula mais usual para o cálculo da atenuação é a seguinte  $10 \cdot \log \frac{P_s}{P_e}$ , onde

- $P_s$  é a potência de saída
- $P_e$  é a potência de entrada

Nas fibras ópticas, a atenuação varia de acordo com o comprimento de onda da luz utilizada. Essa atenuação é a soma de várias perdas ligadas ao material que é empregado na fabricação das fibras e à estrutura do guia de onda. Os mecanismos que provocam atenuação são

- absorção
- espalhamento
- deformações mecânicas.

### **ABSORÇÃO**

Os tipos básicos de absorção são

- absorção material
- absorção do ion  $\text{OH}^-$

A absorção material é o mecanismo de atenuação que exprime a dissipação de parte da energia transmitida numa fibra óptica em forma de calor. Neste tipo de absorção temos fatores extrínsecos e intrínsecos à própria fibra.

Como fatores intrínsecos, temos a absorção do ultravioleta, a qual cresce exponencialmente no sentido do ultravioleta, e a absorção do infravermelho, provocada pela sua vibração e rotação dos átomos em torno da sua posição de equilíbrio, a qual cresce exponencialmente no sentido do infravermelho.

Como fatores extrínsecos, temos a absorção devido aos ions metálicos porventura presentes na fibra (Mn, Ni, Cr, U, Co, Fe e Cu) os quais, devido ao seu tamanho, provocam picos de absorção em determinados comprimentos de onda exigindo grande purificação dos materiais que compõem a estrutura da fibra óptica.

A absorção do  $\text{OH}^-$  (hidroxila) provoca atenuação fundamentalmente no comprimento de onda de 2700 nm e em sobre tons (harmônicos) em torno de 950 nm, 1240 nm e 1380 nm na faixa de baixa atenuação da fibra. Esse ion é comumente chamado de água e é incorporado ao núcleo durante o processo de produção. É muito difícil de ser eliminado.

## ESPALHAMENTO

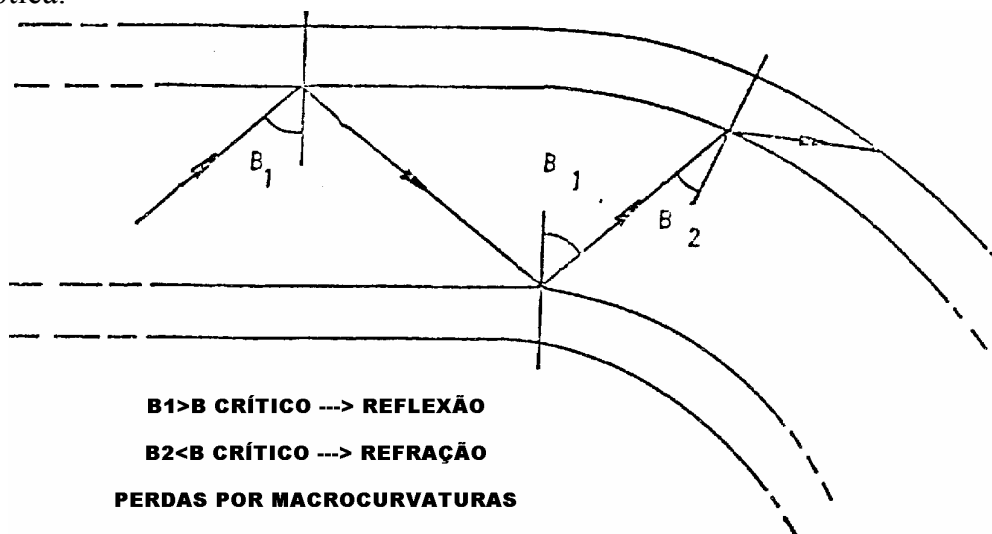
É o mecanismo de atenuação que exprime o desvio de parte da energia luminosa guiada pelos vários modos de propagação em várias direções. Existem vários tipos de espalhamento (Rayleigh, Mie, Raman estimulado, Brillouin estimulado) sendo o mais importante e significativo o espalhamento de Rayleigh. Esse espalhamento é devido à não homogeneidade microscópica (de flutuações térmicas, flutuações de composição, variação de pressão, pequenas bolhas, variação no perfil de índice de refração, etc).

Esse espalhamento está sempre presente na fibra óptica e determina o limite mínimo de atenuação nas fibras de sílica na região de baixa atenuação. A atenuação neste tipo de espalhamento é proporcional a  $\frac{1}{\lambda^4}$ .

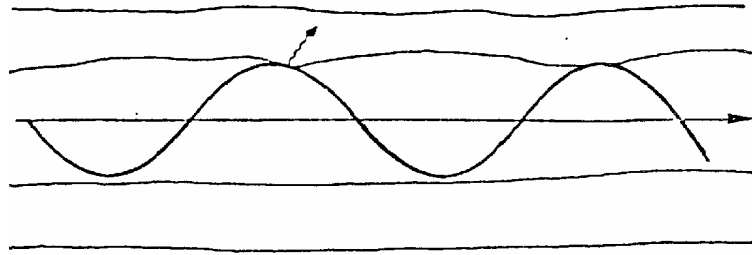
## DEFORMAÇÕES MECÂNICAS

As deformações são chamadas de *microcurvatura* e *macrocurvatura*, as quais ocorrem ao longo da fibra devido à aplicação de esforços sobre a mesma durante a confecção e instalação do cabo.

As macrocurvaturas são perdas pontuais (localizadas) de luz por irradiação, ou seja, os modos de alta ordem (ângulo de incidência próximo ao ângulo crítico) não apresentam condições de reflexão interna total devido a curvaturas de raio finito da fibra óptica.

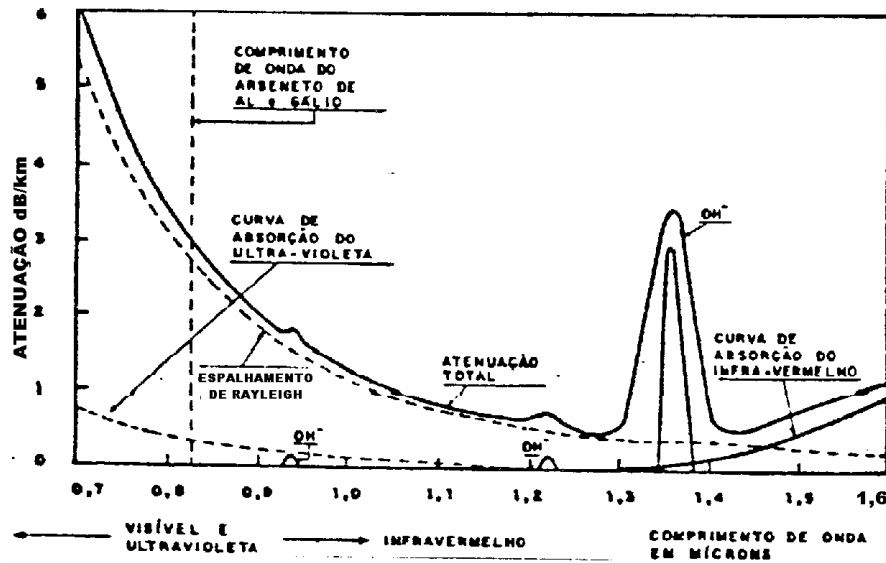


As microcurvaturas aparecem quando a fibra é submetida a pressão transversal de maneira a comprimi-la contra uma superfície levemente rugosa. Essas microcurvaturas extraem parte da energia luminosa do núcleo devido aos modos de alta ordem tornarem-se não guiados.



### PERDAS POR MICROCURVATURAS

A atenuação típica de uma fibra de sílica sobrepondo-se todos os efeitos está mostrada na figura abaixo:



### ATENUAÇÃO TÍPICA DAS FIBRAS ÓPTICAS

Existem três comprimentos de onda tipicamente utilizados para transmissão em fibras ópticas:

- 850 nm com atenuação típica de 3 dB/km
- 1300 nm com atenuação típica de 0,8 dB/km
- 1550 nm com atenuação típica de 0,2 dB/km

## DISPERSÃO

É uma característica de transmissão que exprime o alargamento dos pulsos transmitidos. Este alargamento determina a largura de banda da fibra óptica, dada em MHz.km, e está relacionada com a capacidade de transmissão de informação das fibras. Os mecanismos básicos de dispersão são

- modal
- cromática

## DISPERSÃO MODAL

Este tipo de dispersão só existe em fibras do tipo multimodo (degrau e gradual) e é provocada basicamente pelos vários caminhos possíveis de propagação (modos) que a luz pode ter no núcleo. Numa fibra degrau, todos os modos viajam com a mesma

velocidade, pois o índice de refração é constante em todo o núcleo. Logo, os modos de alta ordem (que percorrem caminho mais longo) demorarão mais tempo para sair da fibra do que os modos de baixa ordem. Neste tipo de fibra, a diferença entre os tempos de chegada é dado por  $\tau = \Delta t_1$ , onde

- $t_1$  é o tempo de propagação do modo de menor ordem
- $\Delta$  é a diferença percentual de índices de refração entre o núcleo e a casca dada por  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$

A dispersão modal inexistente em fibras monomodo pois apenas um modo será guiado.

## DISPERSÃO CROMÁTICA

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

- dispersão material
- dispersão de guia de onda

## DISPERSÃO MATERIAL

Como o índice de refração depende do comprimento de onda e como as fontes luminosas existentes não são ideais, ou seja, possuem uma certa largura espectral finita ( $\Delta\lambda$ ), temos que cada comprimento de onda enxerga um valor diferente de índice de refração num determinado ponto, logo cada comprimento de onda viaja no núcleo com velocidade diferente, provocando uma diferença de tempo de percurso, causando a dispersão do impulso luminoso.

A dispersão provocada pela dispersão material é dada por  $D = \frac{\Delta\lambda}{c} \frac{dn}{d\lambda}$ , onde

- $\Delta\lambda$  é a largura espectral da fonte luminosa
- $c$  é a velocidade da luz no vácuo
- $n$  é o índice de refração do núcleo

## DISPERSÃO DE GUIA DE ONDA

Esse tipo de dispersão é provocado por variações nas dimensões do núcleo e variações no perfil de índice de refração ao longo da fibra óptica e depende também do comprimento de onda da luz. Essa dispersão só é percebida em fibras monomodo que tem dispersão material reduzida ( $\Delta\lambda$  pequeno em torno de 1300 nm) e é da ordem de alguns ps/(nm.km).

## CONCLUSÃO

Os tipos de dispersão que predominam nas fibras são

- degrau: modal (dezenas de MHz.km)
- gradual: modal material (menor que 1 GHz.km)
- monomodo: material guia de onda (10 a 100 GHz.km)

A dispersão total numa fibra óptica multimodo gradual, levando-se em conta a dispersão modal e a material é dada por  $\sigma_T^2 = \sigma_M^2 + \sigma_C^2$ , onde

- $\sigma_C$  é a dispersão cromática
- $\sigma_M$  é a dispersão material

## **MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DAS FIBRAS ÓPTICAS**

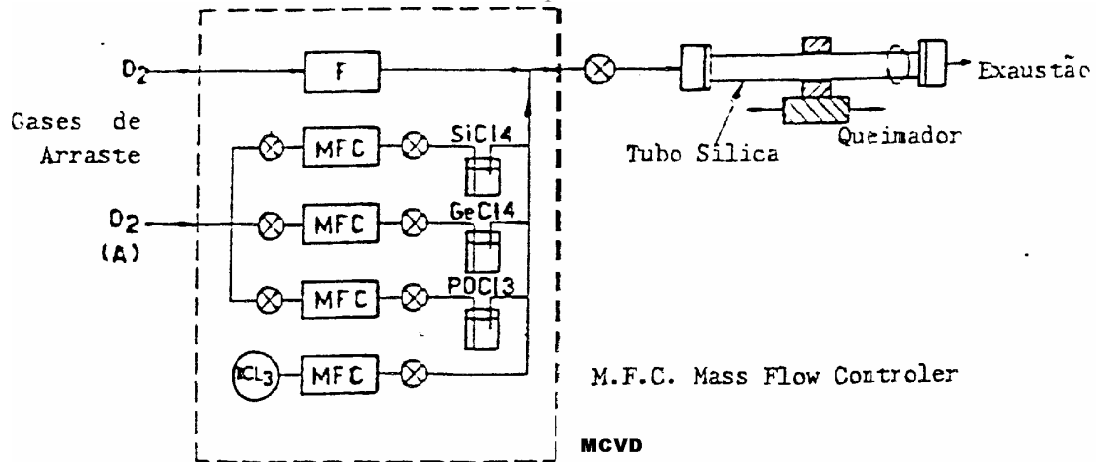
Os materiais básicos usados na fabricação de fibras ópticas são sílica pura ou dopada, vidro composto e plástico. As fibras ópticas fabricadas de sílica pura ou dopada são as que apresentam as melhores características de transmissão e são as usadas em sistemas de telecomunicações. Todos os processos de fabricação são complexos e caros. As fibras ópticas fabricadas de vidro composto e plástico não tem boas características de transmissão (possuem alta atenuação e baixa largura de banda passante) e são empregadas em sistemas de telecomunicações de baixa capacidade e pequenas distâncias e sistemas de iluminação. Os processos de fabricação dessas fibras são simples e baratos se comparados com as fibras de sílica pura ou dopada.

### **FABRICAÇÃO DE FIBRAS DE SÍLICA PURA**

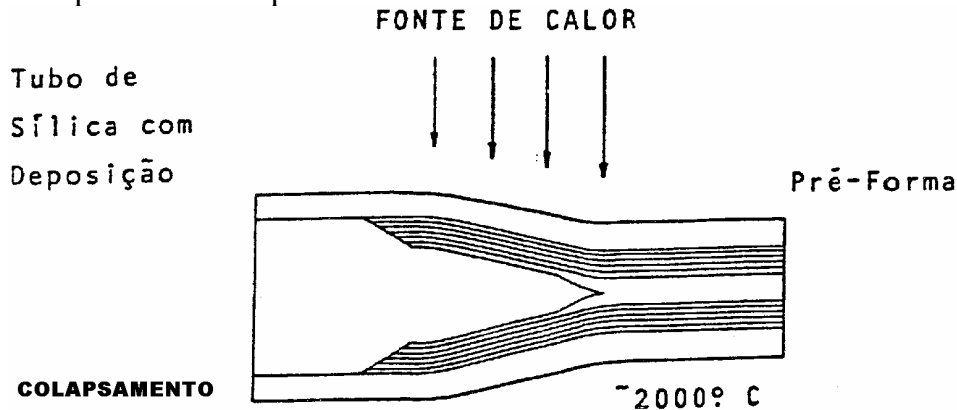
Existem 4 tipos de processos de fabricação deste tipo de fibra e a diferença entre eles está na etapa de fabricação da preforma (bastão que contém todas as características da fibra óptica, mas possui dimensões macroscópicas). A segunda etapa de fabricação da fibra, o puxamento, é comum a todos os processos.

### **MCVD (MODIFIED CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION)**

Este processo consiste na deposição de camadas de materiais (vidros especiais) no interior de um tubo de sílica pura ( $\text{SiO}_2$ ). O tubo de sílica é o que fará o papel de casca da fibra óptica, enquanto que os materiais que são depositados farão o papel do núcleo da fibra. O tubo de sílica é colocado na posição horizontal numa máquina chamada torno óptico que o mantém girando em torno de seu eixo. No interior do tubo são injetados gases (cloretos do tipo  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{GeCl}_4$ , etc.) com concentrações controladas. Um queimador percorre o tubo no sentido longitudinal elevando a temperatura no interior do tubo para  $1500^\circ\text{C}$  aproximadamente. Os gases, quando atingem a região de alta temperatura, reagem com o oxigênio (gás de arraste) formando óxidos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ , etc. liberando o  $\text{Cl}_2$ . Ocorre então a deposição de partículas submicroscópicas de vidro no interior do tubo, as quais formarão o núcleo da fibra. A cada passagem do maçarico na extensão do tubo, deposita-se uma camada de 5 a 10  $\mu\text{m}$  e esse processo repete-se até que o núcleo tenha dimensões apropriadas. Os óxidos  $\text{GeO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  tem a função de variar o índice de refração da sílica pura ( $\text{SiO}_2$ ) de acordo com suas concentrações.



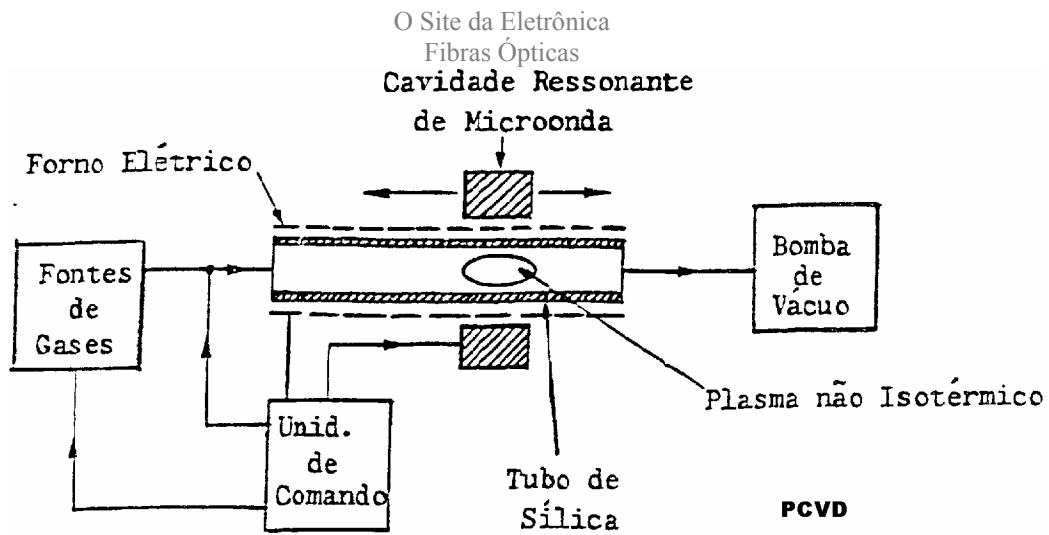
Após a deposição do número correto de camadas é efetuado o colapsamento do tubo (estrangulamento) para torná-lo um bastão sólido e maciço denominado preforma. Isso é feito elevando-se a temperatura do queimador a 1800-2000°C, e o tubo fecha-se por tensões superficiais.



Por esse processo, obtêm-se fibras de boa qualidade porque a reação que ocorre no interior do tubo não tem contato com o meio externo, dessa maneira evita-se a deposição de impurezas, especialmente a hidroxila (OH). Com esse processo, pode-se fabricar fibras do tipo multimodo degrau e gradual e monomodo.

## PVCD (PLASMA CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION)

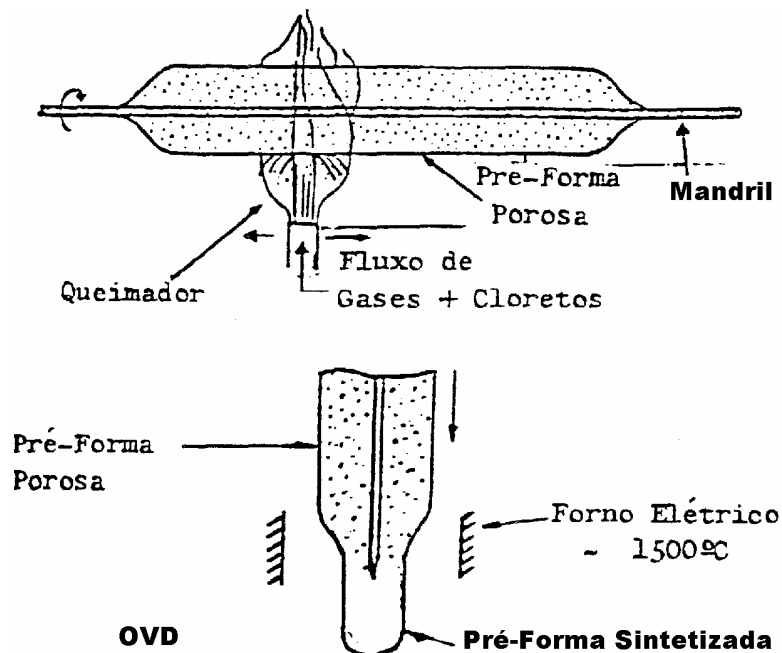
A diferença básica deste método, ilustrado abaixo, em relação ao MCVD é que ao invés de usar um maçarico de oxigênio e hidrogênio, usa-se um plasma não isotérmico formado por uma cavidade ressonante de microondas para a estimulação dos gases no interior do tubo de sílica.



Neste processo, não é necessária a rotação do tubo em torno de seu eixo, pois a deposição uniforme é obtida devido à simetria circular da cavidade ressonante. A temperatura para deposição é em torno de 1100°C. As propriedades das fibras fabricadas por este método são idênticas ao MCVD.

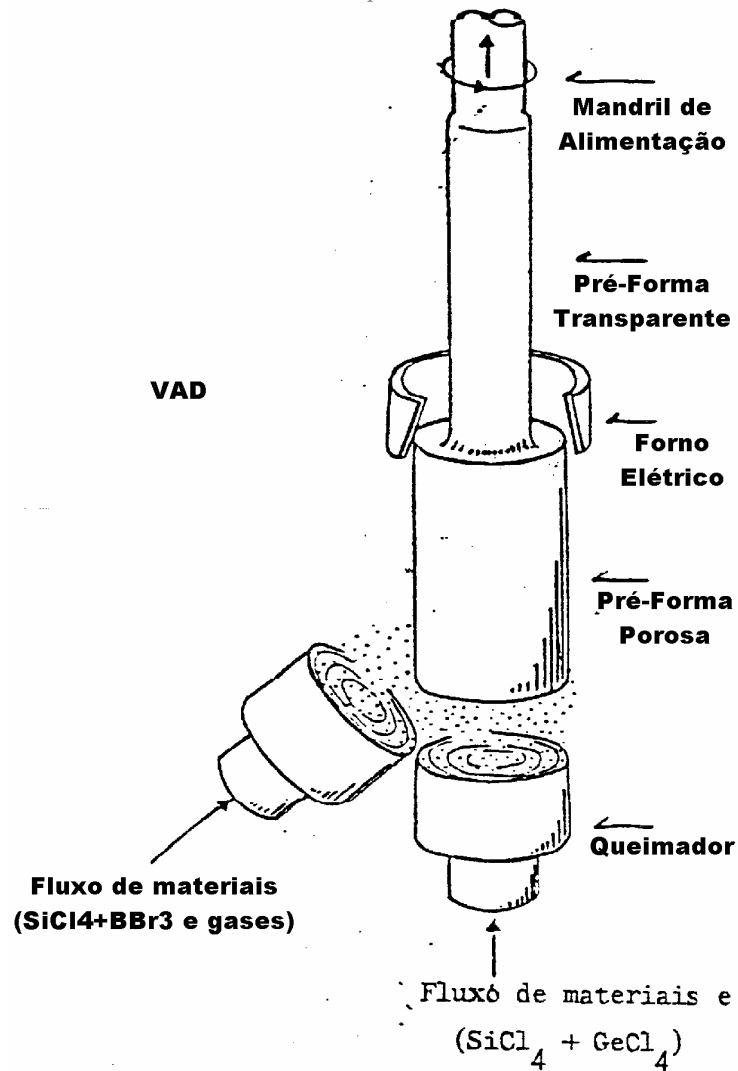
## OVD (OUTSIDE VAPOUR DEPOSITION)

Este processo baseia-se no crescimento da preforma a partir de uma semente, que é feita de cerâmica ou grafite, também chamada de mandril. Este mandril é colocado num torno e permanece girando durante o processo de deposição que ocorre sobre o mandril. Os resgantes são lançados pelo próprio maçarico e os cristais de vidro são depositados no mandril através de camadas sucessivas. Nesse processo ocorre a deposição do núcleo e também da casa, e obtêm-se preformas de diâmetro relativamente grande, o que proporcionam fibras de grande comprimento (40 km ou mais). Após essas etapas teremos uma preforma porosa (opaca) e com o mandril em seu centro. Para a retirada do mandril coloca-se a preforma num forno aquecido a 1500°C que provoca a dilatação dos materiais. Através da diferença de coeficiente de dilatação térmica consegue-se soltar o mandril da preforma e a sua retirada. O próprio forno faz também o colapsamento da preforma para torná-la cristalina e maciça. Esse processo serve para a fabricação de fibras do tipo multimodo e monomodo de boa qualidade de transmissão.



## VAD (VAPOUR AXIAL DEPOSITION)

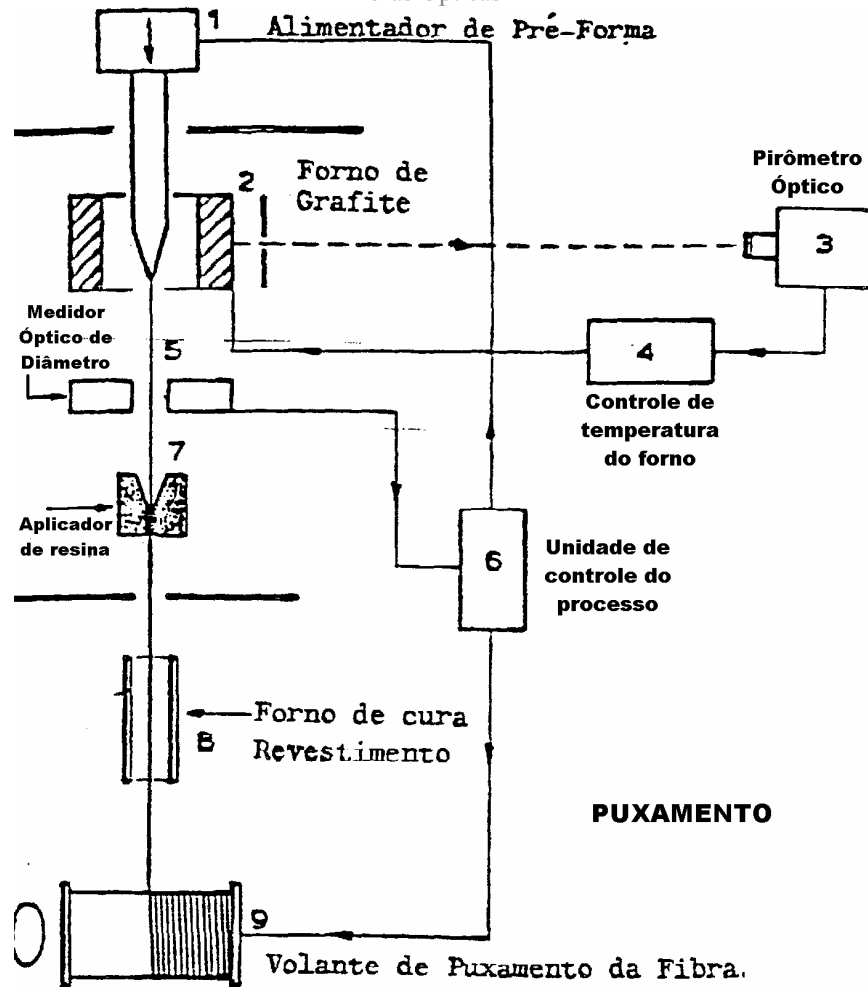
Neste processo, a casca e o núcleo são depositados mas no sentido do eixo da fibra (sentido axial). Neste processo utilizam-se dois queimadores que criam a distribuição de temperatura desejada e também injetam os gases (reagentes). Obtém-se assim uma preforma porosa que é cristalizada num forno elétrico à temperatura de 1500°C. Este processo obtém preformas com grande diâmetro e grande comprimento, tornando-o extremamente produtivo.



## PUXAMENTO

Uma vez obtida a preforma, por qualquer um dos métodos descritos acima, esta é levada a uma estrutura vertical chamada torre de puxamento e é fixada num alimentador que a introduz num forno (normalmente de grafite, que utiliza maçaricos especiais ou lasers de alta potência) com temperatura de aproximadamente 2000°C que efetua o escoamento do material formando um capilar de vidro, a fibra óptica.

O diâmetro da fibra depende da velocidade de alimentação da preforma no forno e da velocidade de bobinamento da fibra, ambas controladas por computador. O controle desse processo é feito através de um medidor óptico de diâmetro (que funciona a laser).



## FABRICAÇÃO DE FIBRAS DE VIDRO COMPOSTO

Os vidros mais utilizados são o  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  sendo o índice de refração controlado pela concentração de  $\text{Na}_2\text{O}$ .

## MÉTODO ROD-IN-TUBE

Este método consiste na inserção de vidros na forma de bastão e tubo simultaneamente no forno de puxamento, o qual efetua o escoamento dos materiais ao mesmo tempo. Assim, obtêm-se fibras degrau do tipo sílica-sílica (casca e núcleo de vidro) e variações como fibras de sílica-silicone (esticando-se apenas o bastão, que forma o núcleo e aplicando-se o silicone, que forma a casca) e fibras bundle (esticando-se apenas o bastão, que forma o núcleo, com a casca formada pelo próprio ar), as quais são utilizadas em iluminação.

## DOUBLE CRUCIBLE (DUPLO CADINHO)

Este processo é semelhante ao anterior, mas os vidros vêm na forma de bastão, os quais são introduzidos no forno do puxamento, que contém dois cadinhos. Neste processo, a geometria dos vidros alimentadores não é tão importante como no processo

anterior. Neste processo consegue-se a variação do índice de refração através da migração de íons alcalinos que mesclam a concentração dos vidros interno e externo.

## **FABRICAÇÃO DE FIBRAS DE PLÁSTICO**

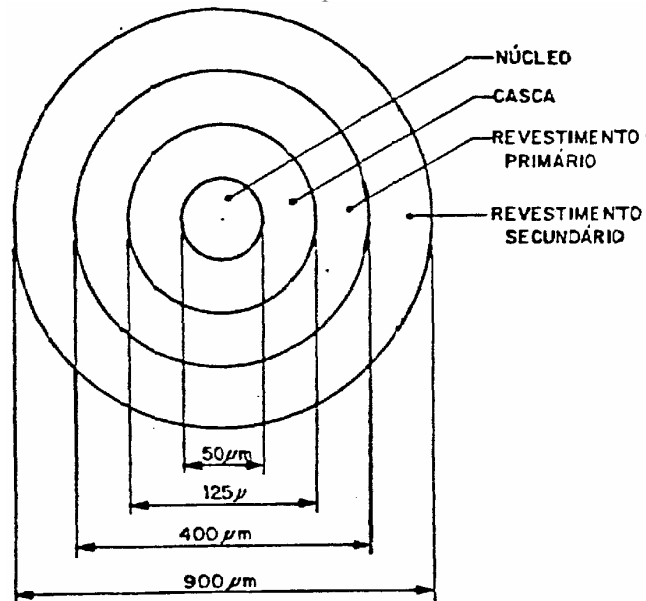
A fabricação de fibras de plástico é feita por extração. As fibras ópticas obtidas com este método têm características ópticas bem inferiores às de sílica, mas possuem resistência mecânica (esforços mecânicos) bem maiores que as fibras de sílica. Têm grandes aplicações em iluminação e transmissão de informações a curtas distâncias e situações que oferecem grandes esforços mecânicos às fibras.

## **CABOS ÓPTICOS**

O uso de fibras ópticas gerou uma série de modificações nos conceitos de projeto e fabricação de cabos ópticos para telecomunicações. Nos cabos de condutores metálicos as propriedades de transmissão eram definidas pelo condutor, construção do cabo e materiais isolantes. Estes cabos eram pouco afetados nas suas características pelas trações e torções exercidas sobre os cabos durante a fabricação e instalação. Já nos cabos ópticos, a situação é diferente porque as características de transmissão dependem apenas da fibra óptica e sua fragilidade é notória. No projeto de cabos ópticos são observados os seguintes itens:

- número de fibras
- aplicação
- minimização de atenuação por curvaturas
- características de transmissão estável dentro da maior gama de temperatura possível
- resistência à tração, curvatura, vibração, compressão adequadas
- degradação com o tempo (envelhecimento)
- facilidade de manuseio, instalação, confecção de emendas, etc.

Durante a fabricação e instalação não se deve aplicar tensões excessivas sobre a fibra, pois a mesma tem ruptura teórica a 1800 kgf/mm. Na prática costuma-se não exceder 250 g de tensão para fibras de 125  $\mu\text{m}$  de casca. O revestimento da fibra óptica deve ser deslizante (autolubrificante). Assim sendo, quando o revestimento primário for o silicone aplica-se uma camada de nylon. No caso do acrilato não é necessária a aplicação do nylon.

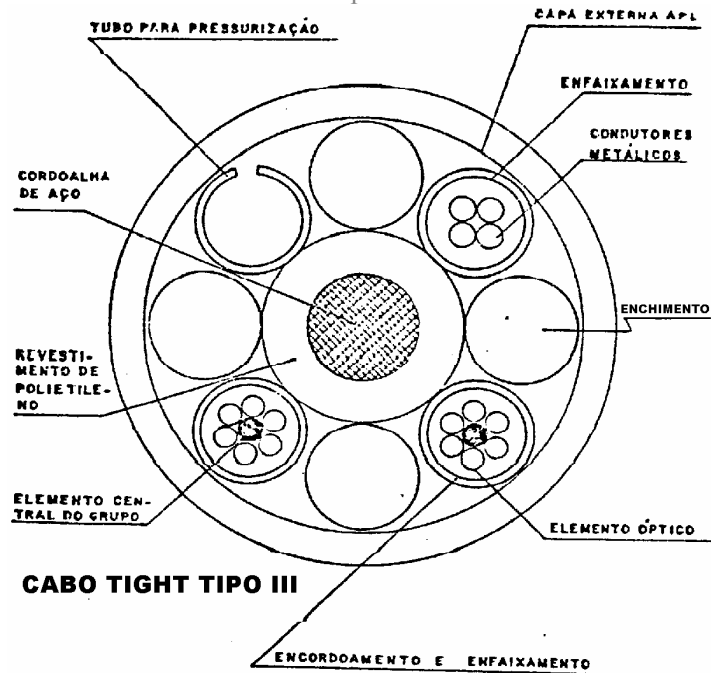


## CONSTRUÇÃO DE CABOS ÓPTICOS

A construção de cabos ópticos é efetuada através de várias etapas de reunião de vários elementos, aplicação de capas, enchimentos, encordoamentos em equipamentos especiais, tais como extrusoras e planetárias. Neste processo efetua-se a cordagem das fibras em torno de elementos de apoio e tração. Para garantir-se uma probabilidade de longa vida para o cabo, é necessário não submeter a fibra a tensões elevadas. Para isso, são utilizados, durante a construção, elementos tensores e tubos os quais absorvem as solicitações mecânicas aplicadas no cabo. Esses elementos são muito importantes na construção do cabo assegurando estabilidade dimensional do mesmo.

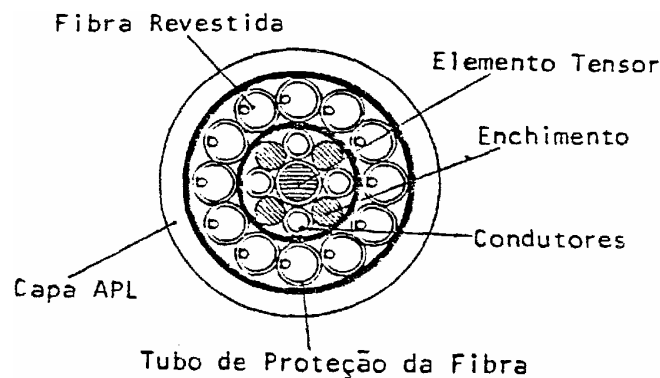
## ESTRUTURA TIGHT (ADERENTE)

Neste tipo de estrutura, as fibras ópticas estão em contato com a estrutura do cabo óptico. Possuem, por esta razão, elementos de tração bem resistentes.



## ESTRUTURA LOOSE (NÃO ADERENTE)

Neste tipo de estrutura, a fibra óptica fica afastada da estrutura do cabo acondicionada em tubos (plásticos ou metálicos).



## MEDIDAS EM FIBRAS ÓPTICAS

Para a caracterização das fibras ópticas são efetuadas medições que verificam as características de transmissão das fibras, a saber:

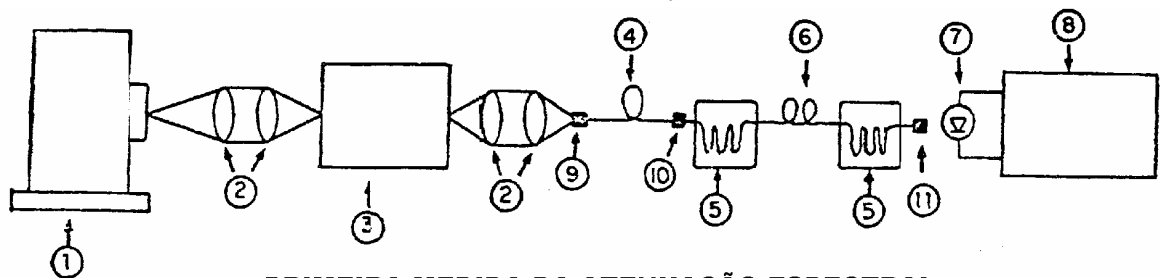
- atenuação espectral
- atenuação de inserção
- atenuação por retroespalhamento
- largura de banda
- abertura numérica
- perfil de índice de refração

## TESTE DE ATENUAÇÃO ESPECTRAL

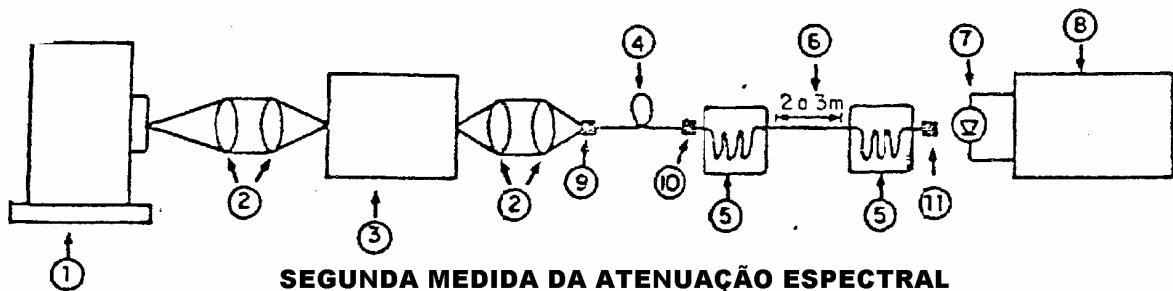
Este tipo de teste mede a atenuação da fibra óptica numa faixa de comprimentos de onda, normalmente contendo o comprimento de onda em que a fibra operará. É

efetuado em laboratório devido à complexidade e precisão e fornece dados sobre a contaminação que pode ter ocorrido na fabricação da preforma e puxamento, principalmente o OH<sup>-</sup>.

O teste consiste em se medir a potência de luz após percorrer toda a fibra nos vários comprimentos de onda que se deseja medir a atenuação, esta é a primeira medida, ou ainda, a potência de saída. Após isso, corta-se a fibra a 2 ou 3 metros do início, sem alterar as condições de lançamento, e mede-se a potência de luz nesse ponto, que pode ser considerado como a potência de entrada, uma vez que 2 ou 3 metros tem atenuação desprezível; esta é a segunda medida. De posse das duas medidas, calcula-se a atenuação por  $A = 10 \cdot \log \frac{P_s}{P_e}$  [dB].



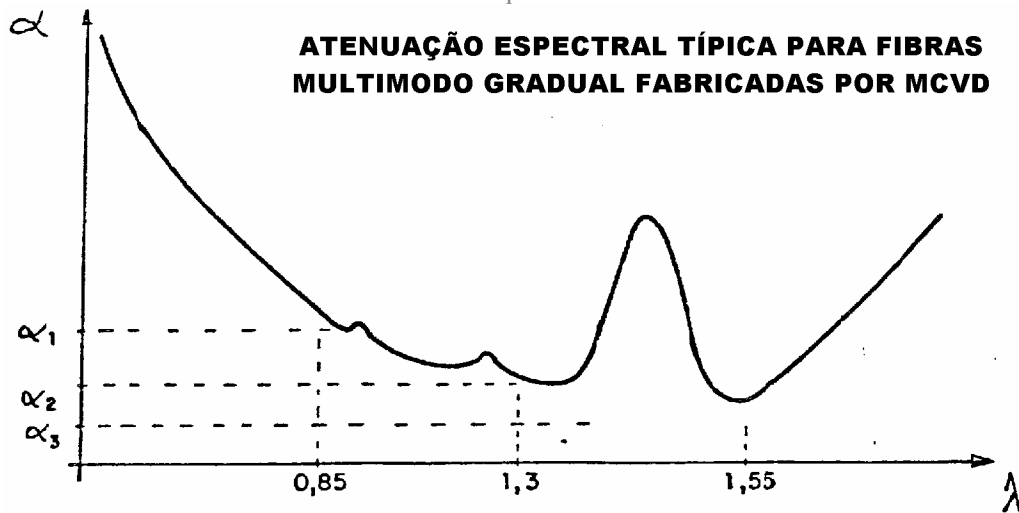
**PRIMEIRA MEDIDA DA ATENUAÇÃO ESPECTRAL**



**SEGUNDA MEDIDA DA ATENUAÇÃO ESPECTRAL**

Onde:

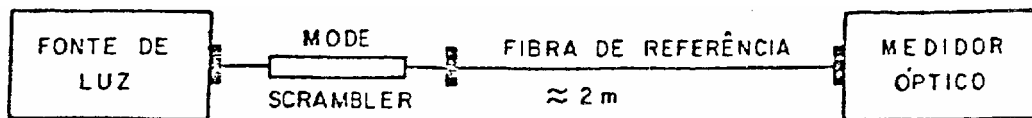
- (1) - fonte de luz
- (2) - lentes
- (3) - monocromador
- (4) - fibra de lançamento
- (5) - eliminador de luz nas cascas
- (6) - fibra óptica a ser medida
- (7) - detector óptico
- (8) - medidor de potência
- (9) - acoplamento FONTE-FIBRA otimizado
- (10) - acoplamento FIBRA-FIBRA otimizado
- (11) - acoplamento FIBRA-DETECTOR otimizado



## TESTE DE ATENUAÇÃO DE INSERÇÃO

Este teste é mais apropriado para situações de campo e ele mede a atenuação da fibra óptica apenas num comprimento de onda, normalmente mede-se no comprimento de onda que o sistema opera. O teste utiliza dois instrumentos portáteis: o medidor de potência e a fonte de luz.

O teste divide-se em duas etapas, na primeira é efetuada uma calibração dos dois instrumentos, para conhecermos a potência de luz que será lançada, na fibra óptica, e na segunda é efetuada a medida de potência após a luz percorre toda a fibra óptica. A diferença entre as duas será o valor de atenuação.



**MONTAGEM PARA A PRIMEIRA MEDIDA**



**MONTAGEM PARA A SEGUNDA MEDIDA**

## TESTE DE ATENUAÇÃO POR RETROESPELHAMENTO

Este teste é realizado com um instrumento chamado OTDR (optical time domain reflectometer), que significa refletômetro óptico no domínio do tempo. O instrumento faz uso do fenômeno do espalhamento de Rayleigh, que é a irradiação da luz das moléculas de vidro, proporcional à luz incidente. O instrumento faz uso deste fenômeno da seguinte forma:

- Gera-se um impulso luminoso que é inserido na fibra óptica sob teste.
- Ao percorrer a fibra até um ponto X, a luz é atenuada.
- Ao chegar no ponto X, a luz provoca o espalhamento de Rayleigh das moléculas de vidro desse ponto, com intensidade proporcional à luz existente nesse ponto.
- Como o espalhamento é homogêneo em todas as direções, parte dessa energia luminosa retorna à fonte (OTDR).
- A luz que retorna à fonte também é atenuada. É importante observar que a atenuação do retorno à fonte é igual à atenuação do sinal até o ponto X, pois o caminho de propagação é o mesmo.
- O OTDR mede a potência de luz que retorna à fonte, bem como o tempo gasto para que o impulso gerado vá até o ponto X e retorne ao início da fibra.

Para que o OTDR possa calcular a localização do ponto X, é necessário fornecer-lhe o índice de refração da fibra sob teste. Para este cálculo, o instrumento faz

uso da seguinte fórmula  $L = v \frac{\Delta t}{2}$ , onde

- L é a distância entre o ponto X e o início da fibra óptica
- $\Delta t$  é o tempo de propagação do sinal luminoso de ida e volta ao ponto X
- v é a velocidade da luz na fibra dada por  $v=c/n$  (c é a velocidade da luz no vácuo e n é o índice de refração fornecido ao instrumento)

É importante observar que a atenuação só é precisa se o espalhamento de Rayleigh for homogêneo em toda a fibra óptica. As vantagens deste tipo de medida é que necessitamos de apenas uma ponta da fibra, não é destrutivo, possibilita medir comprimentos, atenuação das emendas, atenuação nos conectores, localiza defeitos, etc. Como desvantagens, podemos citar:

- Possui pequena faixa dinâmica de medidas
- A atenuação só é precisa se o espalhamento de Rayleigh for homogêneo em toda a fibra óptica
- Necessita do índice de refração
- Não mede atenuação espectral

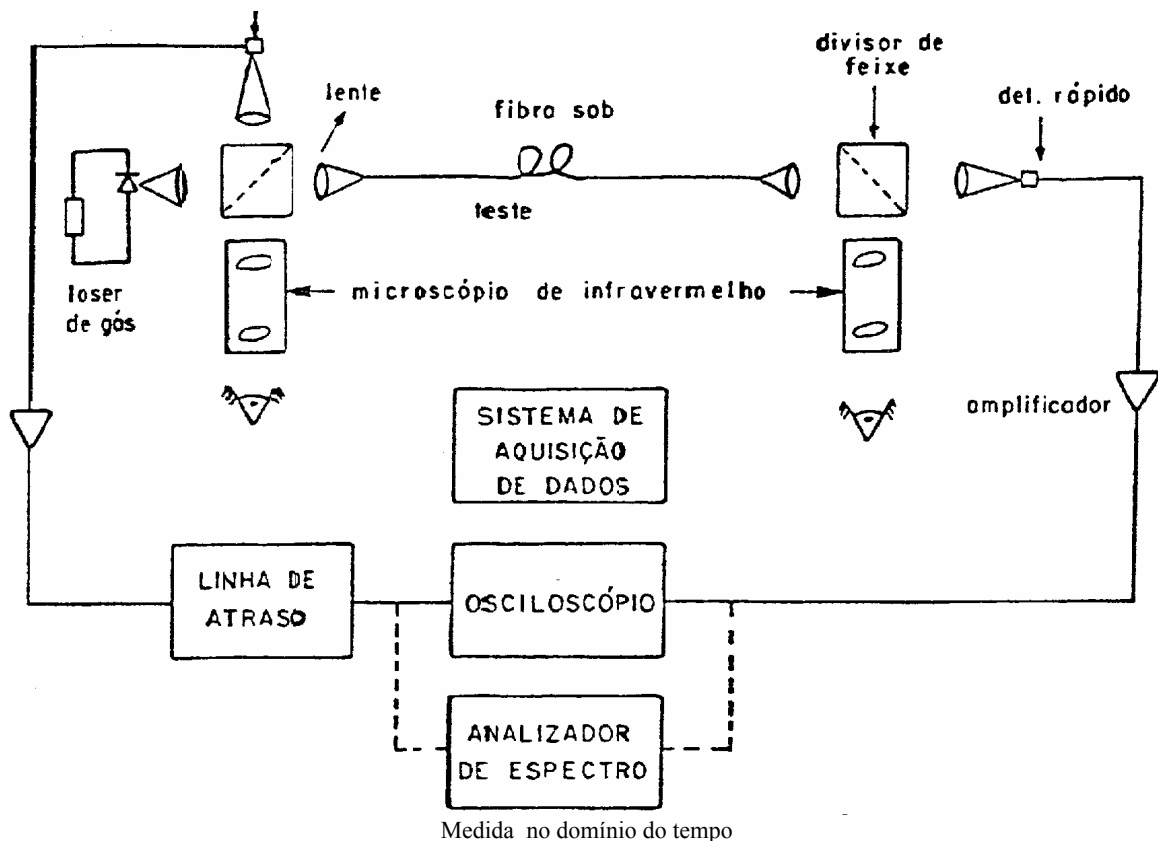
Sua utilização é muito comum em todas as fases de implementação dos sistemas ópticos. Os instrumentos e acessórios utilizados neste teste são clivador, cordão de fibra de lançamento próprio para o OTDR utilizado (pig tail) e o OTDR.

## TESTE DE LARGURA DE BANDA

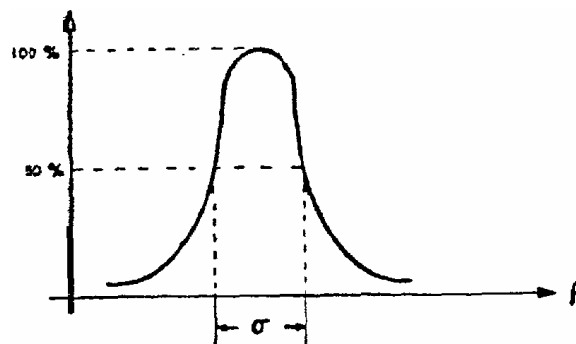
Este teste determina a máxima velocidade de transmissão de sinais que uma fibra óptica pode ter, ou seja, mede a capacidade de resposta da fibra óptica. O teste é realizado com o objetivo de sabermos se a fibra óptica tem condições de operar com a taxa de transmissão especificada para o sistema. Existem duas formas básicas de realizarmos a medida:

- no domínio do tempo;
- no domínio da frequência.

Para a realização do teste no domínio do tempo devemos realizar a montagem da figura abaixo.



- através do laser de gás, gera-se um impulso luminoso de curta duração.
- com o osciloscópio mede-se as formas de onda dos impulsos de entrada e saída.
- se os impulsos tiverem forma Gaussiana (distribuição de Gauss), mede-se a largura dos impulsos à meia altura (50% da máxima amplitude).



- calcula-se a largura de banda por:  $B = \frac{1}{5 \cdot \sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_E^2}}$

onde:

$\sigma_S^2$  é a largura à meia altura do impulso de saída

$\sigma_E^2$  é a largura à meia altura do impulso de entrada

- se os impulsos não apresentarem forma Gaussiana, obtém-se a largura de banda passante no

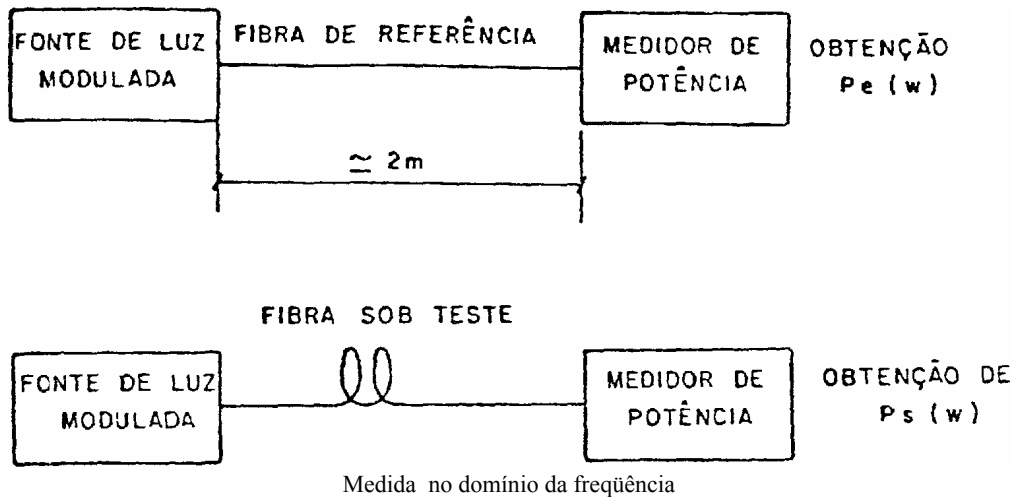
domínio da freqüência definida por:  $H = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P_S(t) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} P_E(t) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} dt}$

onde :

$P_S(t)$  é a forma do impulso de saída

$P_E(t)$  é a forma do impulso de entrada

O teste de largura de banda no domínio da freqüência consiste na obtenção direta, através de medidas, da função  $H(W)$ . É recomendado para situações de campo (instalação, manutenção). Este teste consiste em modularmos uma fonte de luz senoidalmente, fazendo uma varredura na freqüência de modulação. A energia luminosa é introduzida na fibra óptica e detectada na outra extremidade por um medidor de potência.



O módulo da função transferência é dado pela seguinte expressão:

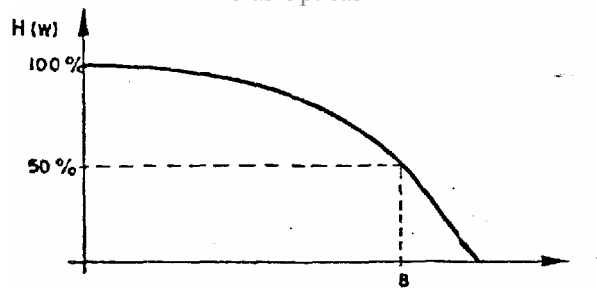
$$H(W) = \frac{P_S(W)}{P_E(W)}$$

onde:

$P_S(W)$  é a potência de saída em função da freqüência de modulação

$P_E(W)$  é a potência de entrada em função da freqüência de modulação

Assim obtemos:



onde pode-se obter a banda passante  $B$ .

A largura de banda típica para fibras multimodo é menor que 1000MHz.km (500 a 600) em 850nm e para fibras monomodo temos de 10 a 100GHz.km em 1300nm.

Este teste é importante ser realizado em sistemas de fibras multimodo pois quando emendamos fibras com larguras de banda diferentes o resultado pode ser imprevisível. Uma

expressão que prevê estatisticamente a largura de banda resultante é:  $B = \left[ \sum_i B_i^{-1/\gamma} \right]^{-\gamma}$ , onde:

$B_i$  é a banda passante do  $i$ -ésimo trecho

é o fator de concatenação de modos determinado empiricamente (para fibras ópticas multimodo = 0,8 é um valor típico, podendo variar de 0,5 a 1).

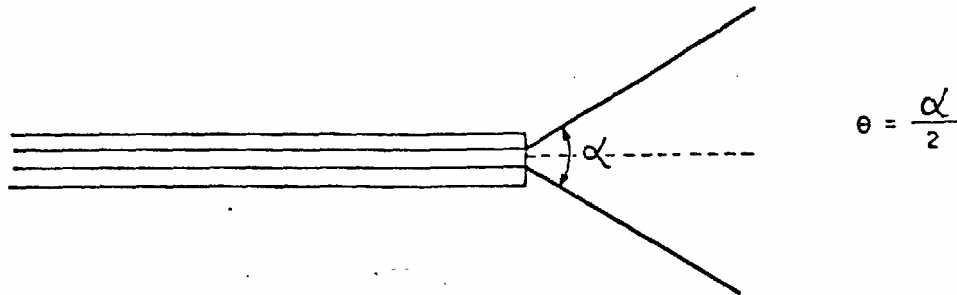
## TESTE DE ABERTURA NUMÉRICA

A abertura numérica é um número que define a capacidade de captação luminosa da fibra óptica e é definida por:  $AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ , onde:

$n_1$  é o índice de refração do núcleo

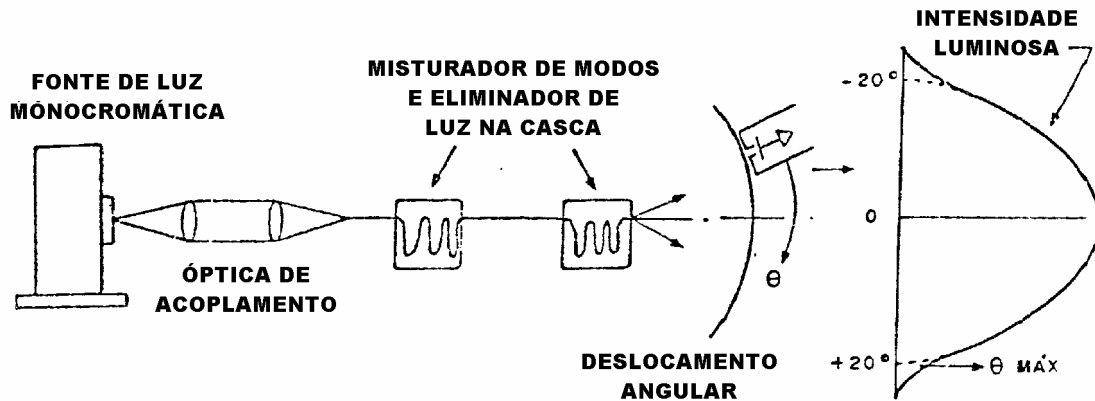
$n_2$  é o índice de refração da casca

ou ainda:  $AN = \sin \frac{\alpha}{2}$ , onde:



Esta grandeza é intrínseca à própria fibra e é definida na fabricação, onde tem maior importância.

O valor típico para abertura numérica nas fibras multimodo 50/125um é 0,2 o que corresponde a um ângulo  $\alpha=23^\circ$  e  $\alpha=11,5^\circ$ . Como a abertura numérica é equivalente à distribuição de luz do campo distante, o teste mede a intensidade de luz desse campo.



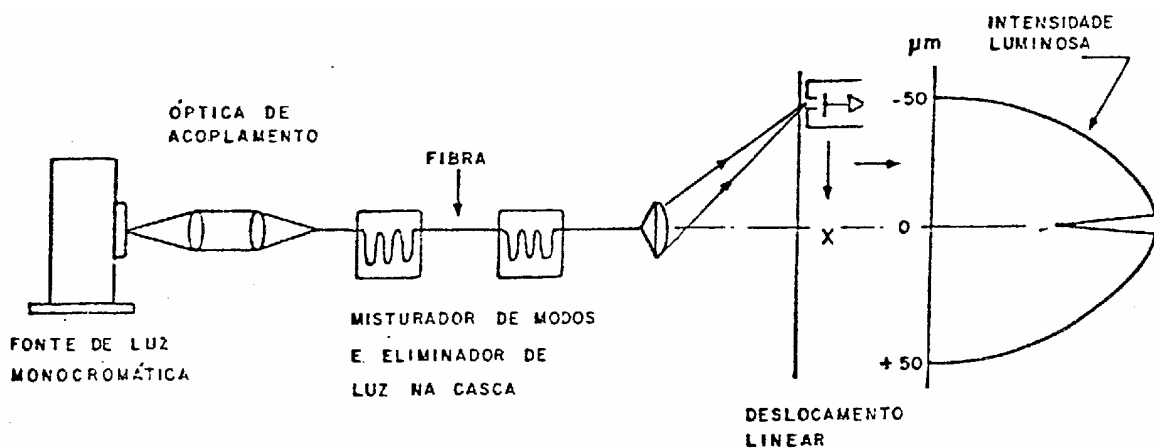
Medida da distribuição de luz no campo distante

As medidas são obtidas através de um detector que percorre um deslocamento angular ou pela projeção do feixe de luz num anteparo graduado. Desta maneira se obtém o ângulo de abertura do feixe luminoso.

## TESTE DO PERFIL DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Este teste tem maior importância na fase de fabricação de fibras ópticas.

Não existem limites para o perfil de índice, uma vez que qualquer imperfeição no mesmo implica numa diminuição da banda passante da fibra óptica, esta sim com limites específicos. O valor do índice de refração num determinado ponto é proporcional à distribuição de luz do campo próximo.



Medida da distribuição de luz no campo próximo

## INSTALAÇÃO DE CABOS

Cabos ópticos requerem cuidados especiais para instalação pois as fibras são materiais frágeis e quebradiços. Deve-se observar que:

- o cabo não deve sofrer curvaturas acentuadas, o que pode provocar quebra das fibras em seu interior.
- o cabo não deve ser tracionado pelas fibras ou elementos de enchimento adjacentes a elas, mas sim pelos elementos de tração ou aço existentes no cabo.

- a velocidade de puxamento não deve ser muito elevada para permitir uma paralização imediata se necessário.
- não se deve exceder a máxima tensão de puxamento especificada para o cabo. Esta deve ser monitorada, através de uma célula de carga ,durante todo o puxamento.
- o cabo deve ser limpo e lubrificado a fim de diminuir o atrito de tracionamento.
- deve-se puxar o cabo com um destorcedor para permitir uma acomodação natural do cabo no interior do duto ou canalização.

## CONFECCÃO DE EMENDAS

Existem dois tipos básicos de emendas que podem ser efetuadas:

- emenda por fusão
- emenda mecânica

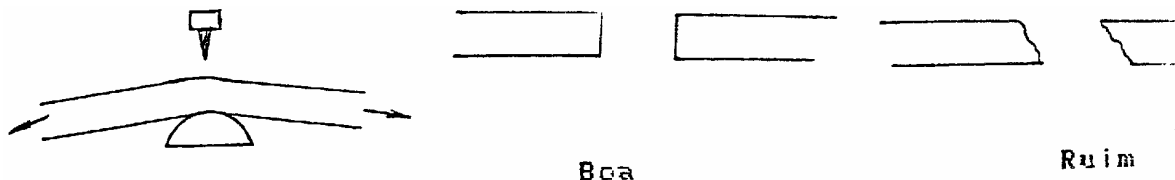
### **EMENDA POR FUSÃO**

Neste tipo de emenda a fibra é introduzida numa máquina , chamada máquina de fusão, limpa e clivada, para , após o alinhamento apropriado, ser submetida à um arco voltaico que eleva a temperatura nas faces das fibras, o que provoca o derretimento das fibras e a sua soldagem. O arco voltaico é obtido a partir de uma diferença de potencial aplicada sobre dois eletrodos de metal.

Após a fusão a fibra é revestida por resinas que tem a função de oferecer resistência mecânica à emenda, protegendo-a contra quebras e fraturas. Após a proteção a fibra emendada é acomodada em recipientes chamados caixa de emendas.

As caixas de emendas podem ser de vários tipos de acordo com a aplicação e o número de fibras. Umas são pressurizáveis ou impermeáveis, outras resistentes ao sol, para instalação aérea.

A CLIVAGEM é o processo de corte da ponta da fibra óptica. É efetuada a partir de um pequeno ferimento na casca da fibra óptica (risco) e a fibra é tracionada e curvada sob o risco, assim o ferimento se propaga pela estrutura cristalina da fibra.



A qualidade de uma clivagem deve ser observada com microscópio.

### **EMENDA MECÂNICA**

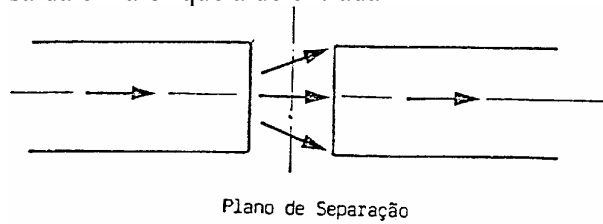
Este tipo de emenda é baseado no alinhamento das fibras através de estruturas mecânicas. São dispositivos dotados de travas para que a fibra não se mova no interior da emenda e contém líquidos entre as fibras , chamados líquidos casadores de índice e refração, que tem a função de diminuir as perdas de Fresnel (reflexão). Neste tipo de emenda as fibras também devem ser limpas e clivadas.

Este tipo de emenda é recomendado para aqueles que tem um número reduzido de emendas a realizar pois o custo desses dispositivos é relativamente barato, além de serem reaproveitáveis.

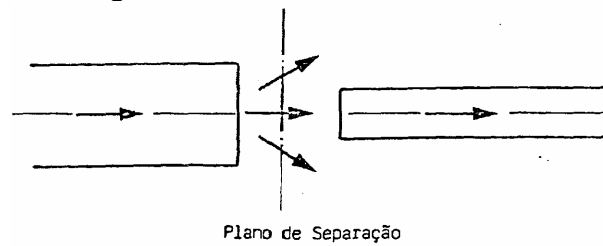
## CONNECTORES

Os conectores utilizam acoplamentos frontais ou lenticulares, sendo que existem três tipos de acoplamentos frontais:

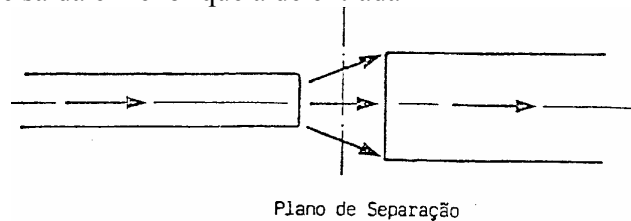
- quando a superfície de saída é maior que a de entrada



- quando a superfície de saída é igual à de entrada

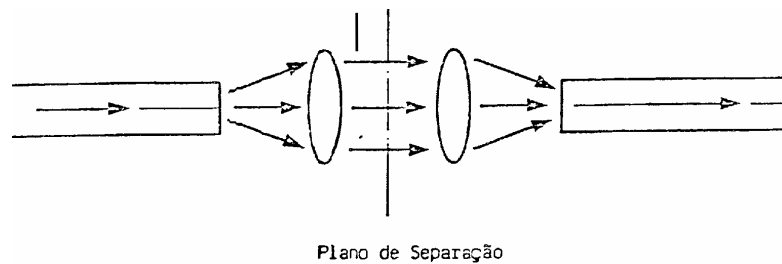


- quando a superfície de saída é menor que a de entrada

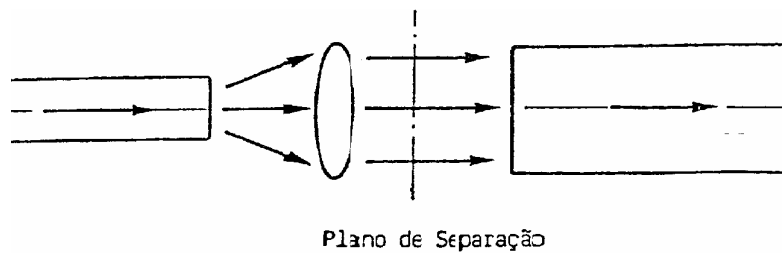


E também existem dois tipos de acoplamentos lenticulares:

- simétrico



- assimétrico

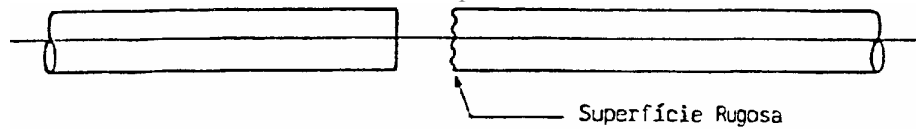


Os requisitos dos conectores são:

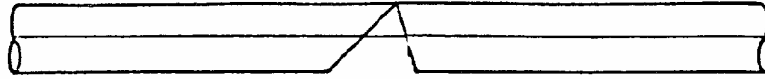
- montagem simples;
- forma construtiva estável;
- pequenas atenuações;
- proteção das faces das fibras.

Os fatores que influenciam na qualidade de um conector são:

- alinhamento
- montagem
- características de transmissão das fibras

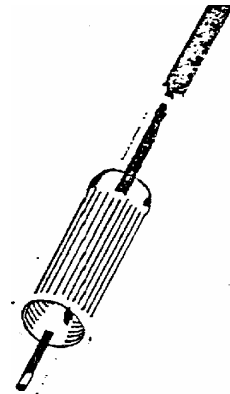


**RUGOSIDADE DA FACE DE UMA FIBRA**

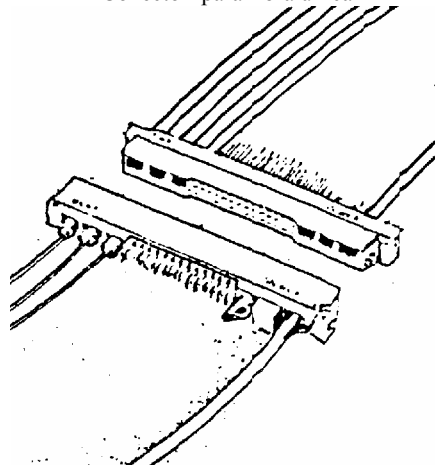


**INCLINAÇÃO DAS FACES**

- Existem conectores:
- para fibra única
  - para várias fibras (múltiplo)

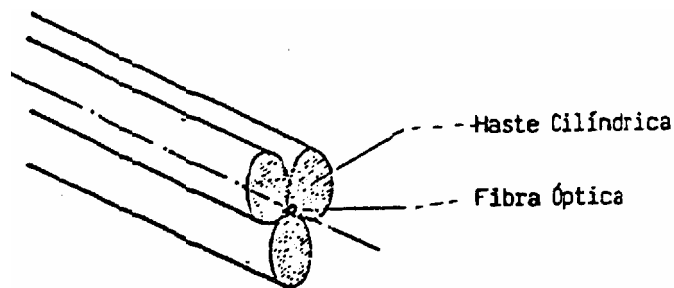
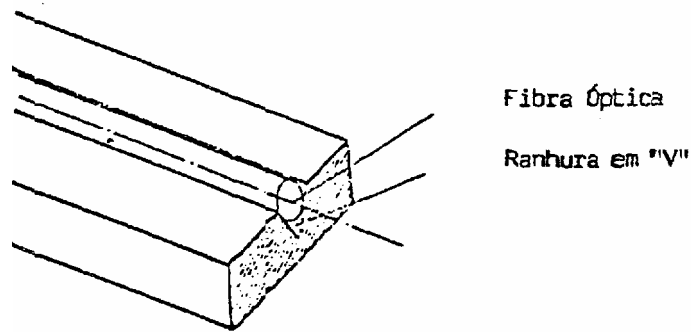
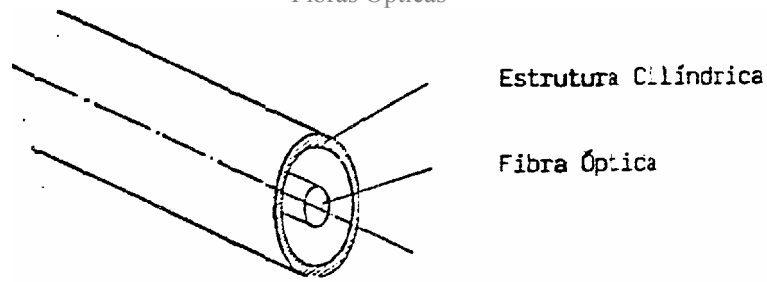


Conector para fibra única



Conector múltiplo

Com relação à forma que se realiza o alinhamento podemos ter vários tipos de estruturas sendo que os mais comuns são os circulares e os tipo V-GROOVE. Os tipos circulares são recomendados para conexões duradouras enquanto que os V-GROOVE para situações provisórias de conexões de fibras nuas(sem revestimento).



Tipos de alinhamentos de fibras ópticas

## Fontes Ópticas

### Tipos de Fontes Ópticas

Para sistemas ópticos, encontramos dois tipos de fontes ópticas que são freqüentemente utilizadas: LED e LASER.

Cada um destes dois tipos de fontes oferecem certas vantagens e desvantagens, e diferenciam-se entre si sob diversos aspectos:

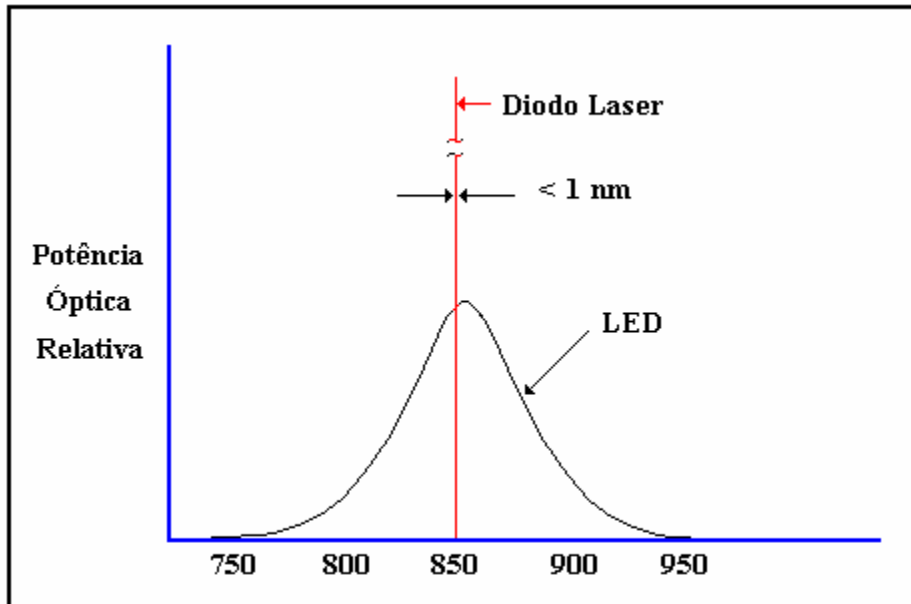
- Potência luminosa: os lasers oferecem maior potência óptica se comparados com os leds.

LED : (-7 a -14dBm)

<http://www.li.facens.br/eletronica>

## LASER : (1dBm)

- Largura espectral: os lasers tem largura espectral menor que os leds, o que proporciona menor dispersão material.

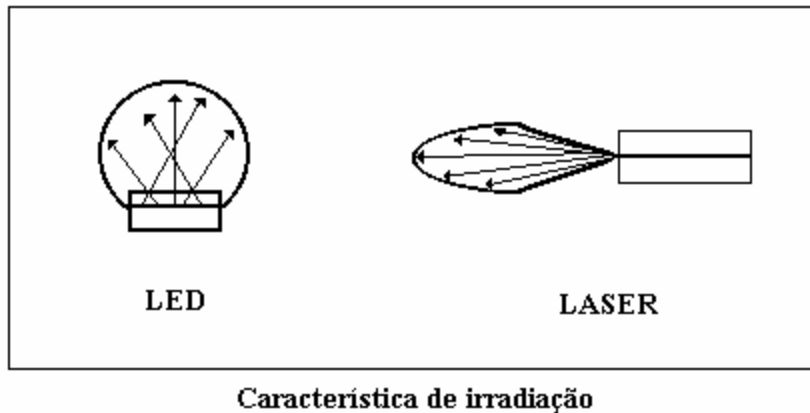


Largura espectral do Led e do Laser

- Tipos e velocidades de modulação: os lasers tem velocidade maior que os leds, mas necessitam de circuitos complexos para manter uma boa linearidade.
- Acoplamento com a fibra óptica: o feixe de luz emitido pelo laser é mais concentrado que o emitido pelo led, permitindo uma eficiência de acoplamento maior.
- Variações com temperatura: os lasers são mais sensíveis que os leds à temperatura.
- Vida útil e degradação: os leds tem vida útil maior que os lasers (aproximadamente 10 vezes mais), além de ter degradação bem definida.
- Custos: os lasers são mais caros que os leds, pois a dificuldade de fabricação é maior.
- Ruídos: os lasers apresentam menos ruídos que os leds. Ambos podem ser fabricados do mesmo material, de acordo com o comprimento onda desejado:

\* AlGaAs (arseneto de alumínio e gálio) para 850 nm.

\* InGaAsP (arseneto fosfeto de índio e gálio) para 1300 e 1550 nm.



Através das características de ambos os elementos, vemos que o laser é o que nos fornece uma maior potência luminosa e uma menor largura espectral, razão pela qual é amplamente empregado nos circuitos ópticos. Desta forma, faremos um breve entendimento sobre os conceitos básicos do laser, bem como o seu funcionamento como fonte óptica.

## LASER

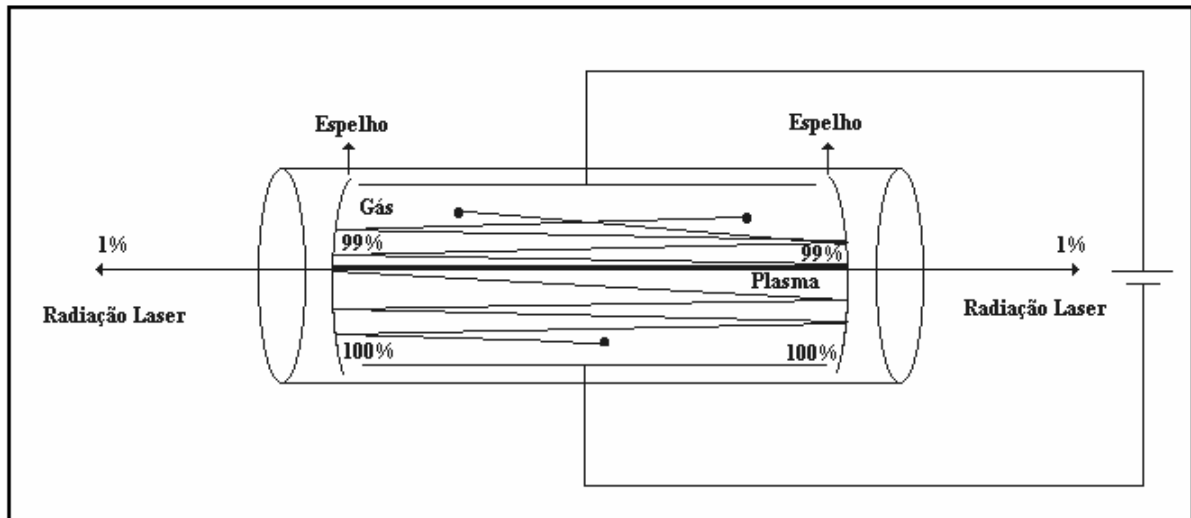
Para entendermos o funcionamento de um laser, vamos tomar um laser a gás (HeNe) de maneira didática onde os números usados são ilusórios para maior visualização dos fenômenos.

Um átomo é composto de um núcleo e de elétrons que permanecem girando em torno do mesmo em órbitas bem definidas.

Quanto mais afastado do núcleo gira o elétron, menor a sua energia.

Quando um elétron ganha energia ele muda de sua órbita para uma órbita mais interna, sendo este um estado não natural para o átomo mas sim forçado.

Como esse estado não é natural, o átomo por qualquer distúrbio tende a voltar a seu estado natural, liberando a energia recebida em forma de ondas eletromagnéticas de comprimento de onda definido em função das órbitas do átomo.



Existem duas condições básicas para que o fenômeno laser aconteça:

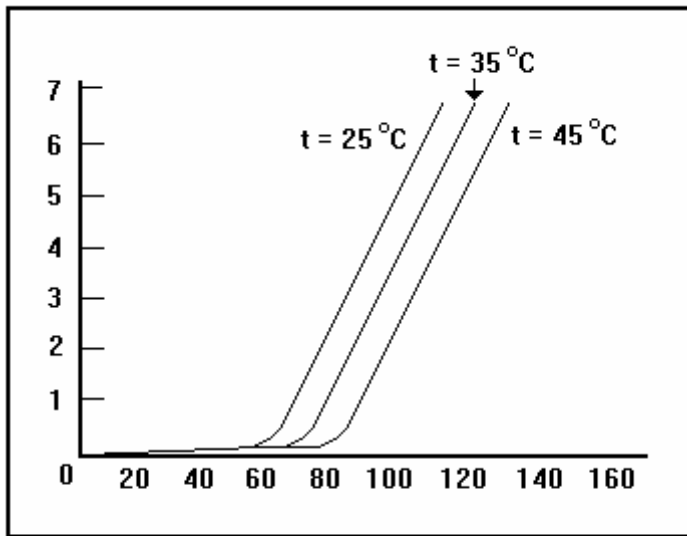
- Inversão de população
- Alta concentração de luz

A inversão de população é o estado em que uma grande quantidade de átomos ficam com elétrons carregados de energia, girando em órbitas maior internas. É como se o átomo fosse engatilhado para o disparo de ondas eletromagnéticas (os fótons). Esse estado é conseguido através de altas tensões de polarização fornecidas ao laser (200 à 300V).

A alta concentração de luz é a perturbação necessária para que o átomo dispare, ou seja, volte a sua condição natural, liberando portanto, a energia armazenada em forma de ondas eletromagnéticas. Se tivermos uma quantidade de átomos suficientes engatilhados e se a concentração de luz for suficiente teremos um efeito multiplicativo onde o fóton gerado gera outros fótons, obtendo-se assim o fenômeno laser (emissão de radiação estimulada amplificada pela luz).

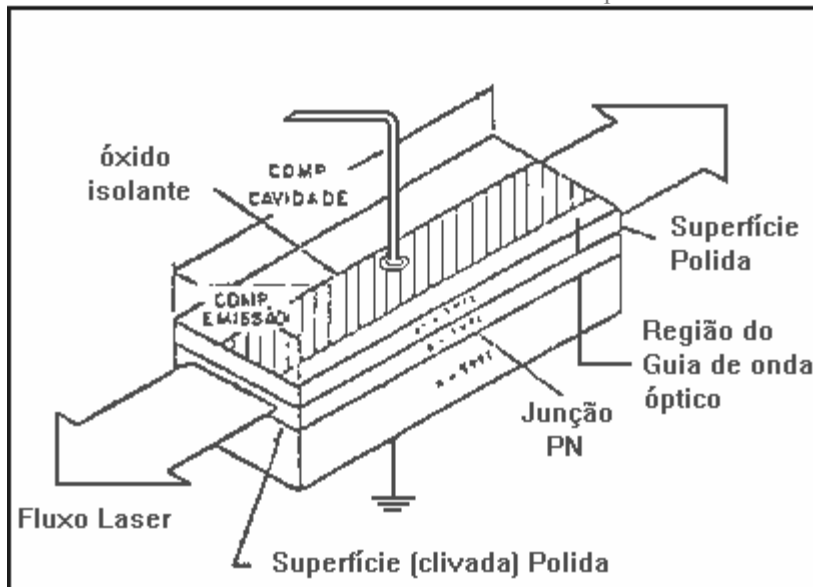
As características típicas de um laser são:

- luz coerente
- altas potências
- monocromaticidade
- diagrama de irradiação concentrado
- altas tensões de polarização
- fluxo de luz não proporcional à corrente
- vida útil baixa (10000 horas)
- sensível a variações de temperatura
- alto custo
- próprio para sinais digitais
- altas velocidades, ou seja, grande banda de passagem (1 Ghz ou mais)



Curva de operação de um Laser

Os lasers usados em sistemas ópticos são feitos de materiais semicondutores, os quais geram comprimentos de onda apropriados para transmissão (janelas de baixa atenuação). A cavidade onde ocorre o fenômeno laser é obtida através da diferença entre os índices de refração das várias camadas, da diferença de intensidade de campo elétrico e dos espelhos (face polida) do cristal semicondutor.



Existem dois tipos de lasers quanto ao tipo de fabricação:

- Lasers cujo guia de onda (cavidade ressonante) é induzida por corrente, chamados lasers GLD (gainguide laser diode).
- Lasers cujo guia de onda é incorporado pela variação de índice de refração, chamados lasers ILD (index guide laser diode).

As suas principais diferenças são:

a) Corrente de acionamento

GLD: 50 à 120 mA

ILD: 10 à 60 mA

b) Astigmatismo

GLD: forte

ILD: muito fraco

c) Sensibilidade

GLD: baixa  
ILD: alta

d) Técnica de fabricação

GLD: simples  
ILD: complexa

Os lasers são geralmente montados em módulos que tem a função básica de garantir um perfeito funcionamento e alinhamento em condições de operação, pois são componentes herméticos ou selados.