

"ACOPLADORES DIRECIONAIS DE FIBRAS ÓTICAS MONOMODO"

José Tadeu de Jesus

Orientador de tese:

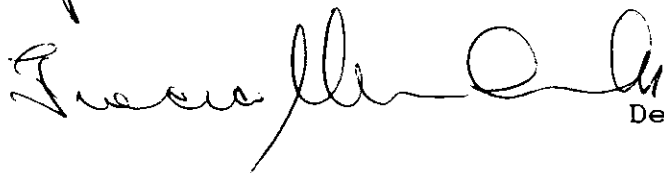
Dr. Francisco Martin Smolka

Orientador de programa:

Prof. Dr. Luiz Carlos Barbosa

Este exemplar corresponde
à redação final da tese
defendida pelo aluno
José Tadeu de Jesus e
aprovada pela comissão
 julgadora

Campinas São Paulo de 1986



Tese apresentada ao Insti-
tuto de Física "Gleb
Wataghin" da Universidade
Estadual de Campinas -
UNICAMP, para a obtenção
do grau de MESTRE em Físic-
ca.

Dezembro de 1985

A meus pais Euclides e

América

Aos meus irmãos

A minha esposa Nane

A Natalia Boboshko

A G R A D E C I M E N T O S

A Francisco Martim Smolka e Luiz Carlos Barbosa, pela orientação e apoio.

A Sergio Celaschi, pelas medidas, discussões e apoio.

Ao pessoal do projeto de Fibras óticas, em particular à Telma, Douglas, Simone, Norberto, Jorge e Romano.

A Rose, Rogério (Zig), Paulo e Gino, pessoal do dia a dia

Aos vizinhos Arlindo, Sandra, Marta e Bebel.

Aos amigos Ricardo (o procurado), Baixo (o apaixonado), Glória e Anderson, Nélia, Irval (o jardineiro) e Regina (flor), Débora, etc, etc ...

Aos integrantes do G.L.M. Tuiuti pelas músicas, poesias e cachaça

Este trabalho teve o suporte financeiro do CNPQ, FAPESP e TELEBRAS.

I N D I C E

CAPÍTULO I - Introdução

CAPÍTULO II - Aspectos Teóricos

II.1 - Física de Guiamento em Guias de Onda

II.2 - Física de Guiamento em Guias de Onda Acoplados

CAPÍTULO III - Técnicas de Fabricação

III.1- Ataque Químico

III.2- Polimento Mecânico

III.3- Fusão

CAPÍTULO IV - Montagem Experimental

IV.1 - Sistema de Alinhamento

IV.2 - Sistema de Tracionamento

IV.3 - Sistema de Fusão

IV.4 - Sistema Eletromecânico de Retirada das Chamas

IV.5 - Sistema de Lançamento e Detecção de Potência

CAPÍTULO V - Método de Fabricação

CAPÍTULO VI - Resultados Experimentais e Discussões

VI.1 - Potência acoplada X Tempo de tracionamento

VI.2 - Potência acoplada X Comprimento de onda

VI.3 - Potência acoplada X índice de refração

CAPÍTULO VII - Conclusão

Sugestões para Trabalhos Futuros

Referências

I N T R O D U Ç Ã O

A intensa e crescente utilização do espectro eletromagnético em sistemas de comunicações levou a buscas de condições e meios que permitissem ampliar e otimizar seu emprego. Deste esforço, surgiram as fibras óticas como meio viável de transporte de informação. Inicialmente com grandes perdas, as fibras continuaram a ser pesquisadas e com o desenvolvimento de fibras de baixa perda tornou possível a comunicação a longa distância através das mesmas. Devido ao sucesso na implementação da tecnologia de fibras multimodo, considerável interesse tem-se voltado para as fibras óticas monomodo. Estas, ao contrário das multimodo, transmitem potência em somente um modo e, desta forma, não possuem dispersão modal podendo assim serem aplicadas em comunicações a longas distâncias com altas taxas de informação.

Para viabilizar a implantação dos sistemas de comunicações óticas, vários dispositivos ativos e passivos foram e continuam sendo desenvolvidos para este propósito. Entre estes podemos citar os lasers e detectores, conectores, chaves óticas, polarizadores e acopladores. A transferência de potência ótica de uma fibra para outra(s) constitui o que chamamos de acoplador.

O acoplamento de potência entre fibras óticas pode ser dividido em duas classes distintas:

- Acoplamento total de potência entre duas fibras através da

aproximação de suas extremidades (acoplamento face-face). Este tipo de acoplamento é largamente utilizado em junções de fibras ao longo de uma linha de transmissão de sinais óticos.

- Acoplamento total ou parcial de potência ótica entre duas ou mais fibras. Os acopladores que se situam nesta classe são denominados Acopladores Direcionais de Fibras óticas, objeto de estudo desta tese.

Os acopladores direcionais podem ser construídos por três técnicas básicas. São elas:

- 1 - Ataque Químico [1],[2]
- 2 - Polimento Mecânico [3],[4]
- 3 - Fusão [5],[6],[7]

As duas primeiras técnicas consistem na remoção parcial das cascas das fibras utilizadas na construção do acoplador aproximando seus núcleos. Na terceira técnica, um processo de fusão e tracionamento das fibras faz com que os diâmetros de seus núcleos se reduzam de forma que a potência ótica passe a se propagar em um guia composto formado pelas fibras fundidas imersas em um meio externo que compõe a casca da estrutura e a interação é atribuída ao batimento de seus dois modos de ordem mais baixa (acopladores monomodo). As duas últimas técnicas serão descritas com detalhes no decorrer deste trabalho.

Desde seu desenvolvimento, a utilização dos acopladores direcionais têm sido indicada para os sistemas óticos; entretan-

to, o alto custo destes dispositivos não permitem ainda uma aplicação maciça dos mesmos. Em sistemas de comunicações, tais dispositivos podem ser utilizados como divisores de potência, divisão esta que pode ou não depender do comprimento de onda da radiação. A dependência oscilatória da potência acoplada com o comprimento de onda transmitido, sugere a utilização dos acopladores direcionais de fibra ótica em sistemas de multiplexação e desmultiplexação em comprimentos de onda (M-D) [8],[9],[10]. Estes sistemas permitem a transmissão simultânea de informações em diferentes comprimentos de onda aumentando a largura de banda efetiva da fibra. As vantagens dos sistemas M-D construídos a partir de acopladores direcionais sobre os sistemas M-D usuais (baseados em elementos discretos tais como redes de difração, lentes, etc...) está na estabilidade (menos problemas com alinhamentos) e menor perda. O uso dos acopladores como divisores de potência permite a comunicação bidirecional em uma única fibra. A substituição dos divisores de feixes atuais ("beam splitters") por acopladores direcionais permite uma maior estabilidade na operação de sensores interferométricos de fibra ótica. Assim, eles são empregados em giroscópios, hidrofones e sensores magnéticos [11]. Outras aplicações, como transmissão de sinal de TV e chaves óticas, podem ser citadas para os acopladores direcionais de fibras óticas, e de acordo com a necessidade de aplicação, estes podem ser construídos a partir de fibras monomodo e multimodo. Finalmente, uma outra aplicação recente porém bastante importante, é em sistemas de transmissões coerentes, onde o acoplador é utilizado para a mistura do sinal transmitido com o oscilador local, no receptor.

Neste trabalho, nos prenderemos ao estudo de acopladores direcionais de fibras óticas monomodo construídos pela técnica de fusão. Entretanto para efeitos de comparação e referência, descreveremos a técnica de polimento e resultados experimentais obtidos por Digonnet et al [4] serão apresentados e comentados. Modelos teóricos para ambas as técnicas serão discutidos e resultados experimentais por nós obtidos, de acopladores construídos pela técnica de fusão serão apresentados e analisados.

Iniciaremos o trabalho no capítulo II discutindo um pouco sobre a física de guiamento em guias de onda únicos e também em guias acoplados. Um comentário sobre a técnica de ataque químico é apresentado no capítulo III seguido da descrição da técnica de construção de acopladores polidos e fundidos respectivamente. No capítulo IV, descreveremos detalhadamente a montagem experimental utilizada no processo de construção de acopladores fundidos sendo que o método de fabricação destes acopladores incorporam o capítulo V. Os resultados experimentais obtidos de medidas da variação da potência acoplada com o comprimento de onda, índice de refração e comprimento da região fundida estão presentes no capítulo VI. Este capítulo, abriga também uma discussão destes resultados, bem como uma descrição da montagem experimental utilizada na medida de cada parâmetro em questão. As conclusões serão apresentadas no capítulo VII seguida das referências recorridas neste trabalho.

II.1 Física de Guiamento em Guias de Onda

Nesta seção pretendemos discutir alguns conceitos básicos da propagação de uma onda eletromagnética em guias de onda, mais especificamente em fibras óticas com índice de refração do núcleo e da casca constantes (perfil degrau). Discussões e deduções detalhadas e rigorosas fogem do interesse desta seção e para este fim sugerimos as referências [12], [13] e [14].

Uma maneira simples de visualizarmos a propagação de luz em fibras óticas é imaginarmos um raio luminoso que viaja ao longo da fibra por meio de reflexões internas na interface núcleo-casca. Entretanto, não devemos nos esquecer que a luz é uma onda eletromagnética e como tal deve ser tratada. O conceito físico de raio é o de uma onda eletromagnética em um plano no limite de seu comprimento de onda tendendo a zero ($\lambda \rightarrow 0$). Em fibras óticas nem sempre é correto assumirmos esta aproximação pois o comprimento de onda, em certos tipos de fibras, é comparável às dimensões do núcleo, principalmente no caso de fibras monomodo e desta forma, ao analisarmos a propagação de luz nestas fibras devemos levar em conta esta limitação.

As soluções das equações de Maxwell para uma fibra ótica (simetria cilíndrica) mostram que uma onda eletromagnética propa-

ga-se neste guia em de propagação discretos. O conceito de modos em fibras óticas é idêntico ao conceito de modos em uma corda vibrante ou seja, ele nos diz como um sinal ótico deve se propagar em uma fibra.

As equações de Maxwell podem ser escritas como:

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu_0\vec{H} \quad 111.1$$

$$\nabla \times \vec{H} = i\omega n^2 \epsilon_0 \vec{E} \quad 111.2$$

onde E e H são os vetores campos elétrico e magnético, ω é a frequência angular da onda eletromagnética, μ_0 e ϵ_0 são a permeabilidade magnética e constante dielétrica do vácuo respectivamente e n é dado por:

$$n^2 = (n_1^2 - n_2^2) + n_2^2 \quad 111.3$$

sendo n_1 o índice de refração do núcleo e n_2 o índice de refração do meio externo ao núcleo (casca). As equações 111.1 e 111.2 aplicadas a guias de onda tem como soluções os denominados modos HÍBRIDOS (HE e EH). Se considerarmos a condição onde o índice de refração do núcleo n_1 tem um valor próximo do índice de refração da casca n_2 (condição de guiamento fraco) ou seja, $n_1^2 - n_2^2 \ll n_1^2$, os campos transversais $E_{r,\theta}$ e $H_{r,\theta}$ passam a ser dominantes frente aos campos axiais E_z e H_z de forma que as soluções das equações 111.1 e 111.2, nesta condição, podem ser expressas aproximadamente por um conjunto de modos denominados LP (linearmente polarizados) onde as linhas de campos elétrico e magnético são paralelas

e mutuamente perpendiculares ao longo de toda secção reta da fibra. Estes modos são combinações de grupos de modos EH e HE cujas constantes de propagação são muito próximas. Assim, deve ficar claro que as soluções LP são aproximadas e que as soluções exatas das equações de Maxwell para fibras óticas são dadas por modos híbridos EH e HE. As vantagens de assumirmos a condição de guiamento fraco (o que geralmente é correto no caso de fibras óticas) é que ela permite obtermos expressões simples para a distribuição de campos modais. Desde que os campos nesta condição são fundamentalmente transversais, é conveniente expressá-los em coordenadas cartesianas. Desta forma [14]:

$$\begin{bmatrix} E_y = E_1 \\ \\ H_x = H_1 \end{bmatrix} \times J_k(U_{k,m} r) \cos(k\theta) \quad r < \rho \quad 111.4$$

onde ρ é o raio do núcleo, J_k são as funções de Bessel de ordem k , E_1 e H_1 são campos constantes (independentes de x e y) e k e m são inteiros. Estas soluções representam soluções no núcleo da fibra. Para a casca temos:

$$\begin{bmatrix} E_y = E_2 \\ \\ H_x = H_2 \end{bmatrix} \times K_k(W_{k,m} r) \cos(k\theta) \quad r > \rho \quad 111.5$$

para E_2 e H_2 constantes (independentes de x e y) e K_k as funções de Hankel modificadas de ordem k . Os parâmetros U_{km}/ρ e W_{km}/ρ

são as constantes de propagação transversais dos modos k, m no núcleo e casca respectivamente e dados por:

$$U_{k,m}^2 = \left(\frac{2\pi n_1}{\lambda} \right)^2 \beta_{k,m}^2 = (\beta_1^2 - \beta_{k,m}^2) \quad 111.6$$

$$W_{k,m}^2 = \beta_{k,m}^2 - \left(\frac{2\pi n_2}{\lambda} \right)^2 = (\beta_{k,m}^2 - \beta_2^2) \quad 111.7$$

onde β_{km} é a constante de propagação axial dos modos k, m . Desde que k e m são inteiros, β_{km} pode assumir somente valores discretos. Esta condição surge da imposição de que em fibras óticas os campos tangenciais (E_z , E_θ e H_z , H_θ) devem ser contínuos em $r=\rho$.

Para valores de r tal que $r > \rho$ e $W_{km} r \gg 1$ podemos utilizar a expressão assintótica para $K_k(W_{k,m} r)$ dada por:

$$K(W_{km} r) = \frac{\exp(-W_{km} r)}{(W_{km} r)^{1/2}} \quad W_{km} r \gg 1 \quad 111.8$$

na equação 111.5 para obtermos:

$$\begin{bmatrix} E_y = E_2 \\ H_x = H_2 \end{bmatrix} \times \frac{\exp(-W_{km} r) \cos(k\theta)}{(W_{km} r)^{1/2}} \quad W_{km} r \gg 1 \quad 111.9$$

Isto implica que os campos elétrico e magnético decaem exponencialmente na casca das fibras. A estes campos denominaremos cam-

pos evanescentes.

Podemos a partir das equações 111.6 e 111.7 definirmos um parâmetro V normalmente denominado como frequência normalizada. Este parâmetro determina o número de modos que uma determinada fibra pode suportar e é escrito como:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = (U_{km}^2 + W_{km}^2)^{1/2} \quad 111.10$$

A constante de propagação dos modos LP pode ser convenientemente escrita de forma normalizada. Esta normalização facilita estudarmos a variação da mesma com a frequência normalizada definida anteriormente. Assim, definiremos a constante de propagação normalizada como:

$$b_{k,m} = \frac{\beta_{k,m}^2 - \beta_2^2}{\beta_1^2 - \beta_2^2} = \beta_1^2 - \frac{U_{km}^2}{V^2} = \frac{W_{km}^2}{V^2} \quad 111.11$$

A curva correspondente à equação 111.11 é mostrada na figura 111.1. Vê-se claramente nesta figura que os modos são discretos e que para determinados valores de V eles não se propagam indicando assim a existência de um valor de corte V_c para estes modos. Os valores de V_c são diferentes para modos distintos e para o modo fundamental LP01 o corte se dá em $V_c=0$ o que implica que o modo fundamental não possui cortes.

A condição de corte de cada modo pode ser determinada a partir da equação de autovalor obtida quando aplicamos a condição

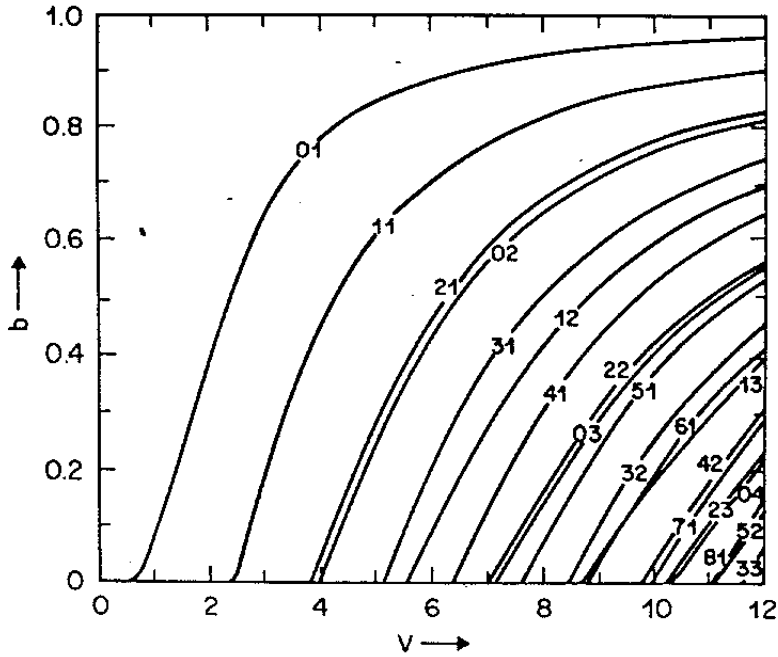


Fig. III.1 - Constante de propagação normalizada de vários modos LP como função de V (14).

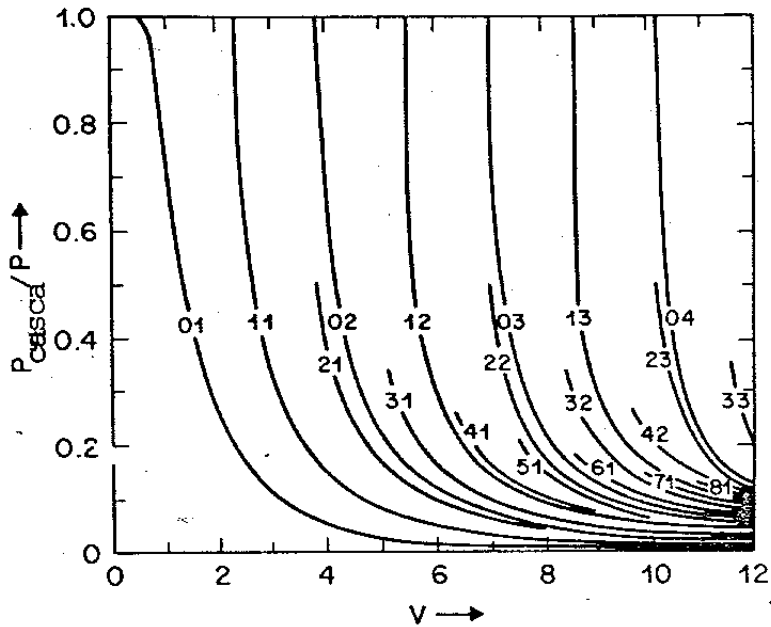


Fig. III.2 - Razão entre a potência na casca e a potência total no núcleo de uma fibra como função de V (14).

de continuidade dos campos \vec{E} e \vec{H} em $r = \rho$. Esta condição leva-nos em geral a uma equação de autovalor complicada entretanto, na condição de guiamento fraco, esta equação assume uma expressão simples e para os modos LP tem a forma [14],[15]:

$$U_{k,m} \frac{J_{k-1}(U_{km})}{J_k(U_{km})} = -W_{k,m} \frac{K_{k-1}(W_{km})}{K_k(W_{km})} \quad 111.12$$

A condição de corte é obtida quando $W = 0$ o que implica em:

$$J_{k-1}(U_{km}) = 0 \quad 111.13$$

Ou seja os valores de corte dos modos k,m podem ser obtidos de U_{km} os quais são raízes das funções de Bessel J_{k-1} . As soluções de 111.13 são encontradas tabeladas na literatura [16].

Uma das vantagens da análise modal sobre a análise geométrica ou de raios, é que ela permite calcularmos a distribuição de densidade de potência na fibra para cada modo por meio do cálculo do vetor de Poynting $\vec{E} \times \vec{H}$ para os campos transversos. Torna-se então possível determinar a fração da potência total que é guiada em cada modo. O resultado destes cálculos na aproximação de guiamento fraco é mostrado na figura 111.2 [14],[15],[17]. Este tipo de resultado é importante para a análise de acopladores pois muitas vezes é a potência da casca que se acopla com uma outra fibra que esteja próxima.

A análise teórica feita aqui serve de embasamento para um melhor entendimento da física quando dois guias se aproximam, como feito a seguir.

11.2 Física de Guiamento em Guias Acoplados

Os acopladores direcionais de fibras óticas monomodo construídos pela técnica de polimento mecânico e fusão, exibem comportamentos distintos no que tange ao processo pelo qual se induz a interação entre fibras óticas. Em acopladores construídos pela técnica de polimento, o acoplamento se dá entre núcleos distintos e através do batimento dos modos de baixa ordem do sistema composto, constituídos como uma combinação linear das distribuições de campo dos modos fundamentais Ψ_1 e Ψ_2 dos núcleos independentes. A excitação do segundo núcleo é resultado do decaimento exponencial do campo eletromagnético em direções perpendiculares à direção de propagação (excitação devido ao campo evanescente) onde a potência ótica de uma fibra excita a outra devido a aproximação entre seus núcleos. Na técnica de fusão, o acoplamento ótico entre duas fibras também ocorre através do batimento dos dois modos de baixa ordem (constituídos de maneira idêntica a descrita anteriormente) mas de uma estrutura composta formada pela fusão e tracionamento das fibras. Assim, nas duas técnicas, o processo físico pelo qual ocorre a transferência de potência entre as fibras é fundamentalmente o mesmo, embora os processos pelos quais se faz com que estes núcleos interajam sejam distintos.

As distribuições de campo dos modos fundamentais de duas fibras independentes podem ser determinadas de maneira exata re-

solvendo-se a equação de onda escalar sujeita a um conjunto de condições de contorno (ver seção 11.1). Estas distribuições tem a forma mostrada na figura 112.1 [12].

Para um sistema de duas fibras que interagem, os campos resultantes não podem ser determinados de maneira exata e, um método perturbativo é aplicado à equação de onda para se obter resultados aproximados para o sistema em interação.

A solução analítica aproximada para o acoplamento entre fibras óticas pode ser encontrada a partir das equações de Maxwell.

Sejam duas fibras idênticas que interagem separadas por uma distância d entre os centros de seus núcleos como mostrado na figura 112.2. As equações de Maxwell para o sistema composto podem ser escritas de forma semelhante à dada pelas equações 111.1 e 111.2. Assim:

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu_0\vec{H} \quad 112.1$$

$$\nabla \times \vec{H} = i\omega n^2\epsilon_0\vec{E} \quad 112.2$$

onde todos os parâmetros são definidos de maneira idêntica ao referido nas equações citadas. Os campos elétrico e magnético não perturbados de cada núcleo são escritos como:

$$\vec{E}_p = E_p \exp[i(\omega t - \beta_p z)] \quad p = 1, 2 \quad 112.3$$

$$\vec{H}_p = H_p \exp[i(\omega t - \beta_p z)] \quad 112.4$$

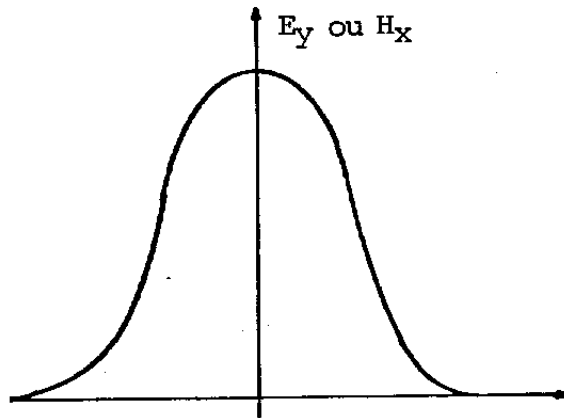


Fig. II2.1 - Distribuição de campo do modo fundamental de uma fibra.

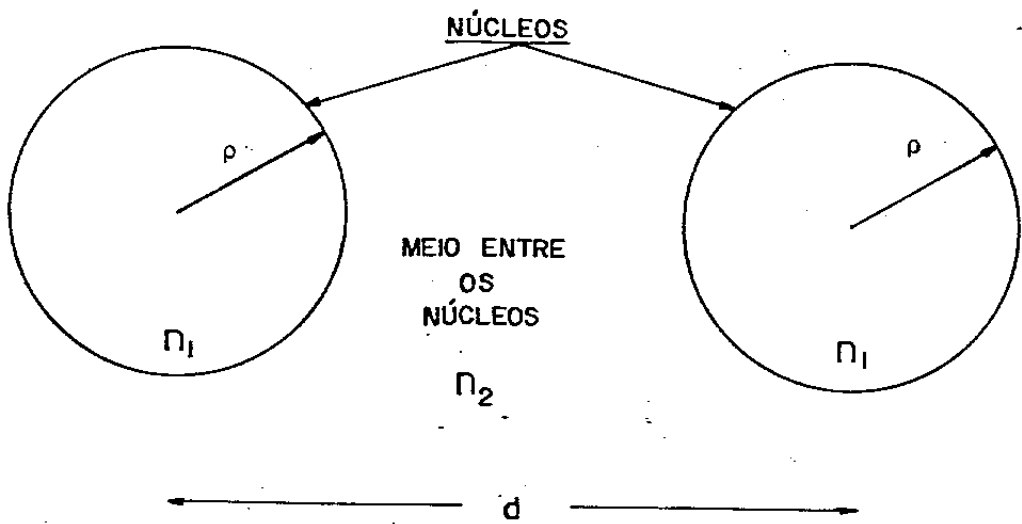


Fig. II2.2 - Fibras interagindo separadas por uma distância d .

E_p e H_p são independentes de z e β_p é a p -ésima constante de propagação modal. Nossa aproximação consiste em supormos que os campos totais do sistema em interação possam ser escritos como uma combinação linear dos campos independentes. Desta maneira temos:

$$\vec{E} = A_1(z) \vec{E}_1 + A_2(z) \vec{E}_2 \quad 112.5$$

$$\vec{H} = A_1(z) \vec{H}_1 + A_2(z) \vec{H}_2 \quad 112.6$$

Por substituição das equações 112.5 e 112.6 em 112.1 e 112.2, assumindo $A_p(z)$ como $A_p(z) = a_p(z) \exp[-i(\beta_p z)]$ e após alguma álgebra obtemos:

$$\frac{da_1(z)}{dz} = C_{12}(z) \exp[+i \Delta\beta z] a_2(z) \quad 112.7$$

$$\frac{da_2(z)}{dz} = C_{21}(z) \exp[-i \Delta\beta z] a_1(z) \quad 112.8$$

onde $C_{12}(z)$ e $C_{21}(z)$ são os coeficientes de acoplamento do núcleo 1 em relação ao núcleo 2 e do núcleo 2 em relação ao núcleo 1 respectivamente. Como assumimos que as fibras são idênticas, pode-se mostrar [12] que $C_{12} = C_{21}^* = C$ (coeficiente de acoplamento próprio do sistema). Estas equações podem ser facilmente desacopladas por diferenciação. Se assumirmos a interação somente entre modos cujas constantes de propagação são iguais ($\beta_1 = \beta_2 \Rightarrow \Delta\beta=0$) e o coeficiente de acoplamento é independente de z (fibras para-

lelas), as soluções obtidas para 112.8 e 112.9 depois de reagrupadas para deixar explícito os valores de $a_1(z)$ e $a_2(z)$ em $z = 0$ são:

$$a_1(z) = \frac{1}{2} \left\{ a_1(0) [e^{iCz} + e^{-iCz}] + a_2(0) [e^{iCz} - e^{-iCz}] \right\} e^{i\beta z} \quad 112.9$$

$$a_2(z) = \frac{1}{2} \left\{ a_2(0) [e^{iCz} + e^{-iCz}] + a_1(0) [e^{iCz} - e^{-iCz}] \right\} e^{i\beta z} \quad 112.10$$

Estas equações deixam claro que a nova solução para o sistema em interação é composto pela superposição de dois modos normais Ψ_1 e Ψ_2 . Desta forma, o método perturbativo leva-nos a:

$$\Psi_+ = \Psi_1 + \Psi_2$$

$$\Psi_- = \Psi_1 - \Psi_2$$

cujas constantes de propagação são dadas por:

$$\beta_+ = \beta + C$$

$$\beta_- = \beta - C$$

As distribuições de campo destes modos são mostradas na figura 112.3.

Apesar de Ψ_1 e Ψ_2 não possuírem cortes, pode-se mostrar [18],[19] que Ψ_+ não possui corte propagando-se para todo valor de V (frequência normalizada) e que Ψ_- possui um valor finito de V para o qual ele não se propaga, irradiando-se para a casca.

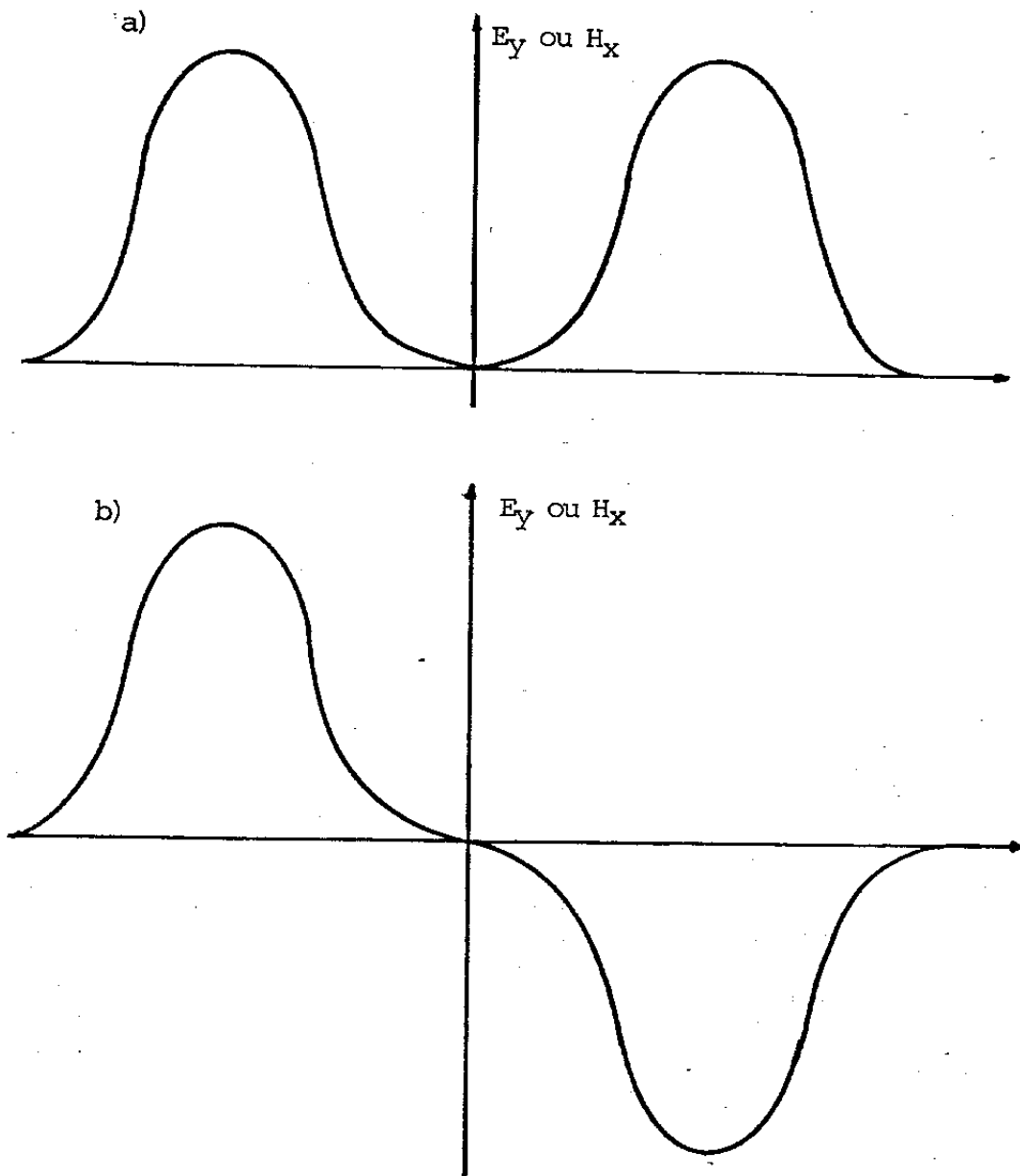


Fig. II2.3 - Distribuição de campo de duas fibras em interação. a) Campo simétrico
b) Campo anti-simétrico.

Os valores de V que cortam o modo anti-simétrico ψ^- são calculados na literatura [18] e possuem uma expressão analítica simples dada por:

$$V = \frac{8}{[1 + 4 \times \ln(d/\rho)]} \quad 112.11$$

sendo (d/ρ) a distância normalizada entre os eixos das fibras. O que foi mencionado leva-nos a concluir que acoplamentos entre núcleos só ocorrem sem grandes perdas, se trabalharmos com valores de V acima do valor de corte de ψ^- , evitando assim que este modo irradie-se para a casca e toda potência nele contida se perca.

Assumindo como condições iniciais a excitação do núcleo 1 com a potência normalizada 1 ($a_1(z)=1$) e do núcleo 2 com a potência zero(0) ($a_2(z)=0$) podemos, a partir das equações 112.9 e 112.10 mostrar que:

$$P_1(z) = |a_1(z)|^2 = \cos^2(Cz) \quad 112.12$$

$$P_2(z) = |a_2(z)|^2 = \sin^2(Cz) \quad 112.13$$

Observamos com isto que a potência oscila entre os núcleos 1 e 2 ao longo do comprimento de interação. O comprimento segundo o qual a potência máxima é transferida entre os núcleos é denominado comprimento de acoplamento e definido como:

$$l = \frac{\pi}{2C} \quad 112.14$$

O coeficiente de acoplamento C é em geral difícil de ser calculado, mas assume uma forma analítica simples se algumas aproximações são consideradas. Para guias idênticos cuja condição de guiamento fraco é obedecida e para os quais somente o modo fundamental LP01 está sendo excitado como é comum em sistemas que utilizam fibras monomodo, o coeficiente de acoplamento é escrito como,

$$C = \frac{\delta U^2 K_0[W(d/\rho)]}{\rho V^3 K_1^2(W)} \quad 11.15$$

onde:

$$\delta = 1 - (n_2/n_1)^2 \quad \delta \ll 1$$

K_0, K_1 = Funções de Hankel modificadas de ordem 0 e 1

V = frequência normalizada $= (U^2 + W^2)^{1/2}$

ρ = raio do núcleo

U, W = constante de propagação transversal do modo LP01 no núcleo e casca respectivamente

d = distância entre os eixos dos núcleos

λ = comprimento de onda da radiação eletromagnética

Os parâmetros U e W são relacionados através de equação de auto-valor,

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

onde J_k são as funções de Bessel de ordem k .

Utilizando as expressões assintóticas para K_0 e K_1 podemos escrever,

$$C = \frac{\sqrt{\delta} U^2}{\rho V^3} \left(\frac{2 W \delta}{\pi \rho d} \right)^{1/2} e^{-W \left(\frac{d}{\rho} - 2 \right)} \quad 112.16$$

Esta expressão é aproximada e só é utilizada em situações onde o acoplamento ocorre entre núcleos distintos. Além disto, ao tomarmos valores assintóticos para K_0 e K_1 admitimos $W \gg 1$ o que limita a validade da aproximação para comprimentos de onda pequenos. É necessário salientar que toda a teoria desenvolvida nesta seção tem como hipótese a condição de que a geometria dos núcleos não se altera substancialmente e a excitação do segundo núcleo ocorre através do campo evanescente.

Com o auxílio das equações 112.12, 112.13 e 112.15 podemos prever o comportamento das potências nos núcleos 1 e 2 em função do comprimento de onda e do espaçamento entre os núcleos. Assim, ao final de um determinado comprimento de interação, as potências nos núcleos 1 e 2 devem oscilar quando o comprimento de onda de excitação varia, indicando desta forma, uma possível utilização de tal propriedade para a obtenção de dispositivos de multiplexação e desmultiplexação, como mostra a figura 112.4. Nesta figura, os parâmetros foram otimizados para uma utilização destes dispositivos na região do visível. O mesmo comportamento oscilatório é exibido por P_1 e P_2 quando varia-se o espaçamento d .

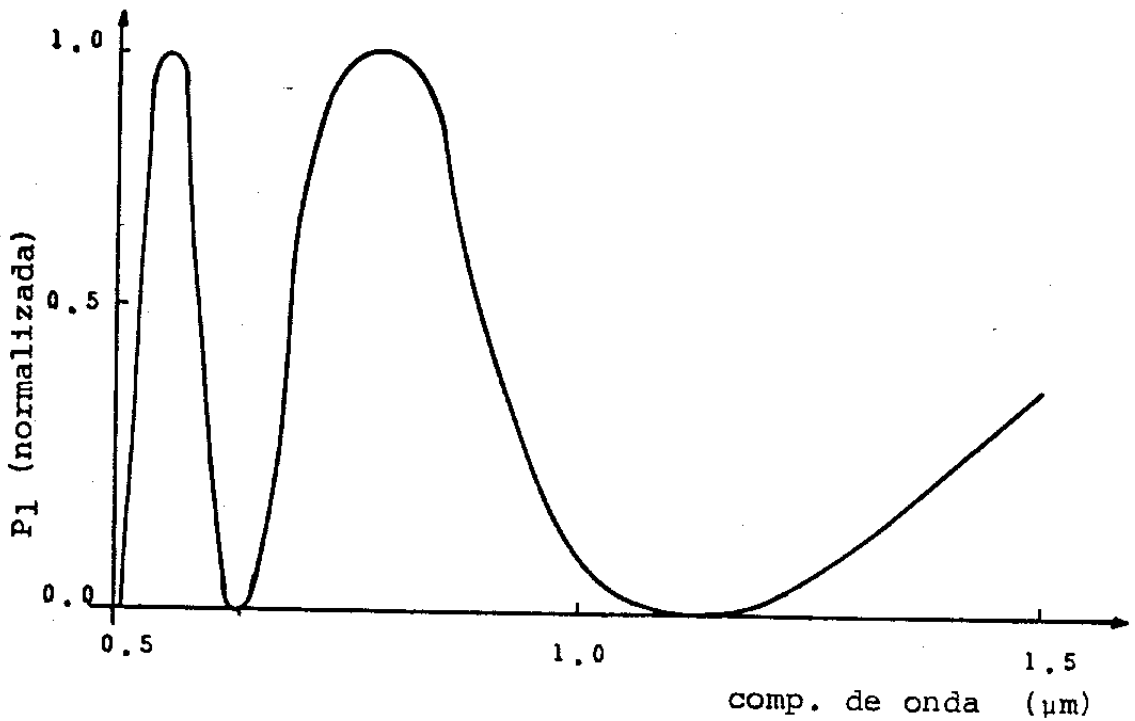


Fig. II2.4 - Potência normalizada P_1 em função do comprimento de onda. $\rho=4 \mu\text{m}$, $n_1=1.46$, $n_2=1.458$ e $d=10 \mu\text{m}$

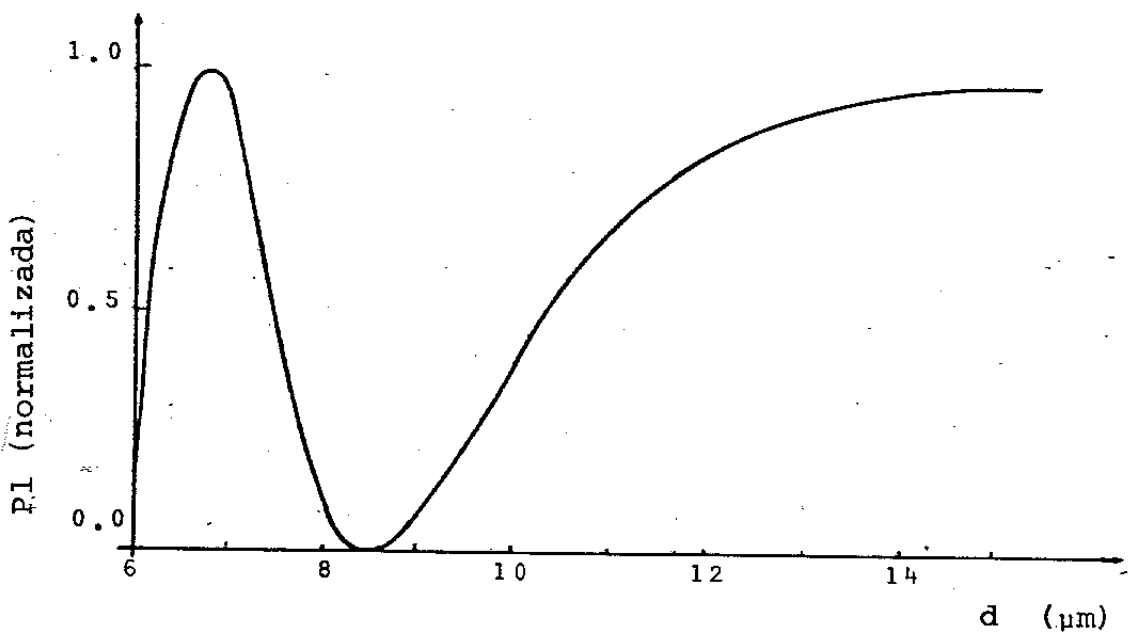


Fig. II2.5 - Variação da potência P_1 com o espaçamento d entre as fibras. $n_1=1.46$, $n_2=1.458$, $\rho=3 \mu\text{m}$, $\lambda=0.85 \mu\text{m}$ e $z=1500 \mu\text{m}$.

Entretanto, existem valores para d acima do qual nenhuma interação é possível entre os núcleos. Este comportamento é mostrado na figura 112.5.

III TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO

Dois processos básicos são utilizados para fazer com que duas ou mais fibras interajam. O primeiro deles consiste em aproximar os núcleos dos guias logo após tenha sido removido parte da casca dos mesmos. Segundo o que foi dito na seção 11.1, os campos E e H decaem exponencialmente na direção radial para valores de $r > \rho$ (campo evanescente). Com isto, torna-se possível a excitação de várias fibras quando seus núcleos são postos próximos e uma delas (ou algumas) é (são) inicialmente excitada(s). Este processo é utilizado pelas técnicas de ataque químico e polimento. A segunda maneira para induzir-se interação entre fibras é obtida pela diminuição gradativa dos diâmetros de seus núcleos de modo que a luz guiada em um (ou alguns) deles se espalhe para as cascas que estão em contato, favorecendo a interação entre as fibras. O processo pelo qual se promove a redução dos núcleos é basicamente o de fusão em estrutura bicônica, o qual consta da ação simultânea de fusão e tracionamento das fibras.

O objetivo desta seção é descrever estas três técnicas bem como apresentar estudos sobre modelos teóricos para acopladores construídos pelas técnicas de fusão e polimento.

Esta técnica, proposta por Sheem e Giallorenzi [1] , consiste em retirar-se parte da casca de duas fibras por ação química. O acoplamento é feito aproximando-as.

O processo de construção destes acopladores inicia-se com a retirada do revestimento de plástico de duas fibras em um comprimento de aproximadamente 2.5 cm. Estas fibras são então introduzidas em um recipiente por duas extremidades denominadas A e B. Na extremidade A as fibras são coladas no recipiente enquanto na extremidade B elas são fixadas em uma peça chamada Atuador(M), o qual permite enrolar-se as fibras fazendo com isto um controle sobre a distância entre seus núcleos. O esquema básico de construção destes acopladores é mostrado na figura III.1. Nesta figura, pode-se ver ainda duas entradas denominadas 1 e 2. Através da entrada 1, introduz-se o agente químico HF:NH₄F (1:4) que corrói a superfície do vidro que compõe a casca das fibras e, por meio de um estudo do tempo de ação deste agente pode-se estimar a razão entre os diâmetros do núcleo e da casca ao final de um tempo de ataque químico, sabendo-se assim a distância a que nos encontramos do núcleo. Um fator que interfere no controle deste tempo é a saturação dos agentes com o decorrer do tempo de ação do mesmo; mas, isto pode ser evitado por meio da circulação contínua do agente através de um reservatório. Quando o diâmetro das fibras for reduzido até ao valor desejado, o agente é drenado pela entrada 2 e simultaneamente, pela porta 1, insere-se água. A inserção de água no sistema tem por finalidade retirar o ácido

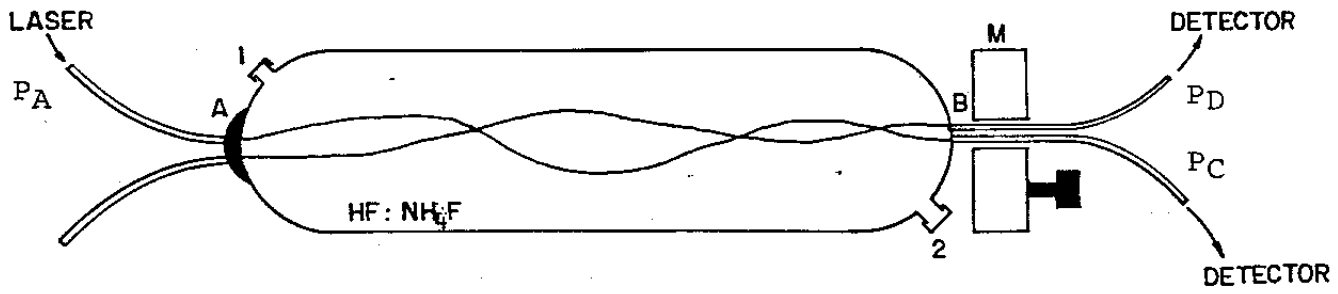


Fig. IIII.1 - Esquema básico de construção de acopladores pela técnica de ataque químico (1).

que permanece na superfície da casca evitando assim a alteração do diâmetro final das fibras. Ao término do processo de lavagem um óleo com índice de refração próximo ao do núcleo das fibras é introduzido pela extremidade 1. O monitoramento do acoplamento é estudado durante o processo de ataque químico lançando-se luz de um laser em uma das extremidades de uma das fibras (denominada PA), detectando a potência nas extremidades opostas à de lançamento (denominadas PC e PD). Uma vez que o índice de refração do ácido é aproximadamente 1.37 sendo desta forma bem menor que o índice de refração do núcleo (1.456), espera-se que a eficiência de acoplamento altere de maneira considerável quando da sua substituição pelo óleo. A eficiência de acoplamento pode ser ajustada de 0 a 100% através do atuador M. Resultados experimentais obtidos por Sheem e Giallorenzi [1] e Liao e Boyd [2] mostram que estes dispositivos são altamente sensíveis à variação de temperatura do meio externo e, apresentam perdas pouco menores que 1dB.

Esta técnica, apesar de conceitualmente simples, possui um procedimento experimental bastante complexo e os parâmetros envolvidos são de difícil controle. O surgimento de técnicas com procedimentos experimentais mais simples contribuiu para que esta técnica fosse praticamente abandonada de tal forma que, atualmente somente as técnicas de fusão e polimento tem sido aplicadas ao estudo de acopladores.

2.1 Descrição Técnica

Esta técnica consiste em colar uma fibra ótica em um bloco de quartzo onde na região central é anteriormente feito uma fenda com um raio de curvatura R [3]. A fibra é colada ao longo do raio de curvatura como ilustrado na figura 2.1.1. O conjunto bloco-fibra é então cuidadosamente polido até se retirar uma quantidade desejada da casca da mesma. A função do raio de curvatura é dar uma melhor estabilidade mecânica durante o processo de polimento e controlar o comprimento de interação entre as fibras. O acoplamento é obtido sobrepondo-se dois destes blocos de forma a permitir a interação entre seus núcleos. Este procedimento é ilustrado na figura 2.1.2. As superfícies dos blocos que são postas em contato devem estar perfeitamente limpas de forma que a observação da figura de interferência ótica formada pela camada de ar existente entre eles torna-se um procedimento necessário. Isto nos dá informação sobre o estado de limpeza e a qualidade do polimento das superfícies. Quando observa-se apenas um anel de interferência, um óleo cujo índice de refração tem um valor próximo ou idêntico ao da casca das fibras usadas na confecção do acoplador é inserido entre os blocos por ação capilar. A caracterização do acoplador é feita em várias fases do polimento lançando-se luz em uma das fibras que compõe o acoplador e detectando-se as potências nas extremidades opostas à de excitação. Em sua

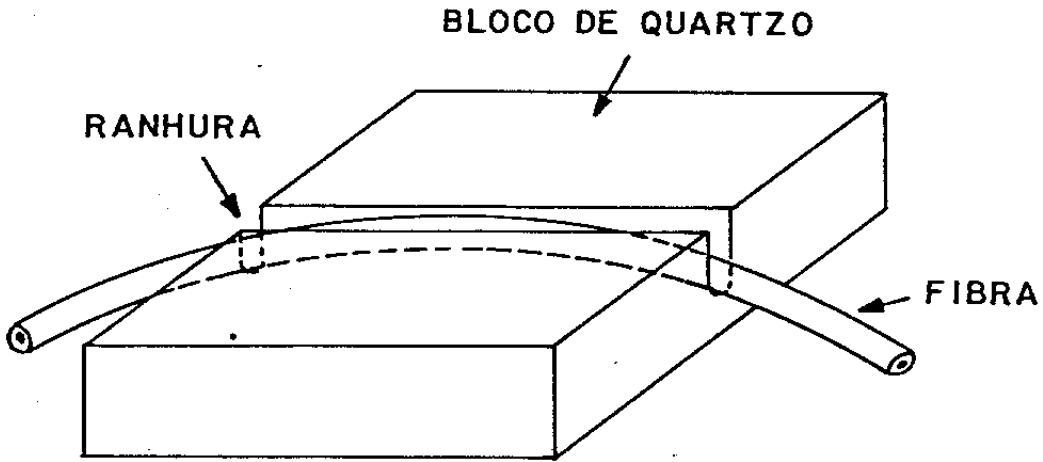


Fig. 2.1.1 - Substrato de quartzo pronto para ser polido (4).

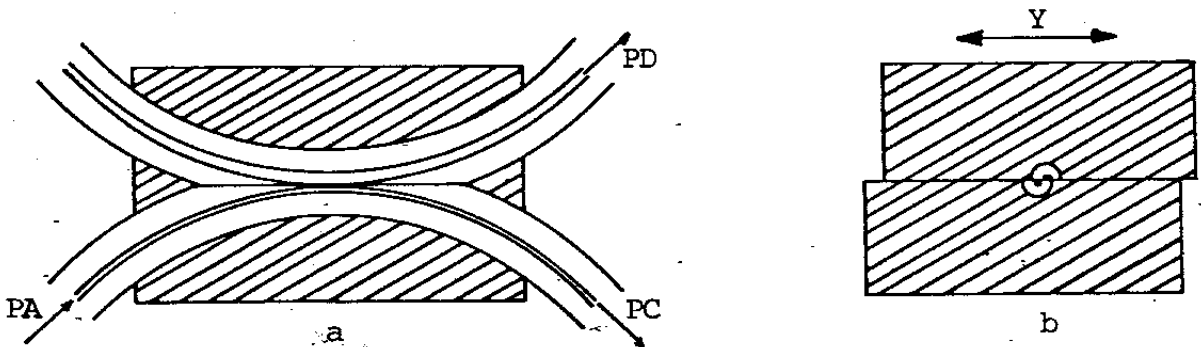


Fig. 2.1.2 - Substratos polidos e sobrepostos. a) Seção longitudinal, b) Seção transversal (4).

configuração final, os blocos de quartzo são fixados em um substrato de modo que com o auxílio de microposicionadores um ajuste relativo entre os núcleos possa ser efetuado, deslocando-se um dos blocos perpendicularmente ao eixo das fibras. Este ajuste, como veremos adiante, permite um controle preciso da potência acoplada entre os núcleos.

Durante o processo de polimento, é necessário que se faça um controle da penetração M na casca das fibras. Esta penetração pode ser determinada medindo-se o comprimento (ao longo do eixo das fibras) da figura formada pela intersecção do plano de polimento com a casca das fibras. Uma expressão analítica pode ser facilmente obtida para M a partir da geometria do acoplador dentro de uma aproximação parabólica ($R \gg z$) [18]; Assim:

$$M = \frac{z^2}{8R}$$

2.2 Modelo Teórico

As fibras ao serem coladas nos blocos de quartzo assumem uma geometria cuja distância entre os centros dos núcleos varia ao longo da direção de propagação z . A figura 2.2.1 mostra esta situação. A potência de excitação é lançada em $(-z)$ e analisada em $(+z)$ sendo que em $z=0$ a aproximação entre os núcleos é máxima. Da geometria da figura 2.2.1 podemos, utilizando uma aproximação parabólica ($z \ll R$), mostrar que:

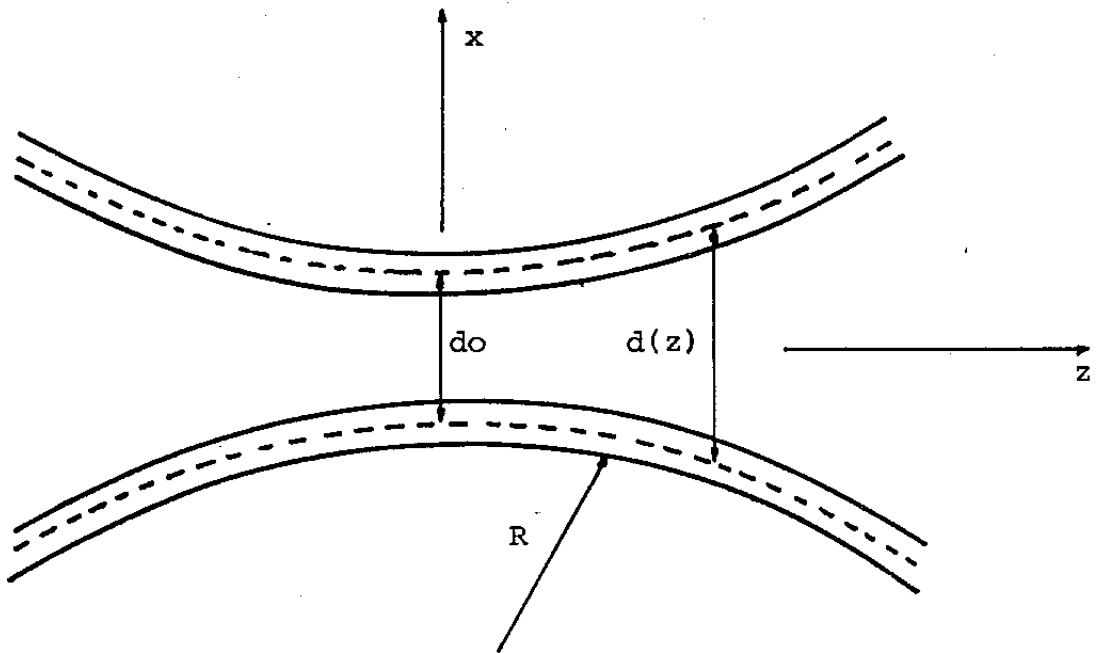


Fig. 2.2.1 - Geometria dos núcleos fixados em dois substratos sobrepostos (4).

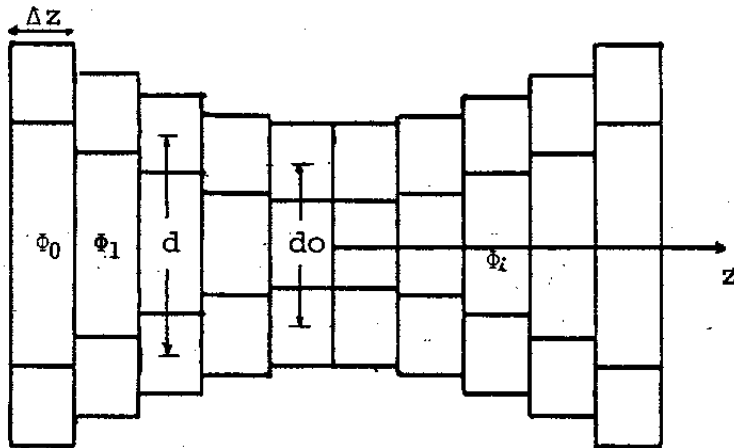


Fig. 2.2.2 - Núcleos acoplados analisados como uma série de secções paralelas (21).

$$d(z) = \left[\left(d_0 + \frac{z^2}{R} \right)^2 + Y^2 \right]^{1/2} \quad z \ll R \quad 2.2.1$$

Sendo Y o deslocamento perpendicular ao eixo das fibras e $d(z)$, d_0 e z como definidos na figura 2.2.1. Uma vez que a distancia entre os núcleos é uma função de z , espera-se que o coeficiente de acoplamento C também o seja, e de acordo com a geometria do acoplador espera-se ainda que exista um comprimento ao longo de z a partir do qual o sistema se comporta como um sistema de núcleos independentes. Este comprimento denomina-se comprimento de interação (L).

As equações 11.7 e 11.8 podem ser facilmente desacopladas por diferenciação e cujas soluções com $\Delta\beta=0$ e tomando as mesmas condições de contorno para $a_1(z)$ e $a_2(z)$ em $z=0$ descritas na seção 11.2 são [20]:

$$P_1(z) = \cos^2(\theta(z)) \quad 2.2.2$$

$$P_2(z) = \sin^2(\theta(z)) \quad 2.2.3$$

onde;

$$\theta(z) = \int_0^z C(z) dz$$

Admitindo que todas as propriedades materiais e dimensões do guia exceto a separação entre eles, são independentes de z e ainda que esta separação varia suavemente com z podemos convenientemente escrever [20]:

$$C(z) = C(0)F(z)$$

2.2.4

com $C(0) = C(z=0) = C_0$ e $F(z)$ uma função de z .

O modelo teórico para o acoplador consiste em supormos que o mesmo possa ser modelado como uma série de pequenas secções de comprimento Δz cuja separação entre os centros dos núcleos para cada secção permanece constante. Os núcleos são supostos estarem embebidos em uma casca infinita. A figura 2.2.2 ilustra este modelo [21],[22]. O coeficiente de acoplamento ao longo de cada secção permanece constante e o acoplamento entre duas secções O_i quaisquer é feito obedecendo a equação 112.17. Desde que podemos fazer o número de secções tão grande quanto se queira, é conveniente escrevermos [10]:

$$C_0L = \int_{-\infty}^{+\infty} C(z) dz \quad 2.2.5$$

onde $\pm\infty$ indica as distâncias onde o sistema inicia e termina a interação. A equação 2.2.2 representa uma média de $C(z)$ ao longo da região de interação. Utilizando-se a expressão para $C(z)$ dada pela equação 112.17 (com $d(z)$ dada pela equação 2.2.1) podemos calcular o valor do comprimento de interação L . Assim:

$$L = \sqrt{\frac{\Gamma R \rho}{W}} \quad z \ll R$$

Desde que o acoplador no nosso modelo é equivalente a um acopla-

dor de fibras paralelas, os resultados teóricos obtidos na seção 11.2 podem ser usados para estudarmos o comportamento da potência acoplada com os diversos parâmetros físicos e geométricos dos acopladores construídos pela técnica de polimento. Desta forma, podemos escrever para as potências PC e PD na saída do acoplador (ver figura 3.1.2).

$$PC = \cos^2(CoL) \quad 2.2.6$$

$$PD = \text{sen}^2(CoL) \quad 2.2.7$$

Estudos teóricos do comportamento da variação da potência acoplada em função do comprimento de onda e do espaçamento d entre as fibras foram feitos na seção 11.2 e ambos os resultados estão de acordo com os resultados experimentais obtidos por Shaw e Digonnet [4],[10]. Estes resultados bem como suas previsões teóricas usando o modelo descrito nesta seção são mostrados nas figuras 2.2.3 e 2.2.4. Medidas experimentais da variação da potência acoplada com o deslocamento (Y) perpendicular ao eixo das fibras mostram a possibilidade, nestes acopladores, de se ajustar as potências de saída a um valor desejado. Esta curva é mostrada na figura 2.2.5. A concordância dos pontos experimentais com as curvas teóricas demonstram a validade do modelo.

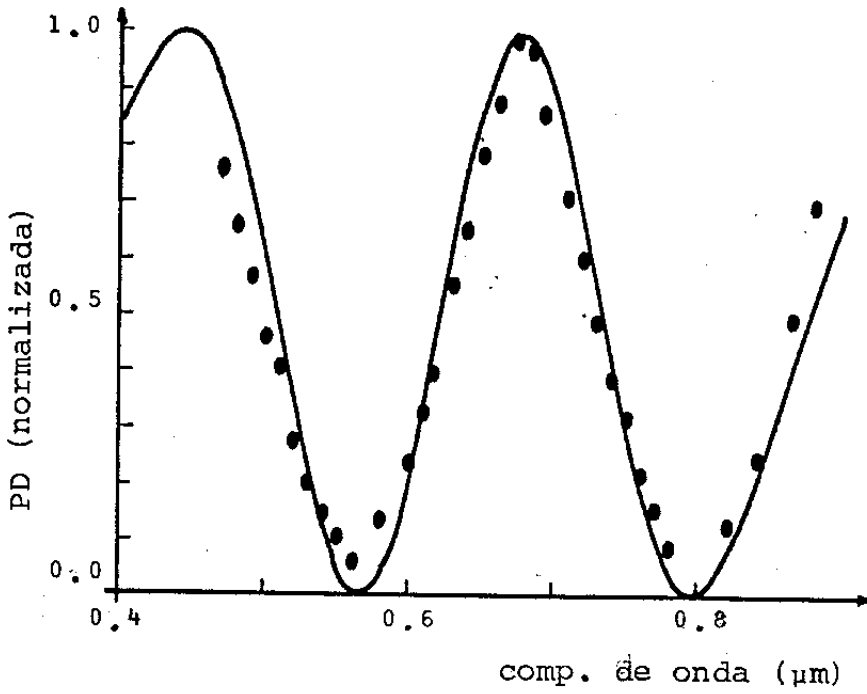


Fig. 2.2.3 - Variação da potência acoplada PD com o comprimento de onda (10).

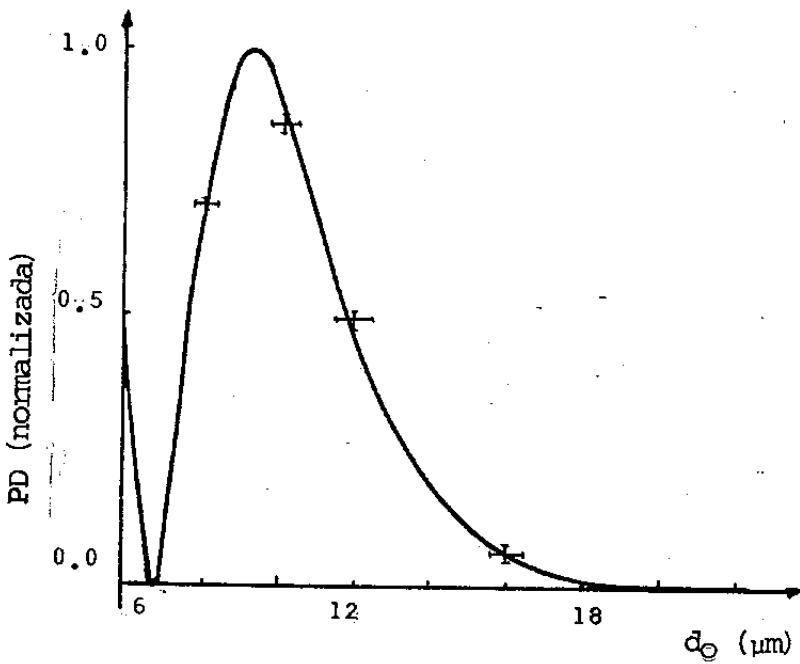


Fig. 2.2.4 - Variação da potência acoplada PD com d_0 . $\rho=3.0 \mu\text{m}$, $n_1=1.458$, $n_2=1.4551$, $R=25 \text{ cm}$ e $\lambda=1.15 \mu\text{m}$ (4).

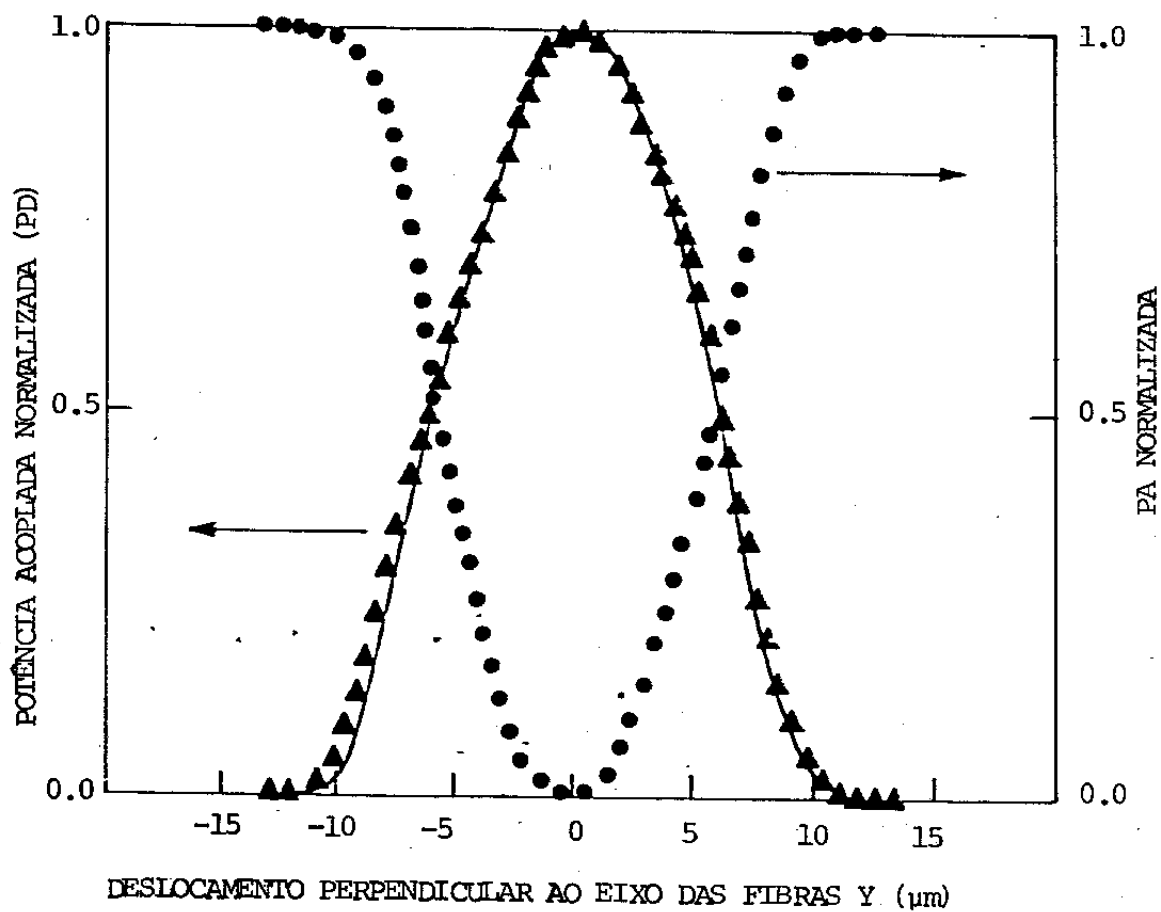


Fig. 2.2.5 - Curva experimental com o correspondente ajuste teórico para um acoplador com $\rho=2 \mu\text{m}$, $n_1=1.460$ e $\lambda=514.5 \text{ nm}$. Os parâmetros de ajuste são $d_0=5.24 \mu\text{m}$ e $n_2=1.4569$ (4).

3.1 Descrição Básica da Técnica

A técnica de construção de acopladores por fusão é bastante simples, sendo portanto a mais utilizada no estudo de acopladores direcionais de fibras óticas. Esta técnica foi primeiramente proposta por Kawasaki e Hill [5] e utilizada para a obtenção de acopladores multimodo. Muito recentemente, ela foi empregada por Kawasaki et al [6] na construção de acopladores monomodo. A diferença na construção destes acopladores está no alinhamento mais rigoroso do sistema para os acopladores monomodo. A técnica empregada neste trabalho é fundamentalmente a mesma utilizada por Kawasaki et al [6]. Nesta técnica, duas ou mais fibras são fundidas e tracionadas simultaneamente. Este processo simultâneo de fusão-tração faz com que a estrutura final resultante tenha um formato bicônico.

O primeiro passo para se fundir duas ou mais fibras em estrutura bicônica consiste em retirar-se o revestimento primário das mesmas por um processo de ataque químico na região a ser fundida. Em seguida, as superfícies expostas são cuidadosamente limpas (minimizar a fusão de impurezas) para que a fusão de impurezas não comprometa a homogeneidade da estrutura, criando focos de espalhamento de luz ao longo da região fundida. Depois de limpas, as fibras são então fixadas ao sistema de tração e alinhadas.

Feito isto, as mesmas são torcidas com uma ou duas voltas para que durante o processo de fusão-tração se mantenham em contato físico, quando então um sistema de microchamas é acionado simultaneamente ao sistema de tração fazendo com que as fibras se fundam biconicamente. O monitoramento da potência acoplada é feito durante o processo de fusão-tração. As situações das fibras antes e depois da fusão são mostradas nas figuras 3.1.1 e 3.1.2. Uma descrição detalhada do procedimento experimental necessário ao estudo destes acopladores e do arranjo experimental necessário para implementar sua construção será dada em capítulos subsequentes.

3.2 Aspectos Teóricos

Foi visto na seção anterior que em acopladores construídos pela técnica de polimento, a interação entre os núcleos ocorre por meio do campo evanescente, contudo esta teoria não é suficiente para explicar a transferência de potência em acopladores fabricados por fusão. Ocorre que nesta técnica, o processo de fusão-tração reduz a seção reta das fibras fazendo com que ao longo do comprimento da região fundida a potência lançada no modo fundamental da fibra seja continuamente despreendida para a casca. Assim, espera-se que a partir de determinado valor do raio do núcleo (que se reduz devido ao tracionamento) grande parte ou toda potência lançante se propague pela casca. Como a estrutura construída é simétrica (ver figura 3.1.2) espera-se que ocorra o

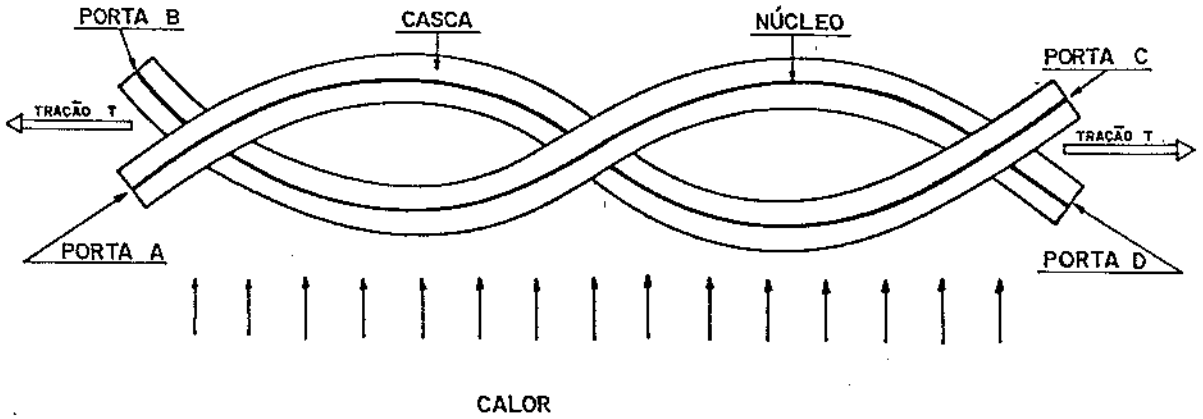


Fig. 3.1.1 - Situação das fibras no início do processo de fusão-tração.

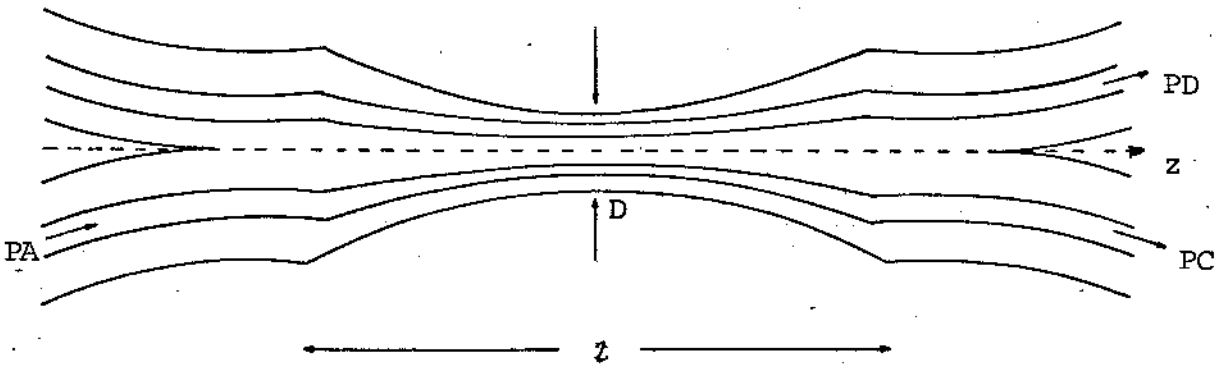


Fig. 3.1.2 - Geometria das fibras depois de fundidas (vista longitudinal).

oposto na região cônica ascendente ou seja, toda a potência lançada na casca na região cônica descendente é, por um processo adiabático, recapturada pelo núcleo na região cônica ascendente. Com isto, além de simétrica, a estrutura deve possuir ângulos de conicidade pequenos que em geral se situam entre 0.1° e 0.3° . Desta forma, no comprimento entre os pontos z para os quais (z) pode ser considerado inexistente a potência ótica passa a se propagar pelo guia composto formado pelas fibras fundidas cujo índice de refração do núcleo é igual ao índice de refração das cascas das fibras usadas na fusão e o índice de refração da casca igual ao índice de refração do meio externo à região fundida. Este modelo, proposto por Bures et al [8] assume que o acoplamento se dá através do batimento entre os dois modos de ordens mais baixas guiados pela estrutura. Estes modos são constituídos de maneira idêntica à descrita na seção 11.2 mas o procedimento matemático para o cálculo de suas constantes de propagação ou coeficientes de acoplamento é diferente.

Uma aproximação parabólica pode ser usada para o cálculo da variação do raio do núcleo ρ em função de z . Assumindo que as dimensões das fibras reduzam obedecendo uma lei parabólica, podemos escrever;

$$\rho = \rho_0 (1 + \gamma z^2) \quad 3.2.1$$

Com ρ_0 igual ao valor do raio na cintura da estrutura bicônica (waist). A constante γ pode ser obtida com a ajuda do coeficiente de Poisson ν , e segundo Bures et al [8] é dada por;

$$\gamma = 4 \frac{(\exp((l-dz)/(2 dz)) - 1)}{(l + dz)^2} \quad 3.2.2$$

Onde l é o comprimento da região fundida e dz a dimensão da zona de fusão. Vimos na figura III.2 da seção II.1 que a razão entre a potência existente no núcleo de uma fibra e a potência total lançada neste núcleo cai rapidamente a zero (0) para valores decrescentes da frequência normalizada V e, para $V < 1$ nenhuma potência existe no núcleo. Desde que a potência normalizada V em acopladores fundidos é uma função de z , deve existir um valor de z ao longo da região de fusão para o qual $V=1$. Desta forma, o comprimento entre os pontos da estrutura fundida para os quais $V(z)$ é tal que $V=1$ pode ser definido como um comprimento de interação L no qual a estrutura existe como definida anteriormente.

Para calcular-se o coeficiente de acoplamento ζ dos modos simétricos ($\Psi+$) e anti-simétrico ($\Psi-$) desta estrutura (existente entre os pontos $V=1$) dois tipos de fusão devem ser considerados:

Fusão Forte - altera de maneira significativa as seções transversais das fibras.

Fusão Fraca - não altera significativamente as seções transversais das fibras.

No primeiro caso, assumiremos que sua seção reta é retangular com lados a e $2a$ como proposto por Payne et al [23]. A figura 3.2.2. ilustra esta situação. Na realidade, como a estrutura fundida é altamente multimodo, os modos de ordens mais baixas Ψ_{\pm} são insensíveis aos seus contornos e a aproximação retangular (e

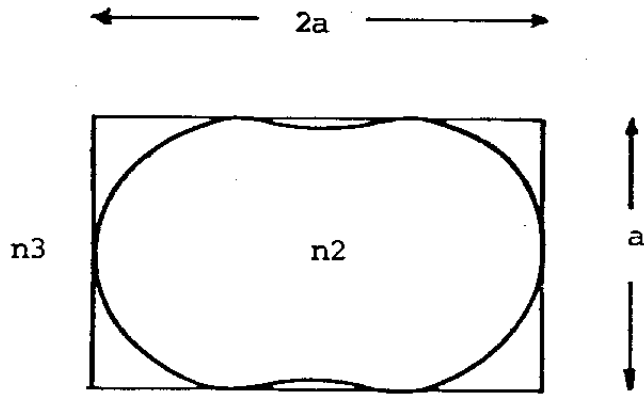


Fig. 3.2.2 - Aproximação retangular para acopladores fortemente fundidos (23).

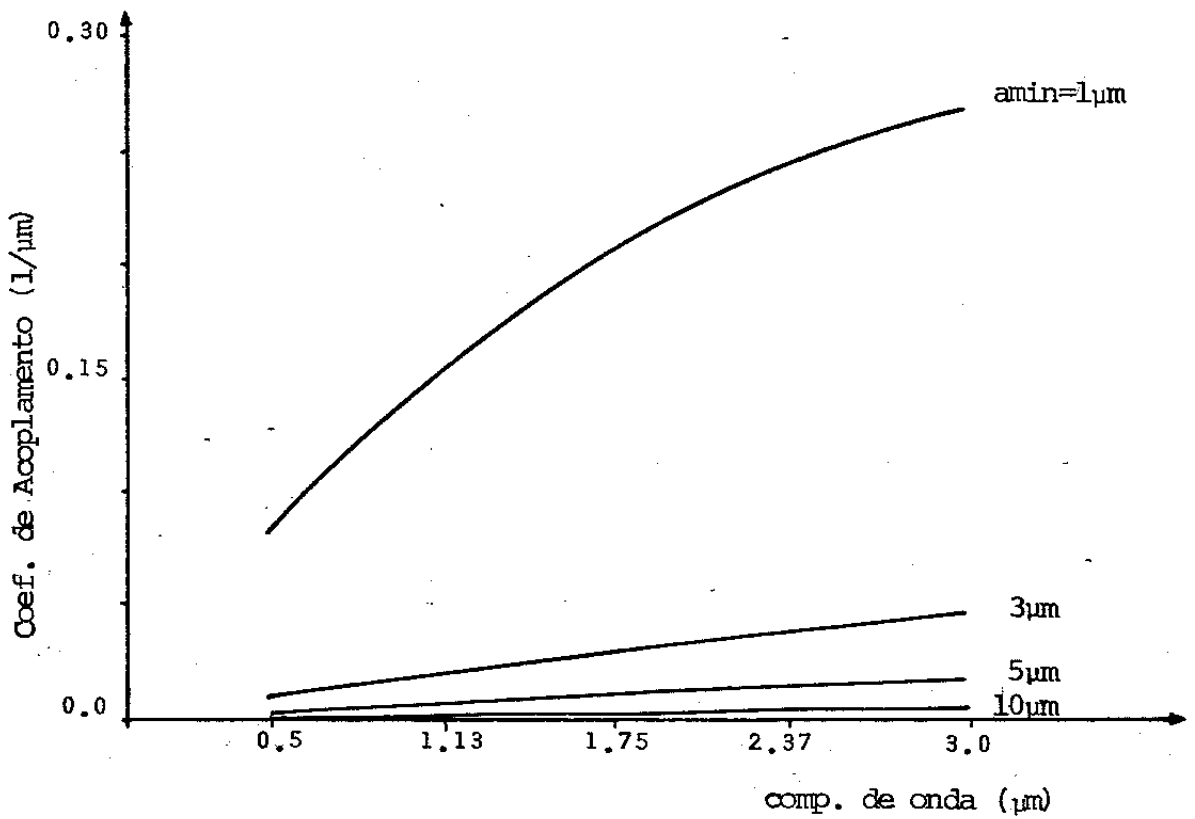


Fig. 3.2.3 - Variação do coeficiente de acoplamento C em função do comprimento de onda para vários valores de a_{min} .

não elíptica) é utilizada por ser útil no desenvolvimento matemático para o cálculo de C. De modo semelhante ao descrito na seção 112.2, o coeficiente de acoplamento é uma função de z e igualmente ao descrito na referida seção podemos (por conveniência) defini-lo como:

$$C_0 = \frac{1}{L} \int_{-a}^{\infty} C(z) dz \quad 3.2.3$$

O estudo de acoplamento entre guias retangulares foi extensivamente feito por Marcatili [24] e, para guias altamente multimodo o coeficiente de acoplamento C pode ser escrito como:

$$C(z) = \frac{3 \pi \lambda}{32 n^2 a(z)^2 (1 + 1/V(z))^2} \quad 3.2.4$$

Com o auxílio da equação 3.2.1 e 3.2.4 podemos resolver explicitamente 3.2.3. Assim:

$$C_0 L = \frac{3 \pi \lambda}{32 n^2 a_{\min}^2 (1 + 1/V_{\min})^2} \frac{\pi}{2 \gamma^{1/2}} \left(1 + \frac{1}{V_{\min}}\right)^{1/2} \quad 3.2.5$$

Onde podemos agora definir L como sendo;

$$L = \frac{\pi}{2 \gamma^{1/2}} \left(1 + \frac{1}{V_{\min}}\right)^{1/2} \quad 3.2.6$$

para a_{\min} igual ao valor de a na cintura do acoplador, V_{\min} dado por:

$$V_{\min} = \frac{2 \pi a_{\min} (n_2^2 - n_3^2)^{1/2}}{\lambda}$$

e γ é dado pela equação 3.2.2. Desta forma, as potências P_C e P_D nos braços de saída do acoplador são escritas de maneira idêntica às equações 2.2.6 e 2.2.7 com CoL dado por 3.2.5.

Estudos sobre o comportamento do coeficiente de acoplamento com o comprimento de onda indicam que C é uma função crescente e não linear de λ ; entretanto, este comportamento é significativo apenas para valores pequenos de a_{\min} . A figura 3.2.3 mostra a curva de $C \times \lambda$ para vários valores de a_{\min} . De acordo com esta figura, as potências P_C e P_D na saída do acoplador devem oscilar com a variação do comprimento de onda observando que, para acopladores com a_{\min} pequeno, estas oscilações não permanecem com período constante. A variação da potência P_C com o comprimento de onda é mostrado na figura 3.2.4 para dois valores de a_{\min} . Estes resultados mostram o caráter seletivo destes acopladores com λ sugerindo assim sua utilização em sistemas M-D. Pelo modelo teórico, espera-se também um comportamento oscilatório das potências P_C e P_D quando variamos o índice de refração do meio externo n_3 . Os estudos teóricos da variação de P_C com o índice de refração n_3 são mostrados na figura 3.2.5. A seletividade destes acopladores com o índice de refração n_3 sugere sua utilização como chaves óticas bem como sensores de temperatura (ou índice de refração).

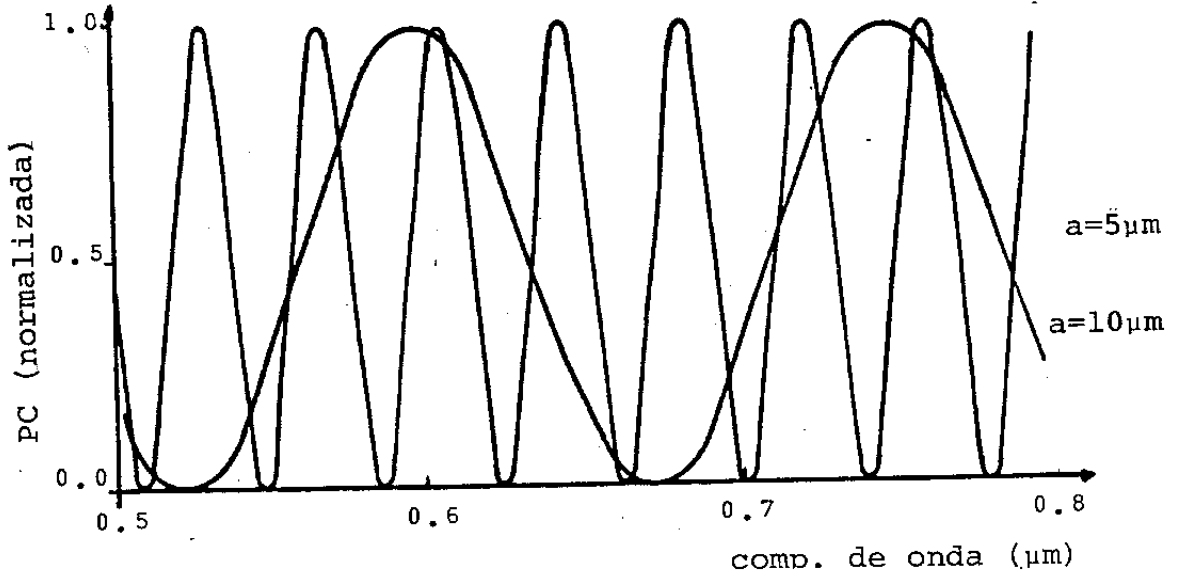


Fig. 3.2.4 - Variação da potência PC em função do comprimento de onda (λ) para dois valores de a min. $n_2=1.456$ e $n_3=1.00$.

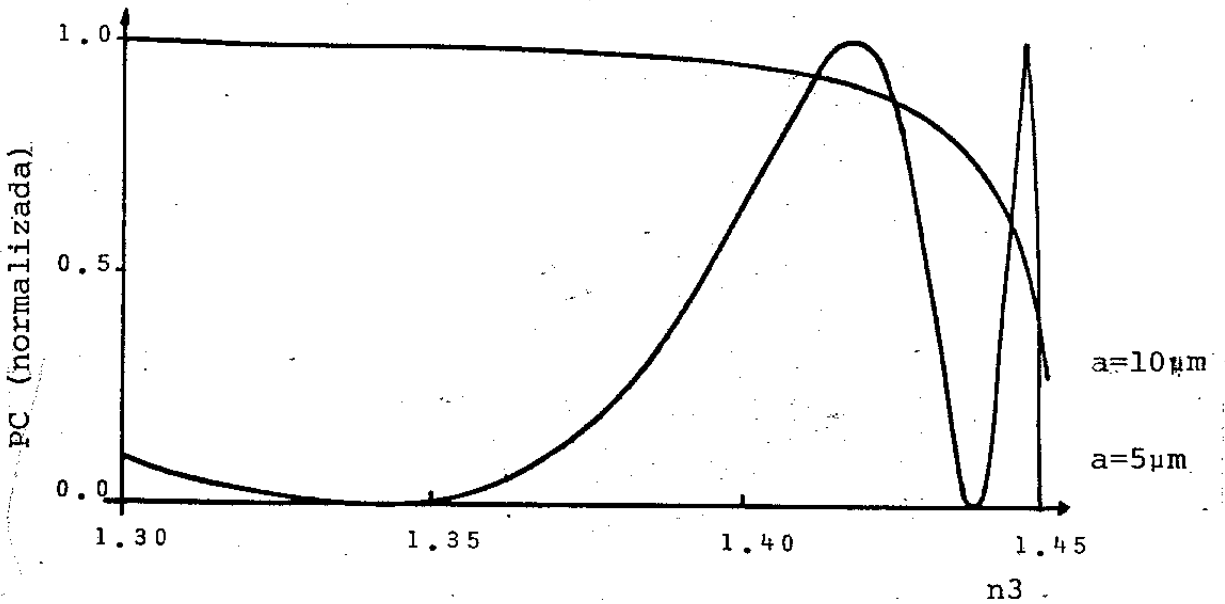


Fig. 3.2.5 - Variação da potência PC em função do índice de refração n_3 para dois valores de a min. $n_2=1.456$ e $\lambda=0.6\mu\text{m}$.

Para o caso de fusão fraca, a estrutura será modelada como dois guias cilíndricos tangentes longitudinalmente cujos núcleos são compostos das cascas das fibras utilizadas na fusão. Conforme indicado na figura 3.2.6. Neste caso, o acoplamento se dá também pelo batimento dos dois modos de baixa ordem excitados na estrutura (altamente multimodo) e a excitação do segundo núcleo ocorre devido ao campo evanescente deste novo guia.

A expressão aproximada para o coeficiente de acoplamento entre os modos Ψ_{\pm} desta estrutura pode ser obtida da equação II.15, levando em consideração os altos valores de V e observando que em acopladores fracamente fundidos a distância entre os centros dos núcleos é igual ao dobro do raio em qualquer ponto ao longo da estrutura fundida ($d(z)=2a(z)$). Assim:

$$C(z) = \frac{\sqrt{2} \sqrt{c^2 (n_2^2 - n_3^2)^{1/2}} \exp(-2(1 - (\delta/2))/V(z))}{n_2 a(z) V(z)^{5/2}} \quad 2.3.7$$

O comportamento das potências PC e PD com os parâmetros físicos e geométricos do acoplador são semelhantes ao caso de fusão forte. Os copladores fortemente fundidos, possuem uma estabilidade mecânica maior que os fracamente fundidos. Estes entretanto, sentem menos os efeitos externos (por exemplo stress) que induzem o aparecimento na estrutura de modos de ordens altas, sendo desta forma mais estáveis em relação à perda. A taxa de acoplamento conseguida nos dois casos é diferente. Na fusão forte, as taxas de acoplamento são maiores que na fusão fraca.

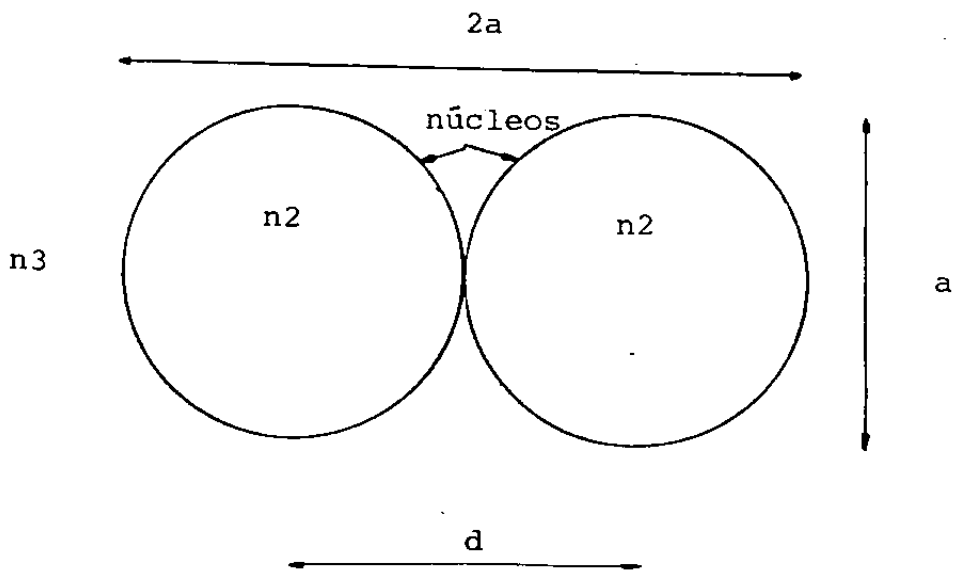


Fig. 3.2.6 - Aproximação de guias tangentes para acopladores fracamente fundidos (23).

MONTAGEM EXPERIMENTAL

Na descrição do modelo teórico para acopladores fundidos, nos referimos à necessidade destes acopladores possuírem uma estrutura bicônica simétrica bem como ângulos de conicidade pequenos (variação cônica adiabática). Isto torna-se necessário para que o acoplador possua boas figuras de mérito. Entretanto, desde que em média a redução da secção transversal das fibras é da ordem de 10 (o que implica em um diâmetro final na cintura do acoplador menor $15 \mu\text{m}$), uma montagem experimental com recursos específicos para alinhamentos, controles de chamas e velocidade de tracionamento foi estudada e implementada para tornar possível a construção destes acopladores com bons desempenhos. O objetivo deste capítulo é descrever em detalhes a montagem utilizada para a confecção destes dispositivos.

A montagem experimental utilizada na confecção de acopladores pela técnica de fusão pode ser vista na figura IV e consta basicamente de 5 sistema. São eles:

- 1 - Sistema de alinhamento
- 2 - Sistema de tracionamento
- 3 - Sistema de fusão
- 4 - Sistema eletromecânico de retirada das chamas

3 - Sistema de Injeção e Detecção

IV.1 Sistema de Alinhamento

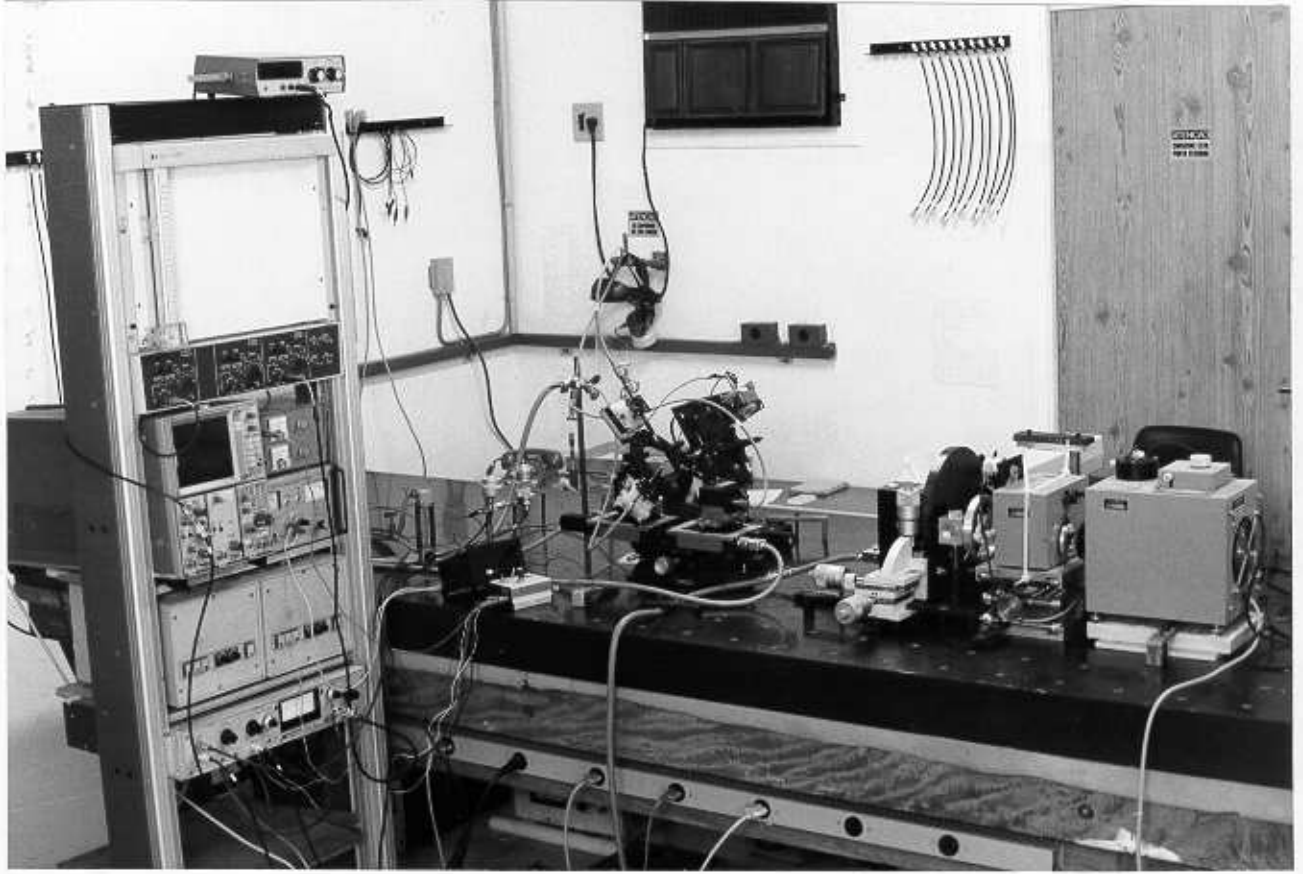


Fig. IV - Montagem experimental utilizada no estudo de acopladores fundidos.

5 - Sistema de lançamento e detecção

IV.1 Sistema de Alinhamento

É composto por dois microposicionadores x,y,z sobre os quais são prêsas duas peças suportes denominadas estágios de rotação, como pode ser visto na figura IV.1.1. Nestes são fixadas duas outras peças constituídas de pequenas placas de ferro onde em sua região central foi feita uma fenda a qual servirá de guia para as agulhas hipodérmicas através das quais passarão as fibras a serem fundidas. Um dos estágios de rotação possui movimentos angulares em torno dos eixos x,y e z de aproximadamente 15°, o que permite um ajuste preciso da agulha nele fixada em relação a agulha fixada no outro estágio de rotação. Este, possui um movimento angular em torno do eixo das agulhas de 360° sendo portanto utilizado para torcer as fibras como descrito na seção III.1. O conjunto microposicionadores-estágios de rotação permite desta forma com que se faça um alinhamento preciso das agulhas nas quais se fixarão as fibras que constituirão o acoplador.

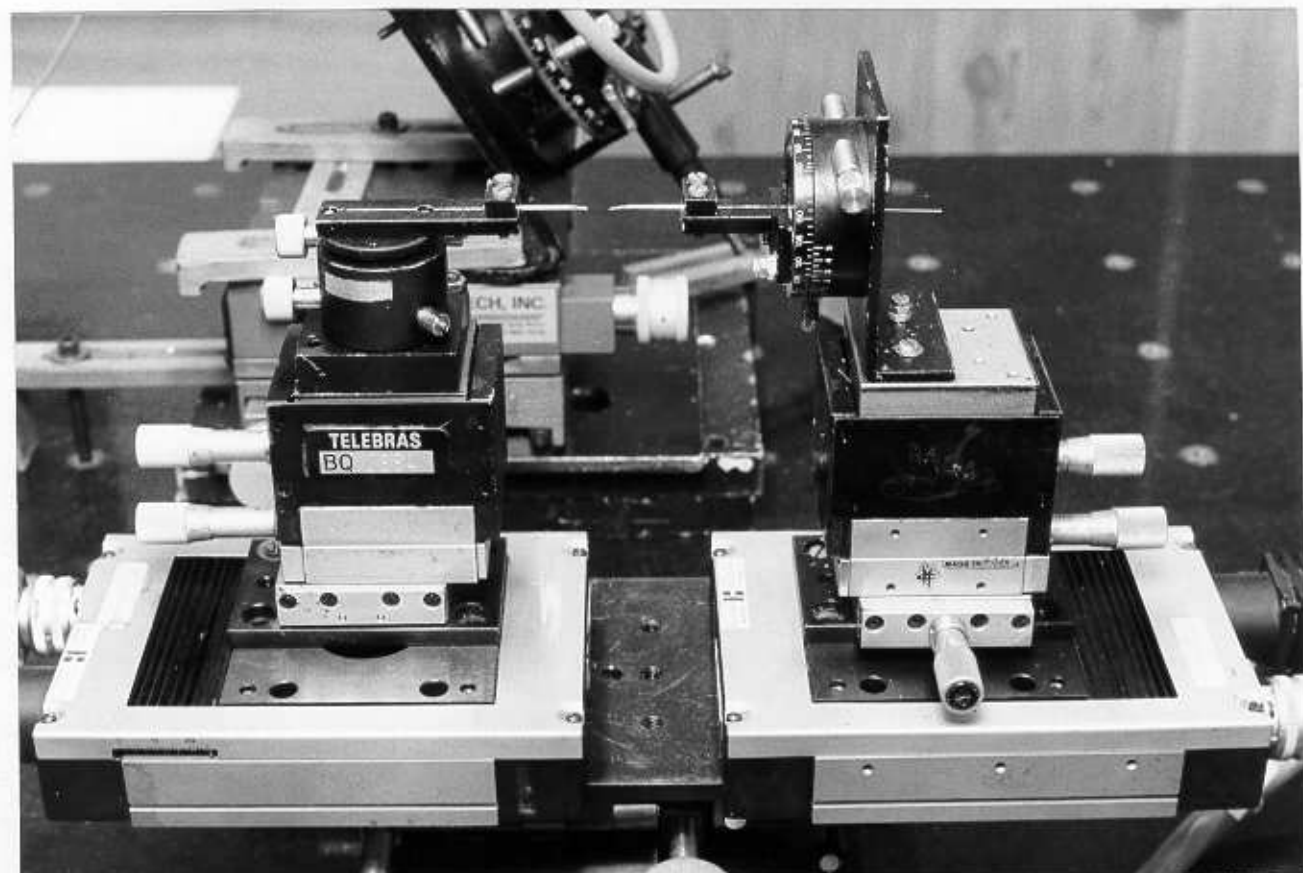


Fig. IV1.1 - Sistema de alinhamento. Ve-se os microposicionadores, os eixos de rotação e as agulhas hipodérmicas. Vê-se ainda nesta foto os motores responsáveis pelo tracionamento e parte do sistema eletromecânico.

IV.2 Sistema de Tracionamento

Esta unidade compõe-se de dois motores controlados por um gerador de pulsos, os quais são mostrados na figura IV2.1. Estes motores são montados de maneira que ao aciona-los, uma plataforma plana (sobre a qual são fixados os microposicionadores do sistema de alinhamento) se desloque. A velocidade com que este deslocamento ocorre pode ser escolhida selecionando no gerador de pulsos uma determinada frequência. Cada pulso desloca a plataforma de $1\mu\text{m}$. No caso em questão, esta velocidade pode variar de $25\mu\text{m/seg}$ a $2000\mu\text{m/seg}$. Ligado ao gerador de pulsos se encontra também um contador de pulsos de modo que o deslocamento da plataforma pode ser precisamente monitorado dentro de um deslocamento máximo de 2.5 cm . Os dois motores se fazem necessários para que a região de fusão não se desloque no espaço, mantendo a simetria da estrutura bicônica. Para que esta estrutura tenha uma variação suave ao longo de seu comprimento (condição já citada como necessária para a construção de acopladores com baixas perdas) é fundamental um perfeito ajuste entre a velocidade de puxamento e a temperatura atingida na região de fusão sendo que no decorrer do desenvolvimento experimental observou-se (por um processo de tentativa) que a condição mais apropriada de trabalho corresponde a uma velocidade de $180\mu\text{m/seg}$ com um fluxo de hidrogênio de $0.5\text{ cm}^3/\text{min}$.

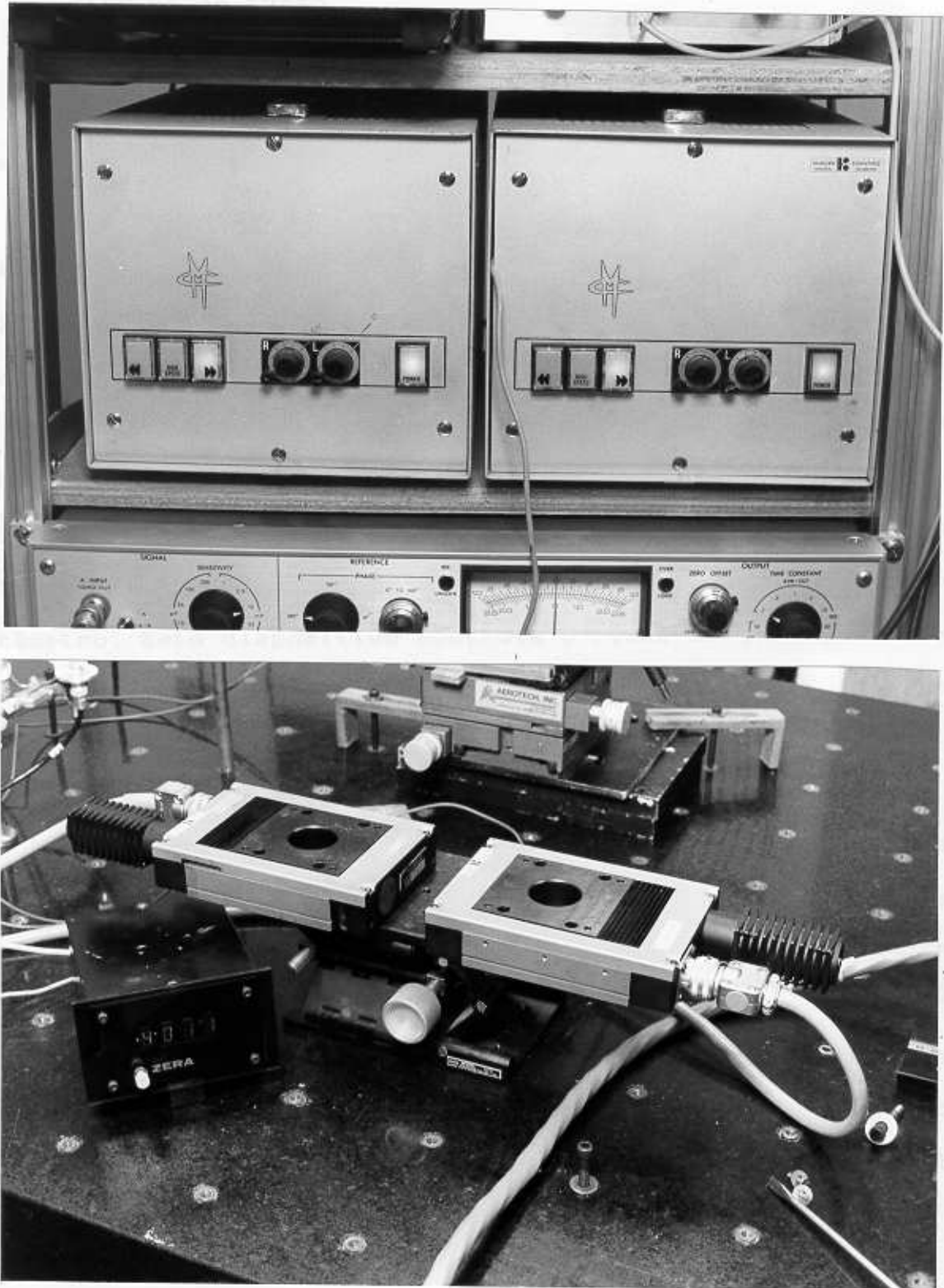


Fig. IV2.1 - Sistema de tracionamento. Acima - Geradores de pulsos. Abaixo - motores e contador de pulsos.

IV.3 Sistema de Fusão

Responsável pelo aquecimento das fibras na região de fusão este sistema pode ser visto na figura IV3.1 e consta de:

- 3 agulhas hipodérmicas na saída das quais se processará a queima do gás. Estas agulhas são fixas em canetas de aço inóx que por sua vez estão dispostas de forma coplanar a 120° em torno da fibra. O diâmetro das agulhas é de aproximadamente 0.3 mm e o das canetas de 6 mm. O suporte de fixação das microchamas (canetas + agulhas) permite ajustes precisos das mesmas e será descrito em detalhes quando da explanação do sistema eletromecânico.
- Rotâmetro. Este dispositivo controla o fluxo de gás que chega às microchamas controlando assim a temperatura atingida na região de fusão. Constituído de um tubo de vidro cônico ligado a uma válvula agulha ele permite um ajuste de fluxo de 0 cm^3/min a 1.2 cm^3/min . A condição ideal de fluxo em nossas experimentações foi de 0.5 cm^3/min (lido no rotâmetro) correspondendo a uma temperatura de aproximadamente 1000°C (medida com um termopar).
- Fonte de gás. Consta de uma botija de hidrogênio ligada diretamente ao rotâmetro. A pressão de saída da botija para o sistema foi fixado em $3\text{Kgf}/\text{cm}^2$ entretanto, este valor não é crítico e depende unicamente das condições de vedação do sistema como um todo.



Fig. IV3.1 - Sistema de fusão. Ve-se a fonte de calor, o rotâmetro e as microchamas (canetas + agulhas). Ve-se também as válvulas individuais das microchamas.

IV.4 Sistema Eletromecânico de Retirada das Chamas

Este sistema, tem como objetivo permitir o desenvolvimento de duas etapas essenciais ao processo de fusão-tração. Primeiro - retirar as chamas da região de fusão quando o processo de fusão-tração é interrompido. Segundo - permitir o alinhamento das microchamas (canetas + agulhas) para tornar possível a incidência das chamas em um ponto específico do espaço. A figura IV.4.1 mostra este sistema. Duas peças básicas formam a estrutura geral deste sistema. A primeira, denomina-se **peça central**. Nesta peça são presos os suportes de fixação das microchamas, sendo portanto uma das responsáveis pela retirada das microchamas da região de fusão. Esta peça, bem como os suportes de fixação das microchamas são mostrados na figura IV.4.2. Conforme mostra a figura, a peça central constitui-se de duas partes concêntricas em forma anelar onde, a parte interna possui um movimento giratório limitado e forçado por meio de uma mola a qual faz com que dada uma rotação no anel interno este, sempre retorna à posição inicial assim que é retirado a força aplicada para promover a rotação. A parte externa não possui movimentos. Os suportes de fixação das microchamas são presos a esta peça central de tal forma que ao aplicarmos uma tensão na parte interna das mesmas os suportes de fixação sofrem uma rotação (no caso em questão de aproximadamente 20°) retirando as chamas da região onde se encontram as fibras a serem fundidas. Esta tensão é aplicada por meio de um solenóide de tração, cuja ligação com a parte interna da peça central é feita através de uma correia que, após passar por duas roldanas é pre-

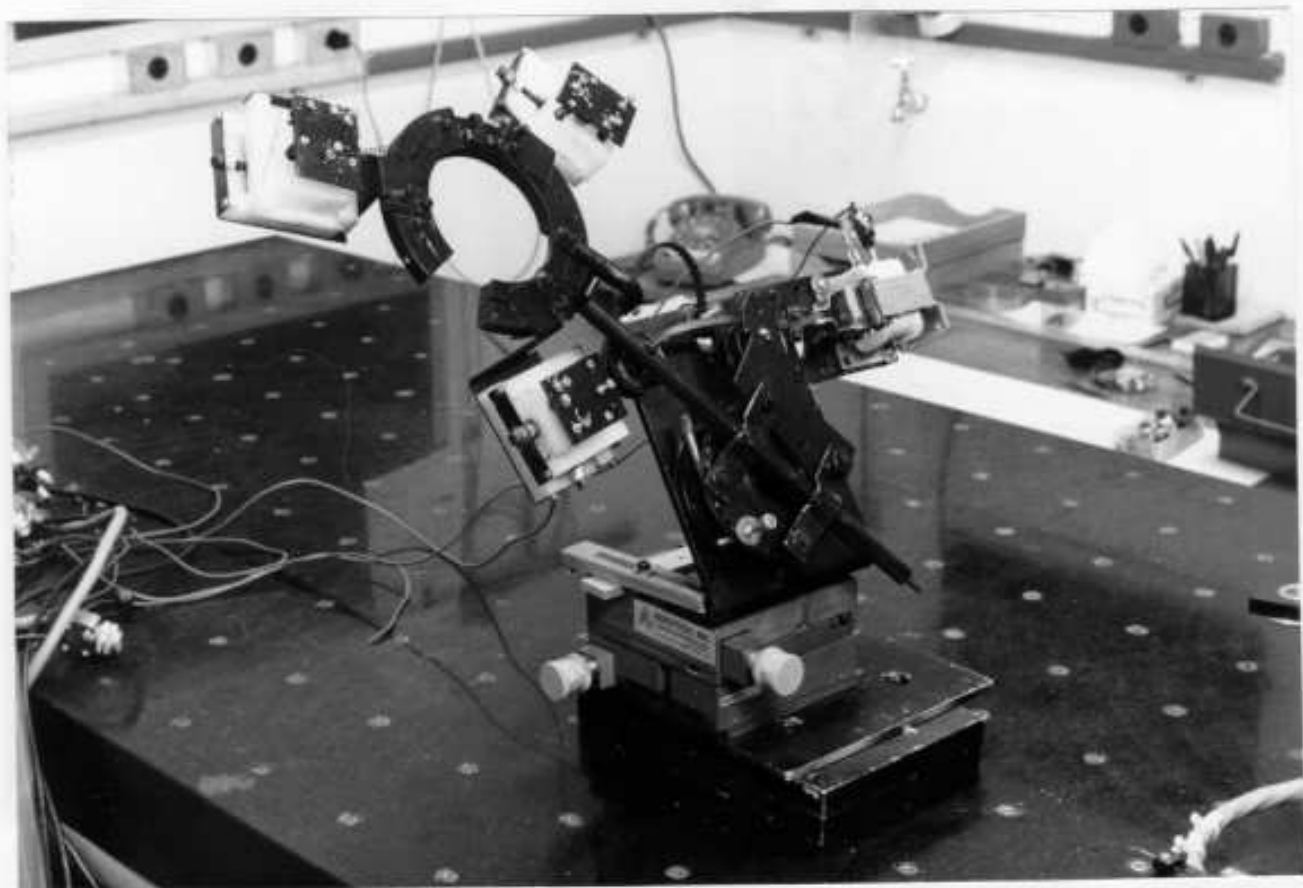


Fig. IV4.1 - Sistema eletromecânico. Ve-se a peça central, os suportes, fixação das microchamas e a peça base. Ve-se ainda os transladores sobre os quais todo o sistema está preso.

em a sua própria alavanca fixada sobre o eixo interno. Na figura IV.1 e IV.2 veem-se as partes internas e externas desta peça. Na peça base, encontra-se o mecanismo de acionamento desta peça.

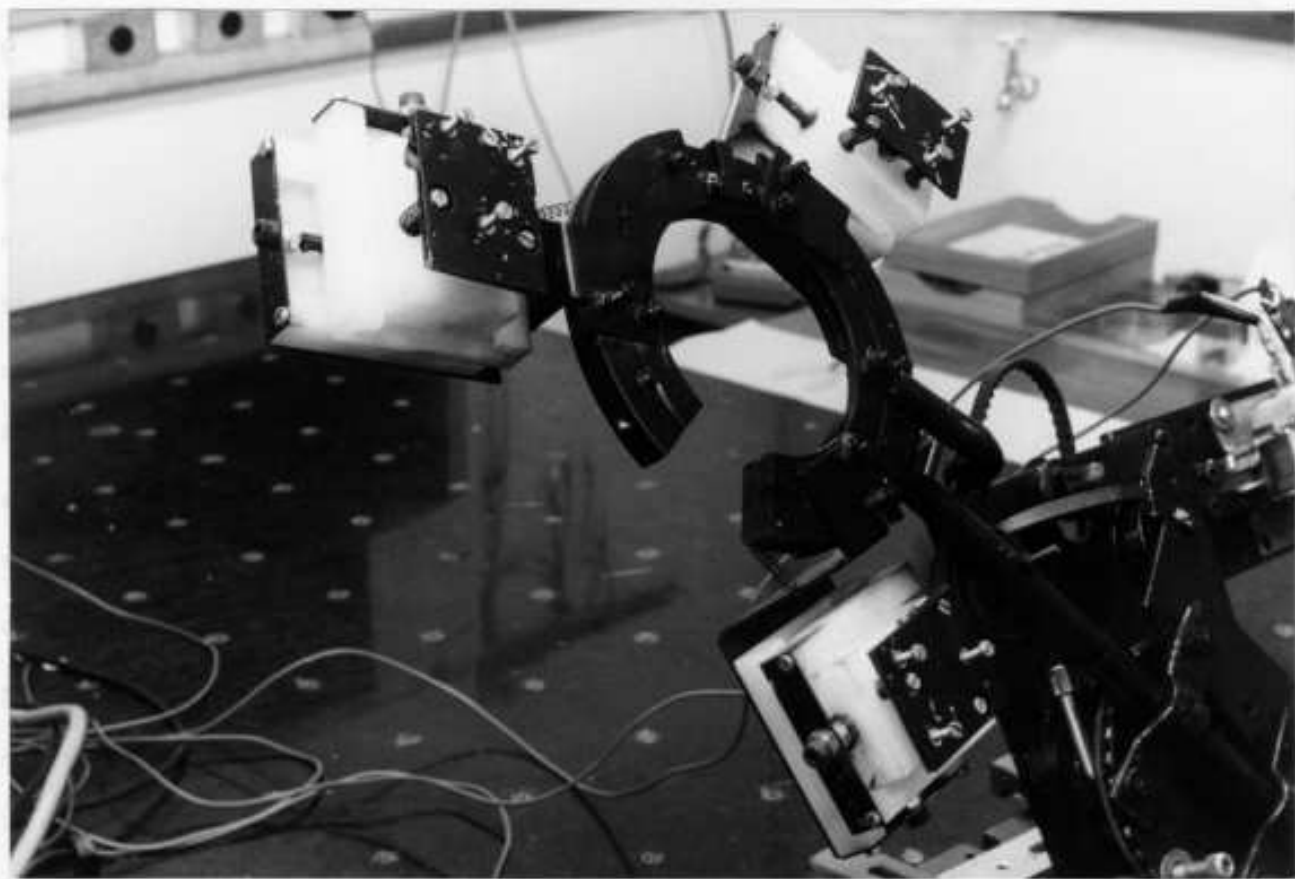


Fig. IV.4.2 - Peça central. Pode-se ver as partes internas e externas desta peça (ver texto).

Esta peça central é ajustada de modo a regular a inclinação dos chis-
mas em relação ao eixo de rotação da peça. A figura IV.1 mostra a parte interna
desta peça (ver figura IV.1).

O mecanismo de acionamento desta peça é composto de uma
transmissão linear que possibilita a elevação ou a aproximação
da peça em relação ao eixo de rotação. Esta transmissão é realizada
no plano das camisas. Sobre o eixo de transmissão se encontra um
sistema de transmissão de movimento que permite, por meio
desta peça, acionar a peça central. A figura IV.2 mostra esta

sa a uma pequena alavanca fixada nesta parte interna. As figuras IV4.1 e IV4.2 esclarecem esta situação. A segunda peça, denominada peça base, consta basicamente de um estágio de rotação onde a peça central é presa por meio de uma alavanca (ver figura IV4.1). A finalidade desta peça é permitir retirarmos ou inserirmos a peça central da região onde se processará (processou) a fusão. A necessidade de incluirmos esta peça ao sistema fica claro se lembrarmos que, antes de iniciarmos o processo de fusão-tração, necessitamos alinhar as agulhas por onde passarão as fibras a serem fundidas (ver figura IV1.1), as quais estão presas ao sistema de alinhamento. Além disto, terminado o processo de fusão-tração, torna-se necessário inserirmos a estrutura fundida em uma proteção para que possamos retirá-la do sistema. Nenhuma das duas etapas acima citadas poderiam ser implementadas com a peça central do sistema eletromecânico na posição adequada ao início do processo de fusão -tração.

Todo o sistema eletromecânico está fixada sobre dois transladores lineares os quais permitem movimentos em dois eixos facilitando desta forma o ajuste da região de incidência das chamas com a região onde se encontram as fibras a serem fundidas (ver figura IV4.1).

O suporte de fixação das microchamas é composto de dois transladores lineares que possibilitam afastarmos ou aproximarmos as chamas da região de fusão, bem como desloca-las paralelamente no plano das canetas. Sobre estes transladores se encontra um sistema de parafusos-molas onde as microchamas são presas, permitindo ajustes angulares das mesmas. A figura IV4.3 mostra este

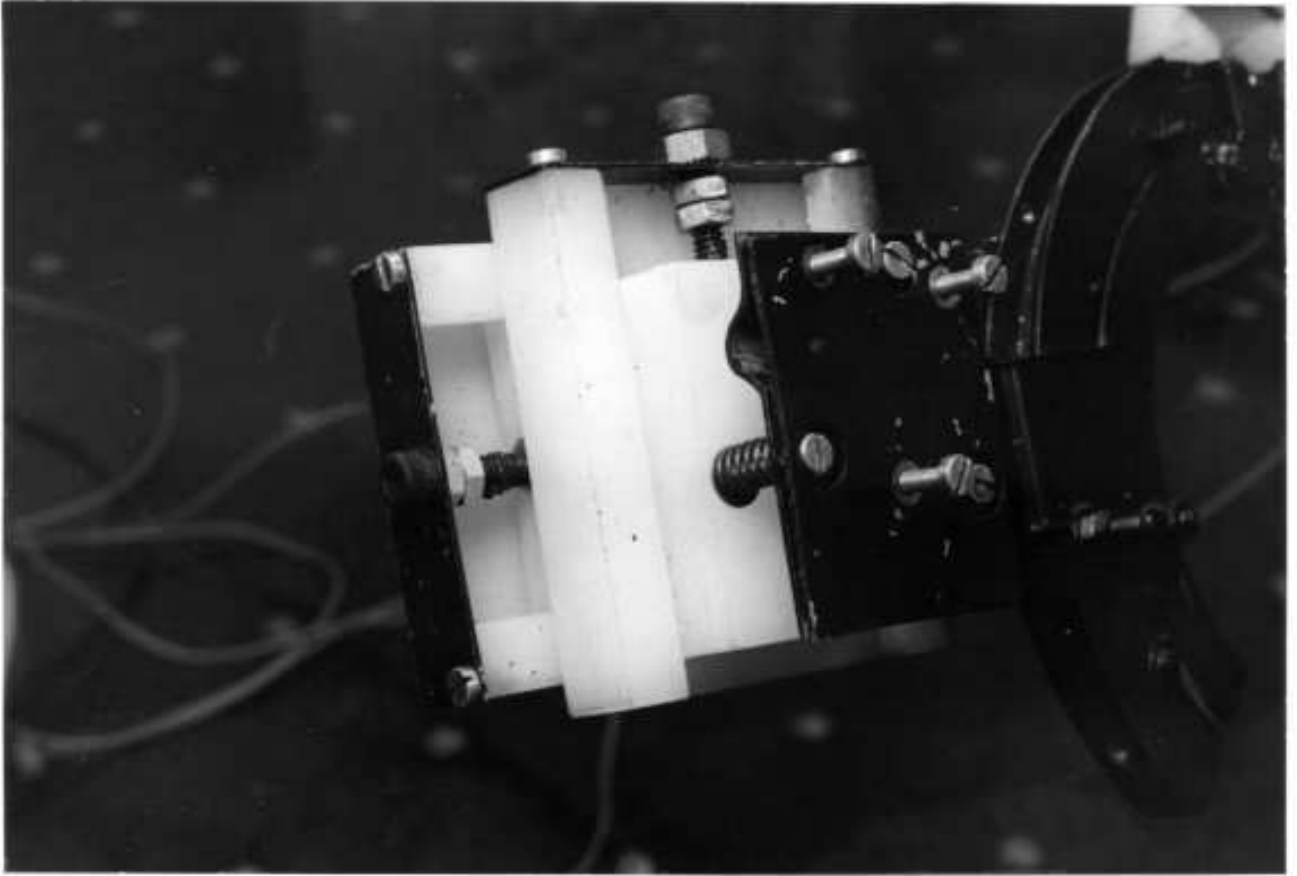


Fig. IV4.3 - Detalhes do suporte de fixação das canetas.

suporte. Os ajustes angulares e lineares incorporados ao suporte de fixação das microchamas, como veremos no capítulo seguinte, são essenciais para a obtenção de uma fusão homogênea e uniforme.

A ligação do sistema eletromecânico ao sistema de tracionamento é feito por meio de um circuito eletrônico. Este circuito contém 3 chaves cujas funções são : 1 - Chave liga-desliga. Ao ser deslocada para a posição liga, inicia-se o processo de tração (ou compressão) e simultaneamente o solenóide de tração é desligado. Com isto, as microchamas se deslocam para a região de fusão fazendo com que o processo de fusão das fibras tenha início. 2 - Chave de inversão de sentido. Esta chave permite que se selecione o sentido no qual se deseja que o deslocamento dos motores ocorra (tração ou compressão). 3 - Chave de seleção de velocidades. Contém duas posições: alta e baixa velocidade. Se por exemplo deslocamos a chave para a posição de baixa velocidade todas as velocidades selecionadas no gerador de pulsos estarão entre $25\mu\text{m}/\text{seg}$ e $400\mu\text{m}/\text{seg}$; caso contrário, se encontrarem entre $400\mu\text{m}/\text{seg}$ e $2000\mu\text{m}/\text{seg}$. Neste circuito existe ainda um gerador de atrasos que permite selecionar o tempo no qual as fibras devem ficar expostas ao calor sem que haja tracionamento. Isto se faz necessário pois se as fibras são tracionadas antes do início da fusão, a leitura no contador de pulsos não corresponderá ao comprimento da região fundida.

IV.5 Sistema de Lançamento e Detecção de Potência

Este sistema tem como função lançar uma determinada potência ótica em uma das fibras que constituirá o acoplador (denominado braço de entrada) e detectar as potências nas fibras que formarão os braços de saída dos mesmos.

Este é constituído por: Um laser de He-Ne ($\lambda = 633\text{nm}$) de potência nominal de 0.95 mW e cuja função é excitar a fibra lançante. Uma objetiva X10 necessária para focalizar o feixe do laser no núcleo da fibra aumentando assim a eficiência de lançamento. Um microposicionador x,y,z (precisão de $2\mu\text{m}$) o qual permite localizar precisamente o núcleo da fibra no foco da objetiva. Dois detectores de silício, dois medidores de tensão e uma registradora.

Com este conjunto, torna-se possível o monitoramento das potências nos braços de saída durante o processo de fusão-tração.

MÉTODO DE FABRICAÇÃO

Para se construir acopladores pela técnica de fusão, inicia-se o processo alinhando o sistema. Neste estágio, alinha-se as agulhas por onde passarão as fibras e as microchamas. Descreveremos a seguir este procedimento experimental.

Alinhamento da agulhas. O procedimento experimental para alinharmos as agulhas, inicia-se com a fixação das mesmas nas peças suportes. O passo seguinte consiste em observarmos as agulhas lateralmente através de um microscópico alinhando-as na mesma altura com a ajuda dos microposicionadores e, para garantir que toda sua extensão se encontre no mesmo plano, faz-se uma varredura com o microscópico (observando as agulhas lateralmente) ao longo do seu comprimento. Caso isto não aconteça, o sistema permite que esta correção seja feita calibrando-se os estágios de rotação (estas peças foram incorporadas ao sistema para que este alinhamento fosse possível). Fazer com que as agulhas se mantenham paralelas ao plano de deslocamento da plataforma dos motores (o que é conseguido com o procedimento descrito acima) torna-se necessário a fim de evitar que as fibras ao serem tracionadas sofram tensões distintas nos pontos de fixação nas agulhas. O mesmo pro-

cedimento é feito alinhando-se as agulhas em um plano perpendicular ao anterior. Concluídas estas etapas, pode-se garantir que as mesmas estão adequadamente alinhadas.

Alinhamento das Microchamas. Durante o processo de fusão as chamas devem aquecer de maneira uniforme a superfície das fibras. Uma das providências adotadas para que isto ocorresse, foi dispor ao redor das fibras 3 microchamas de forma coplanar com uma separação angular entre elas de 120° . Isto contudo, não é suficiente para garantirmos uma fusão homogênea das fibras em questão, o que nos leva a um procedimento de alinhamento específico à montagem utilizada no estudo destes acopladores. Dois problemas básicos podem ser observados no sistema de microchamas: Primeiro, mesmo que as microchamas estejam dispostas de forma coplanar, as chamas certamente não se situarão neste plano, pois os defeitos nas bordas das agulhas (sempre existentes) deslocam-nas para uma posição não desejada. A solução para este problema consiste em atuarmos em um sistema de parafusos e molas incorporados ao suporte de fixação das canetas o qual permite às mesmas ajustes angulares (ver figura IV.4.3). Segundo, apesar das agulhas serem idênticas e das condições de alimentação de gás serem as mesmas para as 3 microchamas, observamos que há certas discrepâncias nas dimensões das chamas; isto porque, as agulhas não possuem diâmetros internos idênticos. Para corrigir estas diferenças, podemos atuar nas válvulas que controlam o fluxo de gás que atinge cada caneta. Entretanto, desde que a fonte de alimentação de gás é comum às canetas, uma diminuição do fluxo em uma delas sempre é

acompanhado de um acréscimo nas outras duas. Mesmo com este pequeno inconveniente podemos regular as chamas de maneira satisfatória.

Solucionados estes problemas, para fazermos com que a região de incidência das chamas tenha uma temperatura uniforme basta mantermos as microchamas equidistantes do ponto onde esta incidência ocorre, o que pode ser feito com o auxílio dos transladores incorporados aos suportes de fixação das canetas (ver figura IV4.3). Terminada esta etapa do alinhamento, torna-se necessário situarmos a região de incidência das chamas onde se encontram as fibras a serem fundidas. Isto pode ser feito com o auxílio dos transladores nos quais a base do sistema eletromecânico está presa (ver figura IV4.1). Estes transladores não só permitem um ajuste do ponto de incidência das chamas com a região do espaço onde se encontram as fibras como também escolher o ponto ao longo do seu eixo onde se deseja fundi-las.

O passo seguinte na fabricação dos acopladores constitui na preparação das fibras. Nesta etapa do processo, as fibras são desprovidas de seus revestimentos primários em um comprimento de aproximadamente 2.5 cm na região central por ação química e/ou mecânica. A seguir, as superfícies expostas são cuidadosamente limpas com acetona e não devem ficar expostas demoradamente ao meio ambiente pois a absorção de água pela superfície do vidro enfraquece a região a ser fundida comprometendo o processo de fusão-tração. Assim, terminada a limpeza das superfícies, as fibras são imediatamente presas nas agulhas de fixação. Alguns cuidados adicionais devem ser tomados antes de se colar as fibras nas agu-

lhas. Este processo é feito da seguinte forma: em primeiro lugar alinha-se as fibras em uma das extremidades observando-as lateralmente via microscópio. Quando somente uma fibra é vista através do microscópio (o que implica que a segunda fibra se encontra paralela à fibra observada) um epóxi é utilizado para fixá-las nesta extremidade. Em seguida, tensões idênticas são aplicadas em ambas as fibras nas extremidades opostas às que foram coladas. Observou-se que a fusão se faz de maneira mais homogênea e simétrica se durante o processo inicial de fusão-tração as fibras estão sujeitas à tensões idênticas. O processo de alinhamento e colagem desta extremidade é então feito de forma semelhante à anterior mantendo-se as tensões aplicadas. Em seguida, dá-se uma volta nas fibras com a ajuda de um dos estágios de rotação existentes no sistema de alinhamento. Agora, o sistema se encontra pronto para iniciar-se o processo de fusão-tração. Antes de iniciarmos este processo, verificamos em primeiro lugar se a chave que conecta o sistema eletromecânico ao sistema de tração está desligada (esta chave só deve ser ligada quando todos os demais componentes do sistema estiverem prontos para o início do processo). A seguir, ligamos o gerador de pulsos e as fontes de tensões necessárias ao funcionamento do sistema, acionando com isto o solenóide de tração incorporado ao sistema eletromecânico. Este solenóide, quando ligado, retira por ação mecânica (roldanas e molas) as microchamas da região onde se processará a fusão. O passo seguinte consiste em abrirmos a válvula que controla a saída de gás da botija para o sistema, até atingirmos uma pressão aproximada de 3Kgf/cm^2 (obviamente as chamas devem ser reguladas e alinhadas

antes desta etapa) quando então acendemos as microchamas. Para dar início ao processo de fusão-tração, ligamos a chave de conexão referida acima a qual simultaneamente aciona os motores de tração e desliga o solenóide fazendo com que as microchamas retornem (por ação de molas) para a região onde se processará a fusão, iniciando o processo. O puxamento total é registrado em um contador de pulsos.

O monitoramento da potência é feito durante o processo de fusão-tração lançando-se luz de um laser de He-Ne em uma das extremidades de uma das fibras que formará o acoplador denominada PA, com o auxílio de uma objetiva X10 e de um microposicionador como indicado na figura V1.1. As potências PC e PD são analisadas por meio de dois fotodetectores de silício ligados a dois medidores. Estes, possuem saídas do sinal para uma registradora de modo que o acoplamento possa ser analisado dinamicamente em função do comprimento da estrutura fundida. Antes de iniciarmos o processo de fusão-tração as potências PA e PC são iguais de forma que ao nos referirmos à potência acoplada estaremos falando de PD. O desempenho real do acoplador é obtido fazendo-se com que as fibras antes de atingirem os fotodetectores passem por um óleo cujo índice de refração é igual ou maior que o da casca da fibra em questão, de modo a retirar a luz transmitida pela casca da mesma. Este procedimento pode ser evitado caso o revestimento da fibra usada para a confecção do acoplador apresente tais características.

Terminada a etapa de fusão/tração, torna-se necessário inserir a estrutura em uma proteção para aumentar sua resistên-

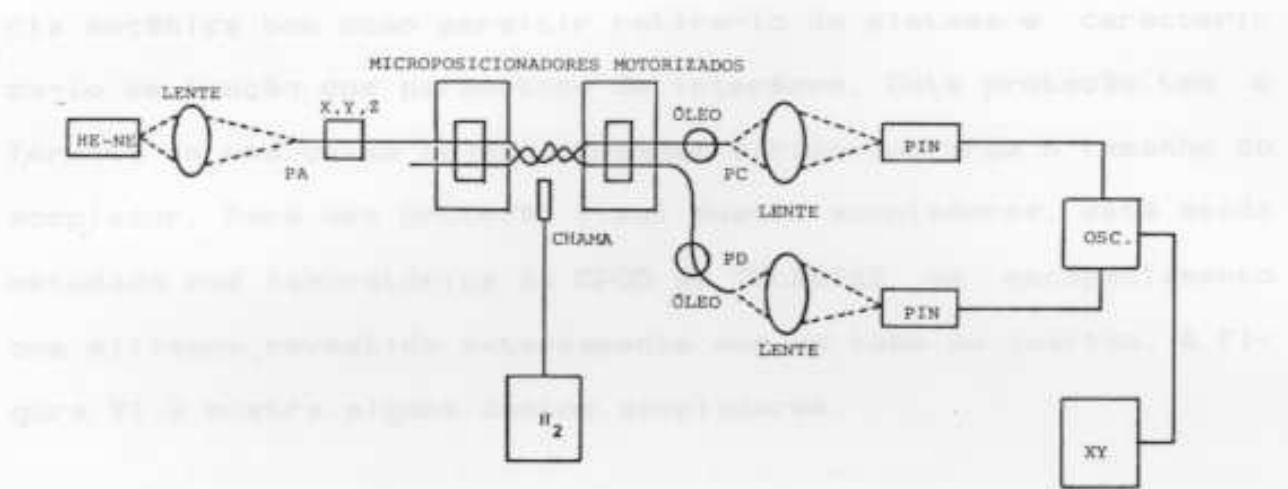


Fig. VI.1 - Diagrama do processo de fabricação e monitoramento dos acopladores.

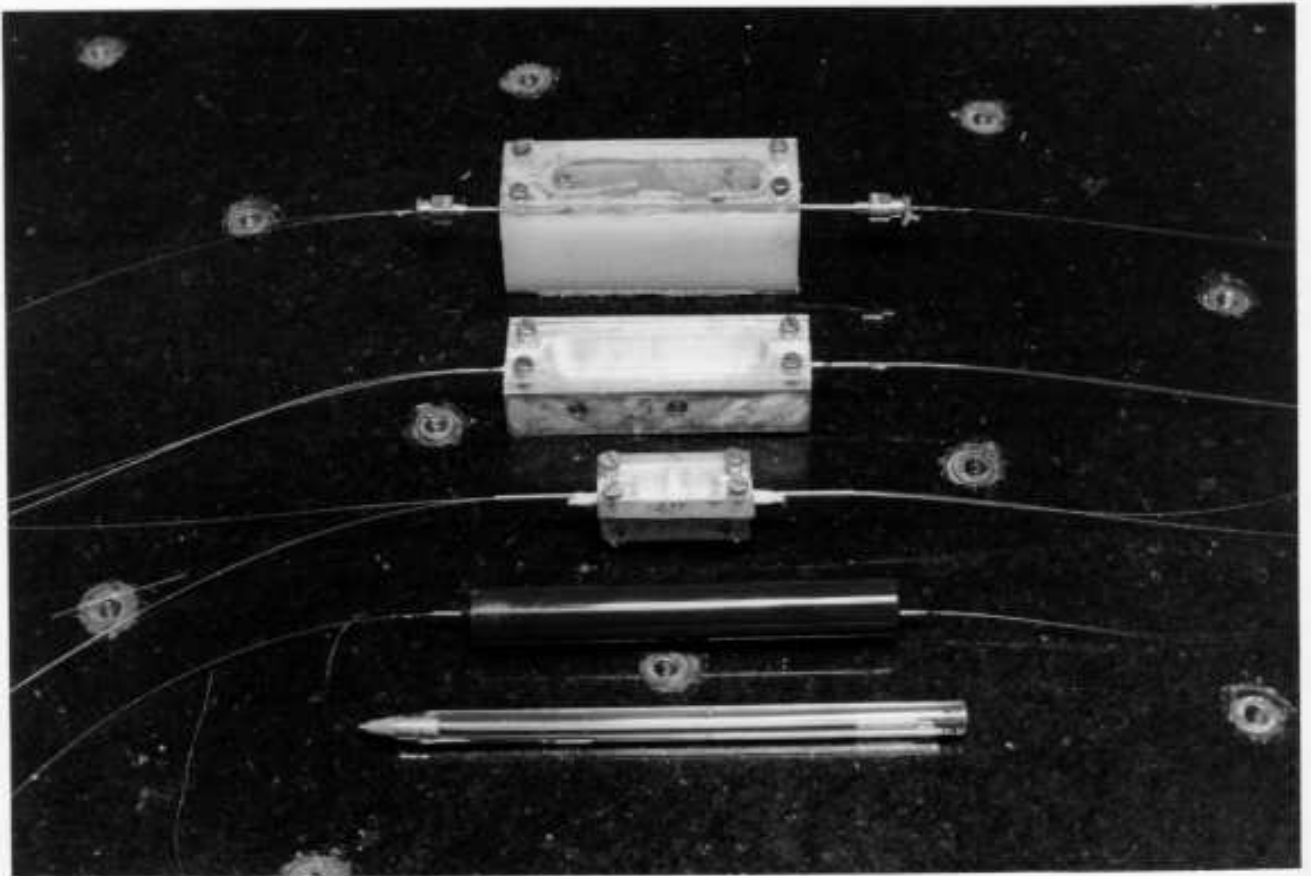


Fig. VI.2 - Acopladores fundidos em suas respectivas caixas de proteção.

cia mecânica bem como permitir retirá-lo do sistema e caracterizá-lo em função dos parâmetros de interesse. Esta proteção tem o formato de uma caixa cujas dimensões variam conforme o tamanho do acoplador. Para uma proteção final destes acopladores, está sendo estudado nos laboratórios do CPQD da TELEBRÁS um encapsulamento com silicone revestido externamente com um tubo de quartzo. A figura V1.2 mostra alguns destes acopladores.

VI RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Medidas experimentais envolvendo as potências PC e PD feitas em acopladores construídos pela técnica descrita anteriormente serão apresentados e analisados nesta seção. Descreveremos ainda a montagem experimental envolvida na medida em questão. A fibra utilizada na confecção destes acopladores tem as seguintes características:

Fibra Monomodo	- TELEBRAS
Diâm. do núcleo	- 8 μm
Diâm. da casca	- 126 μm
Δn	- 0.006
λ_c	- 0.81 μm
n_2	- 1.456

Como primeiro resultado, apresentamos na tabela 1 o desempenho de alguns acopladores (monomodo e multimodo) mostrando assim ser possível a construção destes dispositivos com baixas perdas. Nesta tabela, a perda por inserção (IL) e a eficiência de acoplamento (η) são definidas por:

TABELA 1

ACOPLADOR	PA	PC	PD	IL (dB)	η (dB)
	unidades arbitrárias				
1a	170	72.4	20	2.6	6.6
2a	170	125	1.5	1.3	19.3
3b	330	240	8	1.2	14.9
4b	32	3.8	22	0.9	0.7
5b	100	28	59	0.6	0.16
6b	190	93	90	0.16	3.1

a - multimodo

b - monomodo

$$IL(\text{dB}) = -10 \log(\text{PT}/\text{PA})$$

$$\eta(\text{dB}) = -10 \log(\text{PD}/\text{PT})$$

Onde $\text{PT} = \text{PC} + \text{PD}$. As potências PA, PC e PD foram medidas conforme o procedimento descrito no capítulo V, assumindo que antes de iniciarmos o processo de fusão-tração as potências PA e PC são iguais. As principais fontes de perdas detectadas na construção dos acopladores foram :

- Alinhamento. O alinhamento da montagem (sistema de alinhamento, fusão, traclonamento e eletromecânico) é bastante crítico. Mesmo com os recursos inseridos na mesma, este alinhamento nem sempre é feito de modo adequado causando perdas no acoplador. O efeito de um alinhamento inadequado, é fundir e tracionar um estrutura irregular, tanto no aspecto geométrico (seções transversal e longitudinal) quanto no aspecto de homogeneidade da fusão.
- Fusão de impurezas. Quando retiramos o revestimento primário das fibras a serem fundidas, iniciamos imediatamente após a limpeza das mesmas. Esta limpeza contudo não é perfeita, permanecendo sobre a superfície das fibras resíduos de revestimento às vezes vistos somente com o microscópio. A fusão destas impurezas, cria fontes de espalhamento de luz ao longo do acoplador, aumentando sua perda. Outra fonte de contaminação da estrutura fundida e obviamente de perdas, provém das impurezas do gás e da oxidação das agulhas.
- Ângulos de conicidade grandes. Proveniente do ajuste inadequado entre a velocidade de puxamento e a temperatura atingida na re-

gião de fusão.

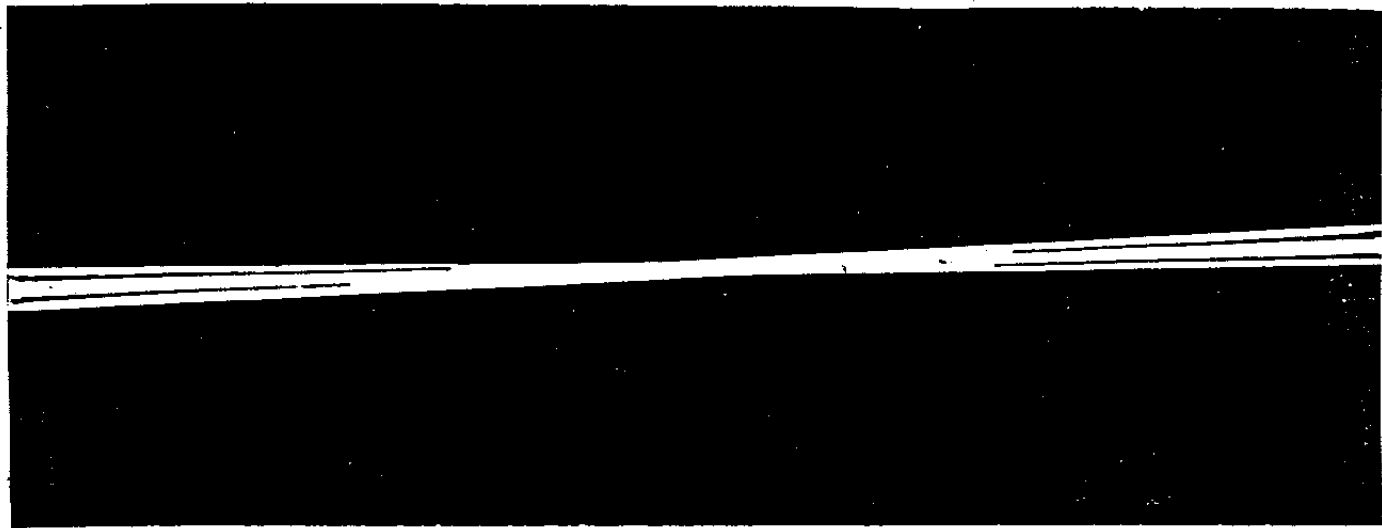
- Defeitos nas fibras. A existência de bolhas e ranhuras na fibra (observados qualitativamente com um microscópio) leva também à criação de focos de espalhamento na estrutura.

As perdas, nos acopladores com as melhores figuras de mérito construídos por nós, se situam em valores menores que 20% (0.97 dB), medidas ao final do processo de fusão-tração e para $\lambda=0.633$ m (acopladores monomodo).

A eficiência de acoplamento dos acopladores mostrados na tabela 1 varia de 3.2 % (14.9dB) a 85% (0.7dB). A título de comparação mostramos também nesta tabela resultados obtidos de acopladores multimodos construídos em fase de otimização do sistema.

O ângulo de conicidade do acoplador, como foi citado, deve ser pequeno (de um modo geral se situam entre 0.1° e 0.3°); isto porque, se a conicidade for abrupta grande parte da potência anteriormente lançada na casca da fibra não retornará ao núcleo (variação cônica não adiabática) irradiando-se, causando grandes perdas. Na figura VI-a e VI-b mostramos uma foto de uma destas estruturas bem como sua secção reta.

a



b

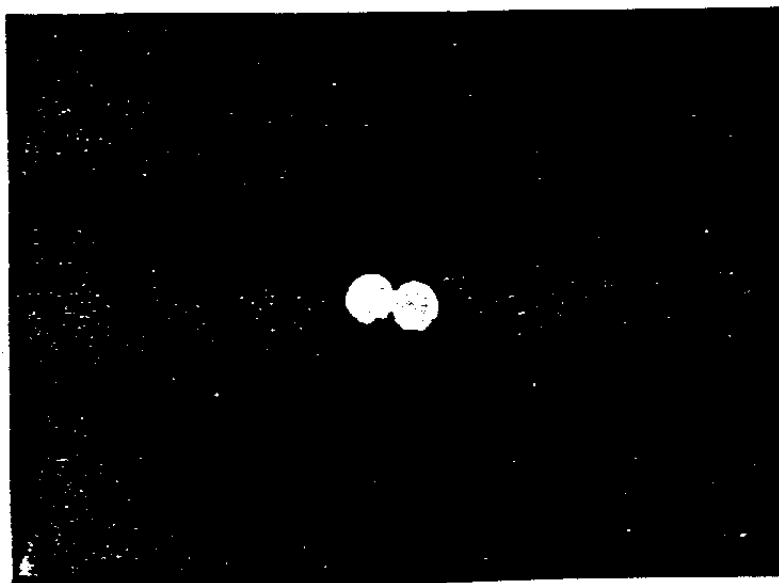


Fig. VI - a) Estrutura Bicônica - comprimento total de 12.5 mm e ângulo de conicidade de $\approx 0.12^\circ$

b) Secção transversal da estrutura bicônica. Diâmetro maior igual a 14.4 μm e diâmetro menor igual a 7.2 μm .

VI.1 Potência Acoplada X Tempo de Tracionamento

Estudos da potência acoplada com o comprimento da região fundida foram feitos monitorando as potências PC e PD durante o processo de fusão-tração. O resultado mostrado na figura VI1.1 indica que a potência inicialmente oscila na fibra lançante sem contudo haver nenhuma transferência de potência para a segunda fibra. Estas oscilações foram também detectadas em uma estrutura bicônica construída em uma única fibra e se deve ao batimento entre os modos excitados na fibra lançante. Deve-se lembrar que o comprimento de onda de corte λ_c para as fibras utilizadas na construção do acoplador é de aproximadamente $0.81 \mu\text{m}$ ao passo que o comprimento de onda de excitação da fibra é de $0.633 \mu\text{m}$ existindo assim outros modos além do modo fundamental. À medida que as fibras são tracionadas, ocorre uma interferência (batimento) entre estes modos fazendo com que potência seja transferida de um modo a outro. Entretanto, os modos de ordens mais altas tendem, com o decréscimo do raio do núcleo, a irradiarem-se para a casca de maneira que a potência existente nestes modos é perdida causando um mínimo na potência detectada. Por outro lado, se o tempo de interação entre estes modos for tal que (durante o processo de batimento) ao final deste tempo a potência se encontre somente no modo fundamental, não haverá perdas e a potência total detectada tem um máximo. Este comportamento oscilatório (batimento entre os modos) continua até que o tempo de puxamento atinja um limite em

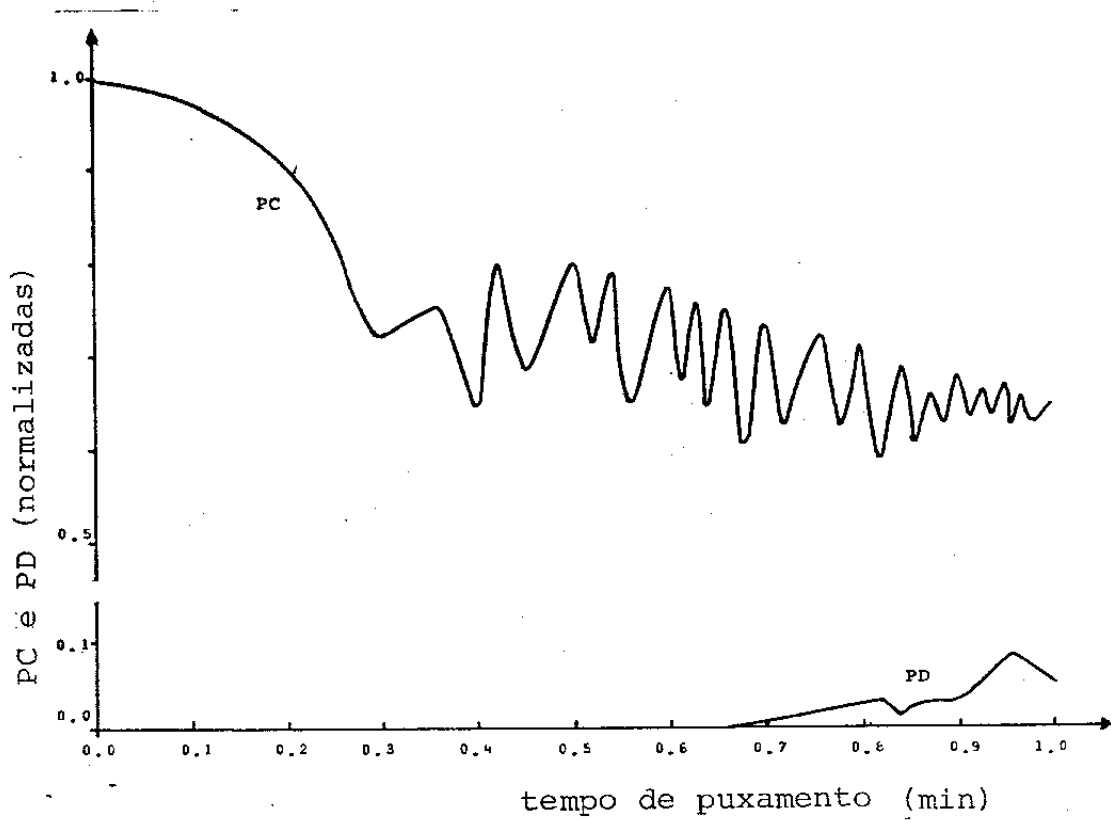


Fig. VII.1 - Oscilações das potências PC e PD com o tempo de puxamento. Nota-se nesta figura que em um tempo menor que 1.0 min. A potência PC oscila sem contudo haver transferência de potencia para a segunda fibra ($PD = 0$).

que o raio do núcleo assume valores a partir do qual a fibra passa a ser monomodo para o comprimento de onda de excitação.

A figura VII.2 mostra que a partir de determinado tempo em que as fibras estão expostas à fusão e ao tracionamento, a potência oscila entre elas com um período que diminui gradativamente com o aumento do tempo de puxamento. Este aumento, faz com que as dimensões transversais do acoplador diminuam, causando um aumento do coeficiente de acoplamento (ver equação 3.2.4) e, de acordo com as equações 2.2.6 e 2.2.7, o aumento de C leva ao comportamento oscilatório citado. Além deste, notamos na figura VII.2 dois outros comportamentos distintos. O primeiro é a diminuição do período de oscilação e o segundo, a tendência destas oscilações desaparecerem (PC e PD assumirem valores constantes) para tempos de puxamento longos. À medida que puxamos o acoplador, a interação entre os modos simétrico e anti-simétrico aumenta (aumento do coeficiente de acoplamento) fazendo com que potência seja transferida entre eles mais rapidamente (diminuição do comprimento de acoplamento) causando uma diminuição no período das oscilações de PC e PD. Por outro lado, ao puxarmos as fibras, criamos condições para que outros modos possam ser excitados na estrutura fazendo com que a potência se distribua entre eles, diminuindo a potência existente nos modos simétrico e anti-simétrico. Quanto mais puxamos as fibras, mais modos podem ser excitados na estrutura, de forma que uma proporção menor de potência se encontrará nos modos simétrico e anti-simétrico. Desde que o batimento entre estes modos é o responsável pelo comportamento oscilatório mostrado na figura VII.2, podemos concluir que estas os-

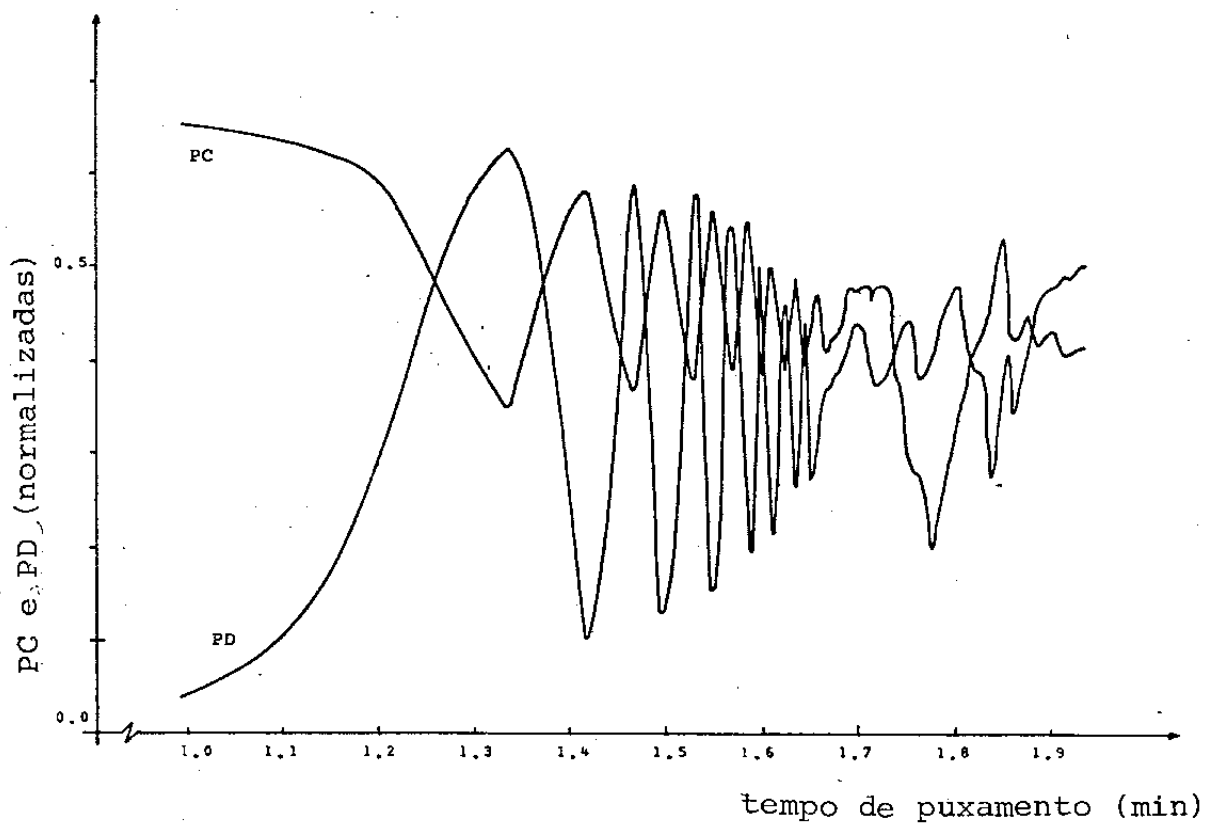


Fig. VII.2 - Continuação da Fig. VII.1 Observa-se que para um tempo superior a 1.0 min. a potência oscila entre os braços de saída do acoplador.

çilacões tendem a valores constantes para tempos de puxamento longos.

Observamos experimentalmente, que após retirarmos as chamas da região de fusão, as potências nas fibras não permanecem nos valores os quais se encontravam ao final do processo de fusão-tração dificultando assim a construção de acopladores com uma eficiência de acoplamento pré-determinada. Este fato, pode ser entendido, levando-se em conta a grande variação de temperatura a que sujeitamos a fibra com a retirada instantânea das chamas. Isto acarreta no aparecimento de microdeformações na estrutura bicônica relacionadas ao coeficiente de dilatação térmica do vidro. Estas microdeformações não chegam a alterar significativamente a perda do dispositivo, mas influencia de maneira marcante na sua eficiência de acoplamento (em um dado comprimento de onda).

VI.2 Potência Acoplada X Comprimento de Onda

A variação da potência acoplada com o comprimento de onda foi feita utilizando-se a montagem mostrada na figura VI2.1. Nesta montagem, um monocromador seleciona de uma fonte de luz branca o comprimento de onda a ser lançado no braço de entrada do acoplador. Um chopper é utilizado para converter o sinal DC da lâmpada em AC. Este procedimento torna-se necessário pois devido à baixa potência de emissão destas lâmpadas para a maioria dos comprimentos de onda, sua detecção necessita de um amplificador

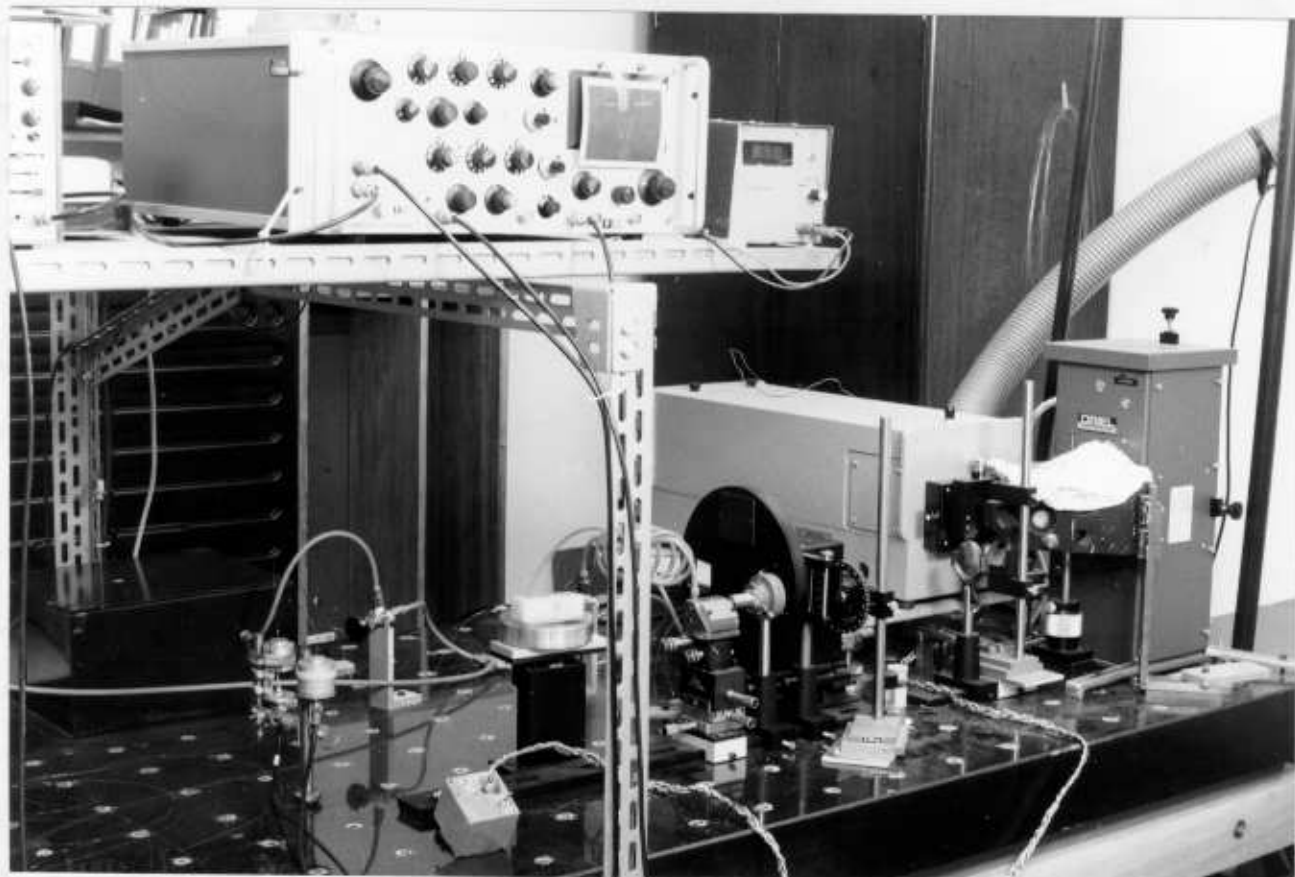


Fig. VI2.1 - Montagem experimental utilizada na caracterização dos acopladores em função do comprimento de onda.

Lock-In. O procedimento experimental para se efetuar as medidas, consiste em variarmos o comprimento de onda lançado no braço de entrada do acoplador com o auxílio do monocromador e detectarmos as potências nos braços de saída com detectores de silício ou germânio dependendo do comprimento de onda em questão. Estes sinais, são então amplificados e grafados com a ajuda do lock-in e de uma registradora. Desde que os níveis de potência emitidos pela lâmpada são distintos, torna-se necessário normalizá-los para observar-se o comportamento das potências PC e PD com o comprimento de onda. Os resultados experimentais obtidos são mostrados na figura VI2.2. Notamos na figura VI2.2 que transferências significativas de potência só acontecem para valores de $\lambda > 1.1 \mu\text{m}$. Isto ocorre pois só é possível haver transferência razoável de potência entre as fibras, quando o acoplador opera em regime quase monomodo ou seja, quando somente os dois modos de ordens mais baixas ψ_{\pm} estão presentes na estrutura. Para comprimentos de onda menores que $1.1 \mu\text{m}$, mais modos participam do processo de interferência (batimento), fazendo com que não haja oscilações significativas na amplitude da potência acoplada. Para comprimentos de onda maiores $1.1 \mu\text{m}$, a potência oscila entre 0.04 e 0.9.

Pelo modelo teórico, o período destas oscilações não permanece constante com a variação do comprimento de onda pois o coeficiente de acoplamento não é uma função linear de λ . Entretanto, como mostra a figura 3.2.3 da seção III, este comportamento só se manifesta de forma considerável em acopladores longamente puxados (valores pequenos de g). Desde que todos os acopladores construídos em nosso laboratório possuem valores de g maio-

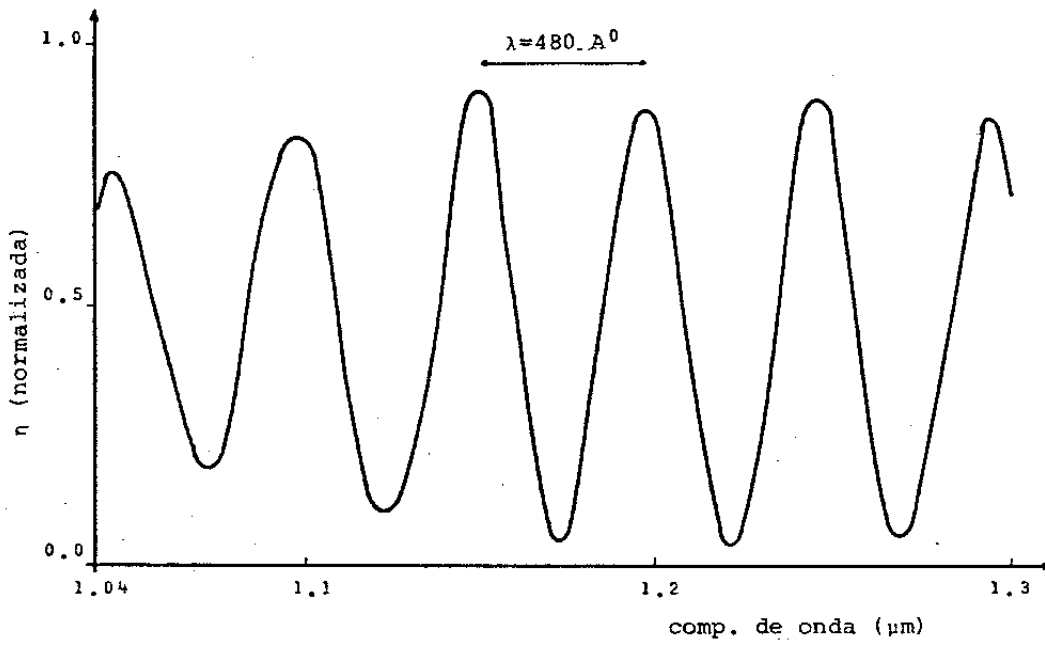


Fig. VI2.2 - Variação da eficiência de acoplamento com o comprimento de onda.

res que $10 \mu\text{m}$, esta previsão teórica não pode ser detectada na figura VI2.2 mas foi observada por Payne et al [22] em trabalhos recentes.

No decorrer destas medidas, notamos a existência de um comprimento de onda (não indicado na figura e aproximadamente igual a $1.44 \mu\text{m}$ para o acoplador da figura VI2.2) acima do qual o acoplamento deixa de existir. Este comportamento não pode ser totalmente explicado pelo modelo mas, acreditamos que para este valor de λ , é atingido o corte do modo Ψ^- .

Potência Acoplada X Índice de Refração (n_3)

De acordo com o modelo teórico, o comportamento das potências PC e PD na saída do acoplador devem ser fortemente dependentes do índice de refração do meio externo (n_3). Podemos assim, utilizando uma montagem experimental apropriada, comprovar esta expectativa teórica.

Para efetuarmos tais medidas, utilizamos a variável temperatura como meio de alterarmos o índice de refração externo ao acoplador. Isto foi implementado inserindo um óleo de glicerina (glicerol) cujo índice de refração e coeficiente de temperatura são conhecidos, dentro da caixa de proteção do acoplador. A temperatura do óleo é alterada com o auxílio de um aquecedor elétrico o qual permite variações de temperatura até 500°C a partir da

temperatura ambiente. Estas variações são detectadas por um termopar de platina (colocado cuidadosamente dentro da caixa de proteção do acoplador). Este termopar, está ligado a um dispositivo que converte sua tensão diretamente em $^{\circ}\text{C}$. Com isto, podemos monitorar a temperatura em que se encontra o óleo a cada instante. A mudança de índice de refração correspondente pode ser calculada a partir da expressão:

$$n(T) = n(T_0) - \alpha (T - T_0)$$

Onde T corresponde a temperatura em que se deseja conhecer o índice de refração, T_0 é a temperatura no início do processo de aquecimento e α o coeficiente de temperatura definido por:

$$\alpha = - \frac{dn(T)}{dT} \quad (1/^{\circ}\text{C})$$

Para a glicerina, temos:

$$n(T_0) = 1.470$$

$$\alpha = 0.00022 \quad (1/^{\circ}\text{C})$$

Em nossas experimentações foram utilizados um laser de He-Ne, dois detectores de silício, um detector de temperatura (trendicator + termopar), um aquecedor elétrico e dois medidores de tensão. O arranjo experimental utilizado para efetuarmos tais medidas é mostrado na figura VI3.1. O procedimento experimental

consiste em colocarmos o acoplador sobre a placa do aquecedor. O termopar inserido na cavidade da caixa de proteção do acoplador detecta a temperatura do líquido. As potências PC e PD são monitoradas simultaneamente ao aquecimento do óleo e seus valores lidos nos medidores de tensão. A figura VI3.2 mostra um conjunto destas medidas. De acordo com esta figura, as potências PC e PD oscilam com a variação do índice de refração com a potência total permanecendo constante até valores próximos a 1.456 quando então as mesmas caem abruptamente a zero. Isto evidencia que nesta estrutura, a condição de guiamento foi quebrada deixando claro então que a mesma se comporta como uma estrutura cujo índice de refração do núcleo é o mesmo que o da casca das fibras usadas na construção do acoplador e o índice de refração da casca igual ao do meio externo ao acoplador. Este resultado confirma a validade do modelo proposto para explicar a transferência de potência em acopladores fundidos.

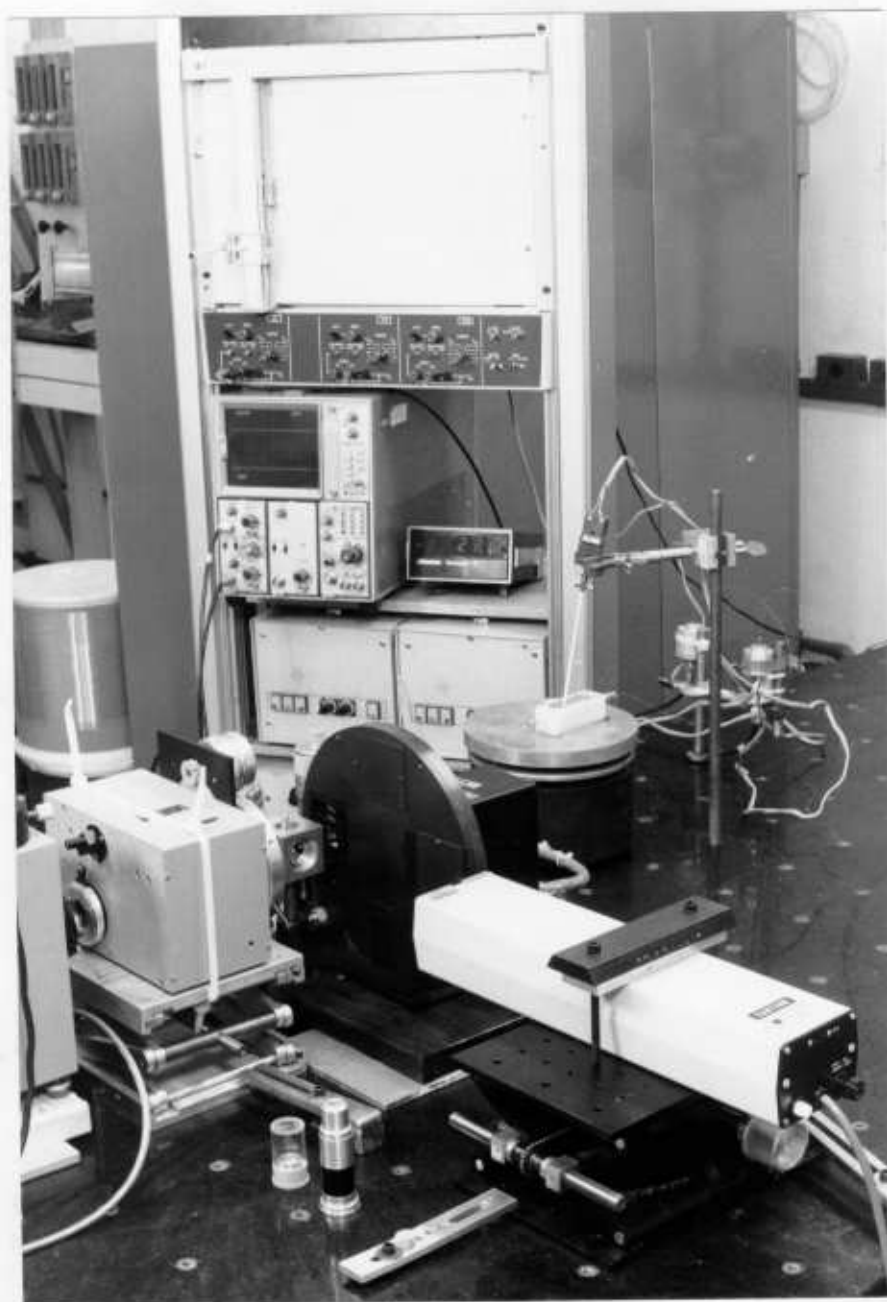


Fig. VI3.1 - Montagem experimental utilizada na caracterização dos acopladores em função do índice de refração do meio externo (n_3).

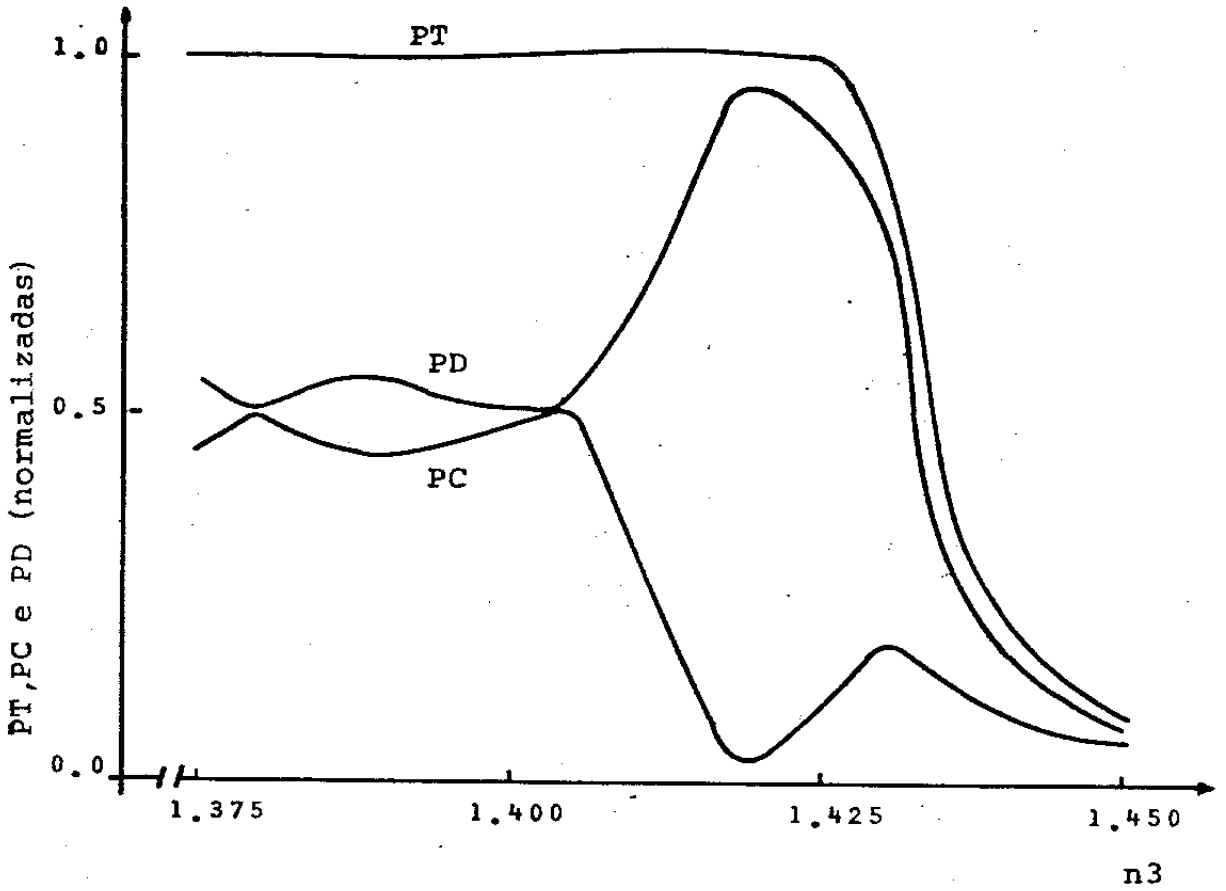


Fig. VI3.2 - Variação das potências PT, PC e PD com o índice de refração do meio externo (n_3).

CONCLUSÃO

Estudamos neste trabalho os aspectos teóricos e experimentais dos acopladores direcionais de fibras óticas monomodo produzidos pela técnica de fusão.

Uma montagem experimental foi implementada para tornar possível a construção e estudo destes acopladores. Nesta montagem, dois problemas básicos foram detectados; o primeiro envolve o sistema de alinhamento (alinhamento crítico das agulhas por onde passarão as fibras a serem fundidas) e o segundo o sistema de fusão (difícil controle da temperatura na região de fusão e fusão de impurezas provenientes do gás). Estes problemas estão ligados diretamente à simetria e a homogeneidade da estrutura fundida. Outro problema encontrado nesta montagem é o difícil controle da eficiência de acoplamento dos acopladores construídos; problemas este que pode ser minimizado automatizando o sistema. Com a montagem experimental descrita neste trabalho, conseguimos construir vários acopladores com figuras de mérito que superam as expectativas. Entretanto, a reprodutibilidade dos resultados deixou a desejar indicando a necessidade de melhorias no sistema. Os desempenho de alguns acopladores mostrados na tabela 1, indicam que estes dispositivos podem ser construídos com baixas perdas e com eficiências de acoplamento arbitrárias.

Dentro dos aspectos teóricos, um modelo proposto por Bures et al [8] supõe que o guiamento nestas estruturas fundidas se faz pela casca das fibras usadas na fusão, e o processo de trans-

ferência de potência entre elas se dá pelo batimento dos dois modos de mais baixa ordem desta estrutura. De acordo com este modelo, deve-se esperar uma forte dependência da potência acoplada com o índice de refração do meio externo à estrutura fundida (n_3). Os resultados experimentais indicados na figura VI3.2 mostram que a potência acoplada inicialmente oscila com a variação do índice de refração n_3 . Entretanto, quando n_3 se aproxima do valor do índice de refração da casca das fibras utilizadas na fusão (n_2) as potências caem a zero, evidenciando assim uma quebra na condição de guiamento nestas estruturas deixando claro que nas mesmas, os modos ψ_{\pm} são guiados pela casca das fibras fundidas. O comportamento oscilatório da potência acoplada, com o índice externo às fibras sugere uma possível utilização destes acopladores como chaves óticas, caso se possa variar este índice de maneira controlada e rápida.

A dependência da eficiência de acoplamento com o comprimento de onda, conforme mostrado na figura VI2.2, determina um caráter seletivo para estes acopladores. O comportamento oscilatório da potência acoplada com o comprimento de onda, semelhante ao previsto pelo modelo teórico, indica a possibilidade de utilização de tais dispositivos como sistemas de multiplexação e demultiplexação em comprimentos de onda (M-D). Estes sistemas (M-D) quando implementados aos sistemas de comunicações óticas, aumentam a capacidade de transmissão dos sistemas óticos, permitindo a comunicação em vários comprimentos de onda no mesmo sentido ou em direções opostas.

A excitação de modos de mais alta ordem no acoplador

perturba a hipótese de batimento entre somente dois modos. Quando mais modos estão presentes na estrutura, a potência se distribui entre eles de maneira que, as oscilações devido ao batimento dos modos de mais baixa ordem não ocorrem como previsto pelo modelo teórico.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Deixamos como sugestão para trabalhos futuros em acopladores fundidos os seguintes itens:

- Investigação de outras fontes de calor tais como lasers e arco elétrico que permitem uma fusão mais controlada. Aperfeiçoamento da fusão com chamas.

- Estudos sobre novos meios de tracionamento das fibras durante a fusão para um controle efetivo da geometria do acoplador.

- Estudos sobre características de polarização em acopladores.

- Desenvolvimento de uma teoria mais elaborada para cálculo de perda em acopladores em função dos parâmetros físicos como geometria, índice de refração do meio externo e outros.

REFERENCIAS

- 1 - S. K. Sheem e T. G. Giallorenzi, Opt. Lett., 4, 29-30 (1979)
- 2 - F. J. Liao e J. T. Boyd, Appl. Opt., 20, 2731-2734, (1981)
- 3 - R. A. Berg, G. Kottler e H. J. Shaw, Eletron. Lett., 16, 260-261 (1981)
- 4 - M. J. F. Digonnet e H. J. Shaw, IEEE Journ. Quant. Elet , QE-18, 746-754 (19982)
- 5 - B. S. Kawasaki e K. O. Hill, Appl. Opt., 16, 1794-1795 (1977)
- 6 - B. S. Kawasaki, K. O. Hill e R. G. Lamont, Opt. Lett., 6, 327-328 (1981)
- 7 - C. M. Regdale, D. N. Payne, F. de Fornel e R. J. Mears, IEEE Conference Publication nº 221 on "Optical Fibre sensor". London, 26-28 april, 1983
- 8 - J. Bures, S. Lacroix e Jean Lapierre, Appl. Opt., 22, 1918-1922 (1983)
- 9 - C. M. Lawson, P. M. Kopera, T. Y. Hsu e V. J. Tekl, Eletron. Lett., 20, 963-964 (1984)
- 10- M. Digonnet e H. J. Shaw, Appl. Opt., 22, 484-491 (1983)
- 11- Giallorenzi et al, IEEE Journ. Quant. Elet., QE-18, 626-665 (1982)
- 12- Dietrhich Marcuse, "Light Transmission Optics", Van Nostrand Reinhold Company, 1982

- 13- N. S. Kapany e J. J. Burke, "Optical Waveguides", Academic Press, 1972
- 14- J. Gowar, "Optical Communication Systems", Prentice-Hall International, 1984
- 15- S. E. Miller e A. G. Chynoweth, "Optical Fiber Telecommunications", Academic Press, 1979
- 16- M. Abramowitz e I. A. Stegun, "Handbook of Mathematical Functions", Appl. Math. Ser., nº 55, Nat. Bur. Stand., 1964
- 17- S. Celaschi e F. M. Smolka, Revista da Telebrás (a ser publicado)
- 18- J. D. Love e A. Ankiewicz, Eletron. Lett., 20, 362-363 (1984)
- 19- A. W. Snyder e F. F. Hull, IEEE Journ. Light Wave Techn., LT-3, 31-36 (1985)
- 20- T. Findakly e Chin-Lin Chen, Appl. Opt., 17, 769-773 (1983)
- 21- O. Parriaux, S. Gidon e A. A. Kuznetsov, Appl. Opt., 20, 2420-2423 (1981)
- 22- O. Parriaux, F. Bernoux e G. Chartier, Journ. Opt. Comm., 105-109, 2(1983)3
- 23- F. P. Payne, C. D. Hussey e M. S. Yataki, Eletron. Lett., 21, 461-462 (1985)
- 24- E. A. J. Marcatili, "The Bell System Technical Journal", september (1969)