

## Medidas do Coeficiente de Conversão de Modos em Fibras Óticas Multimodo

HARISHR. D. SUNAK e JOÃO BATISTA DE M. A. NETO

*Instituto de Física, UNICAMP, Campinas*

Recebido em 19 de Setembro de 1978

In order to initially assess the quality of optical fibres we are now producing routinely in our laboratories, we have carried out preliminary measurements, with a very simple system, and calculated the normalised mode conversion coefficient ( $D$ ). The values obtained are of the order of  $2 \times 10^{-5} \text{ rad}^2 \text{ m}^{-1}$  for our fibres and these compare very favourably with the results obtained in other laboratories.

Para avaliarmos a qualidade de fibras óticas que estamos produzindo rotineiramente em nossos laboratórios, temos concluído medidas preliminares com um sistema muito simples, e calculado o coeficiente de conversão de modos normalizados ( $D$ ). Os valores de  $D$  obtidos para nossas fibras são da ordem de  $2 \times 10^{-5} \text{ rad}^2 \text{ m}^{-1}$ , muito bons se comparados com os resultados obtidos em outros laboratórios.

### 1. INTRODUÇÃO

É bem sabido e completamente claro, que sistemas de comunicações por fibras óticas estarão sendo usados extensivamente num futuro próximo (ver, por exemplo, ref. 1). Como em outros países também temos um programa a seguir (ver, por exemplo, ref. 2,3 e 4) para desenvolver tais sistemas. A avaliação das fibras produzidas é de máxima importância e é feita medindo-se<sup>5</sup>, por exemplo, as seguintes propriedades: (i) atenuação em função do comprimento de onda; (ii) perfil de índice de refração; (iii) dispersão<sup>6</sup>; (iv) geometria da fibra, etc.

Um teste inicial de fibras é bastante usado, é incidir a luz visível de um laser, e.g. um laser He-Ne, e observar o espalhamento que

ocorre. O espalhamento, completamente uniforme, sem qualquer centro brilhante de grande espalhamento, implica que a fibra foi puxada sem grandes defeitos. Certamente isto é apenas qualitativo e algum método de obter resultados quantitativos é desejável. Gambling et al.<sup>7</sup> desenvolveram um método, de fato muito simples, e usamos a mesma técnica para determinarmos os coeficientes de conversão de modos em nossas fibras multimodo de núcleo com índice de refração constante (step-index), além de concluirmos outras medidas mencionadas acima.

conversão de modos numa fibra pode ocorrer devido a: (i) inhomogeneidades; (ii) imperfeições geométricas; (iii) microcurvaturas causadas por pressão externa e devido a imperfeições do carretel de suporte em que a fibra está enrolada; (iv) curvatura de grande escala na fibra, etc. Então ocorre uma troca nas potências de cada modo propagado. Isto implica que a distribuição de intensidade na saída da fibra pode ser totalmente diferente daquela na entrada. Medida de conversão de modos é importante pois afeta diretamente a largura de banda de uma fibra.

## 2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O método desenvolvido por Gambling et al.<sup>7</sup> será discutido aqui brevemente. Como mostra a fig.1, se um feixe de luz estreito e paralelo é lançado sobre uma fibra perfeita com um ângulo de incidência  $\theta_i$ , a saída na outra extremidade da fibra consiste dum anel tendo o mesmo ângulo de saída  $\theta' = \theta_i$  em relação ao eixo da fibra. Se a fibra tem muitas imperfeições e caracteriza-se por grande conversão de modos, a forma da saída é completamente independente das condições de incidência na entrada. Para fibras com conversão parcial de modos, quando  $\theta_i$  é reduzido, aí ocorre um ponto em que a forma de anel muda para um disco, i.e. a distribuição angular na saída tem o primeiro máximo no eixo da fibra. Quando isto ocorre, Gambling et al.<sup>7</sup> mostraram que

$$\log \theta_0 = \frac{1}{2} \log L + \log 2D^{1/2} \quad (1)$$

onde  $\theta_0$  = ângulo de incidência na entrada da fibra, em que a transição

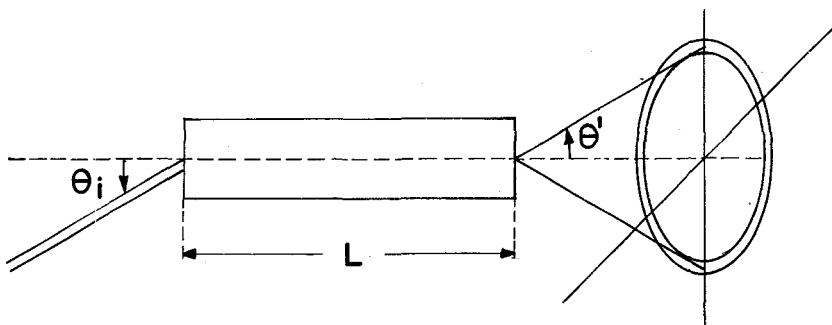


Fig.1 - Esquema do método usado para medir o coeficiente de conversão de modos em fibras ópticas.

acima ocorre, medido em radianos;  $L$  = comprimento da fibra em metros;  $D$  = coeficiente de conversão de modos normalizados em  $\text{rad}^2\text{m}^{-1}$ .

Então medindo  $\theta_0$  para cada fibra de comprimento conhecido  $L$ , podemos calcular  $D$  da relação na equação (1) acima, i.e.

$$D = \frac{\theta_0^2}{(4L)} \text{ rad}^2 \text{ m}^{-1} \quad (2)$$

### 3. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem usada para medir  $\theta_0$  é mostrada na fig.2. A saída dum laser He-Ne é acoplada à fibra através dum lente de 5mm de diâmetro e distância focal de 60mm. A extremidade de entrada da fibra é montada no centro de um suporte angular, tal que o ângulo de incidência  $\theta_0$  pode ser variado sem a necessidade de reajustes. O suporte com liberdade angular é montado sobre um microposicionador X-Y-Z, capaz dum resolução de 2  $\mu$  m, permitindo uma incidência precisa e fácil otimização. A fibra é normalmente enrolada num carretel suporte de 20cm de diâmetro. Na extremidade de saída da fibra, a aproximadamente 15 mm dela, está colocado um detector com uma abertura de 0,5mm em frente. O detector também está montado sobre um microposicionador X-Y-Z, que pode ser ajustado manualmente ou automaticamente por micromotores. O sinal do detector é lido num medidor de potência (da Coherent Radiation, modelo

212). Este arranjo ajuda na otimização. O medidor tem uma saída de sinal que é ligada à entrada de varredura Y de uma registradora X-Y. O eixo X é controlado por um simples gerador de rampa que estabelece a varredura no sentido X a ser efetuada de 2 a 20 minutos.

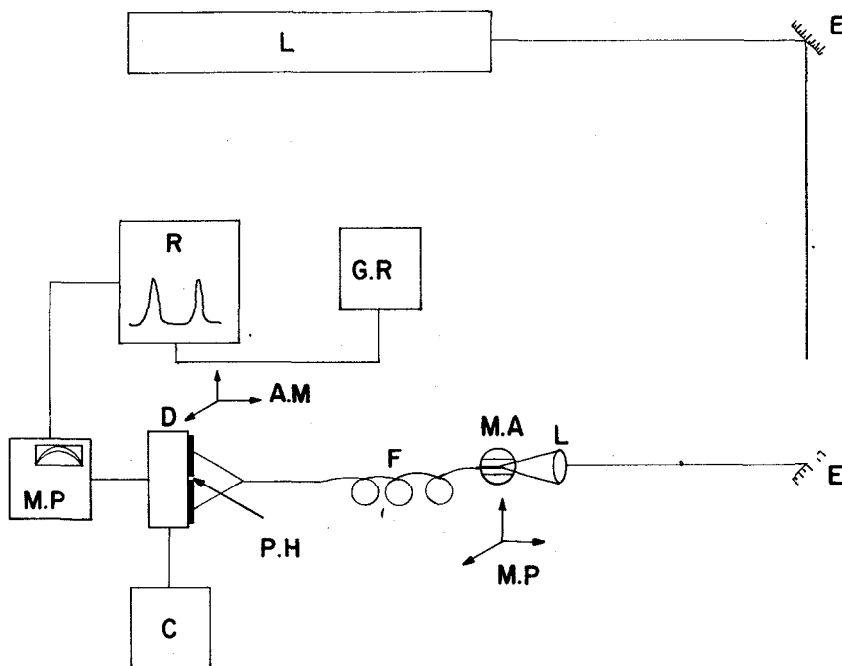


Fig.2 - Montagem experimental usada para medir o coeficiente de conversão de modos: L - laser de He-Ne da Spectra Physics 125A; E - espelhos; T - tela; L - lente; MA - suporte angular para variação do ângulo de incidência; MP - microposicionador sobre o qual está montado o MA; F - fibra em análise; D - detector de grande área ativa; PH - pín-hole (abertura) de 0.5mm montada em frente de D; C - controle para ajustes motorizados (AM) nas direções X-Y-Z; MP - medidor de potência; GR - gerador de rampa para registradora R - registradora.

#### 4. PROCEDIMENTO DE MEDIDAS E CUIDADO NECESSÁRIO

As extremidades da fibra são cuidadosamente preparadas, usando para isso, uma máquina própria para quebrar fibras, construída segundo o princípio demonstrado por Gloge et al<sup>3</sup>. As extremidades quebradas são examinadas num microscópio, tendo-se o cuidado para que nenhuma su-

jeira se acumule nessas extremidades, nem sejam tocadas. Estas são então colocadas em suas respectivas posições, e, com ângulo de incidência normal, é feita a otimização para máxima saída de luz na saída, fazendo-se a leitura no medidor de potência. A seguir, o ângulo de incidência é aumentado até que um grande anel seja claramente observado na saída da fibra. Pelo devido posicionamento da abertura do detetor, a otimização é feita novamente, se necessária, devido a pequenos desvios da extremidade de entrada da fibra em relação ao centro do suporte angular. É possível agora obter um traçado da forma de radiação emergindo na saída da fibra e isto é feito da seguinte maneira.

Considere que obtemos uma forma ideal de anel na saída da fibra como mostra a fig. 3(a). A distância  $AA'$ , entre os picos de intensidade máxima, é primeiro medida. Desde que a forma do anel é simétrica, o eixo da fibra está em  $X$ , onde  $AX = A'X$ . A abertura é colocada em  $X$  por translação manual. Determinação do eixo da fibra é de fundamental importância neste experimento para obtermos o ângulo de transição na entrada da fibra. A translação motorizada (TM) tem um deslocamento máximo de 10 mm. Quando a abertura está em  $X$ , o micrômetro da TM, no sentido  $X$ , está posicionado em 5 mm, colocado previamente. É agora movido para 0 (zero) para começar o traçado no ponto  $B$ , como mostra a fig. 3(b). Quando o TM começa a varredura em  $B$ , o gerador de rampa aciona o

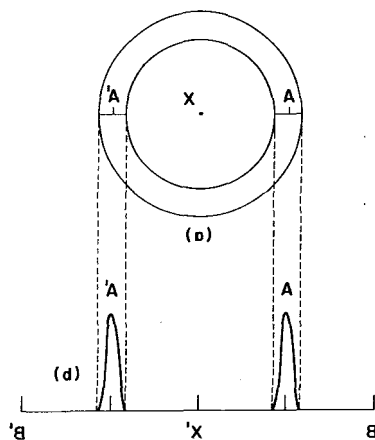


Fig.3 - Esboço de uma forma de saída ideal: a) distribuição espacial em forma de anel; b) intensidade x distância do eixo da respectiva forma de anel.

eixo X do registrador X-Y. Assim que o TM percorre os 10 mm, o registro é interrompido, correspondendo ao ponto B' no gráfico traçado tal que a posição do eixo da fibra está em X', onde  $BX' = B'X'$ .

Obtivemos outros traçados reduzindo o ângulo de incidência e sempre começando em B e terminando em B'. Desde que a posição X' é a mesma para uma fibra particular montada, determinamos o ângulo de transmissão na entrada ( $\theta_0$ ) quando obtivermos pela primeira vez a máxima intensidade em X'. Para medir  $\theta_0$  exatamente, observamos a luz refletida da extremidade de entrada da fibra sobre uma tela T (fig. 2). O ângulo  $\theta_0$  é a metade do ângulo medido entre o feixe de luz refletida pela fibra e o feixe de luz incidente. Uma mancha circular bem definida sobre a tela de luz refletida, também ajuda a identificar uma extremidade boa e lisa para entrada da fibra, posicionando este exatamente no foco da lente L.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fizemos medidas numa série de fibras mas descrevemos aqui alguns resultados obtidos numa seleção delas. A tabela I contém um sumário das características de quatro fibras e a tabela II os resultados obtidos com estas fibras, juntamente com os valores de D calculados. A fibra n° 1 foi doada pelo "Centre National d'Études des Télécommunications" (CNET) em Lannion, França. As outras foram feitas no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Telebrás, em Campinas, SP.

As fibras da Telebrás são feitas por oxidação de cloretos de sílica e germânio a alta temperatura ( $\sim 1300^\circ\text{C}$ ). Os óxidos assim formados, são depositados em forma de partículas, na superfície interna de um tubo de sílica. Após a deposição, as partículas são fundidas para formar uma camada muito fina de vidro de germano-silicato. O processo de oxidação e deposição subsequente é repetido até que a espessura desejada seja obtida (em relação ao diâmetro do núcleo desejado na fibra). Este tubo composto é então fechado para formar um cilindro que consiste de vidro sílica comercial externamente e de vidro de germano-silicato de alta pureza no interior. Este cilindro chama-se preforma desde que possui a mesma estrutura de uma fibra Ótica, que é, um núcleo de vidro

Tabela I - Características de algumas fibras "step-index" investigadas.

Nº	Tipo de fibra	Diâmetro da fibra - $\mu\text{m}$	Diâmetro do núcleo - $\mu\text{m}$	Abertura numérica (N.A.)	Atenuação a 850nm db/km
1	CNET	96	44	0.21	-10
2	TELEBRÁS (Nº 28)	180	60	0.25	9.6
3	TELEBRÁS (Nº 50)	120	40	0.30	10.1
4	TELEBRÁS (Nº 49)	100	20	0.16	10.4

Tabela II - Sumário dos resultados obtidos

Nº	Tipo de fibra	Comprimento de fibra L, metros	Angulo de transição $\theta_0$ , rad.	Coeficiente de conversão de modos $D$ , $\text{rad}^2\text{m}^{-1}$ ( $\times 10^{-5}$ )	Coeficiente angular na Figura 5
1	CNET	21	0.068	5.3	0.49
		10	0.045	5.1	
		5	0.032	5.1	
2	TELEBRÁS (Nº 28)	59	0.062	1.6	-
		59	0.082	2.8	
3	TELEBRÁS (Nº 50)	40	0.064	2.5	0.58
		20	0.044	2.4	
		200	0.123	1.9	
4	TELEBRÁS (Nº 49)	90	0.092	2.4	0.44
		60	0.074	2.3	
		45	0.066	2.4	

com baixa atenuação rodeado por uma casca de outro vidro com índice de refração menor. A preforma é finalmente puxada em fibra, por uma máquina própria, onde a ponta da preforma é fundida, em torno de  $1600^{\circ}\text{C}$ , e um tambor giratório puxa a fibra com precisão, enrolando-a em sua superfície.

A fig. 4 ilustra as formas de saída observadas. Na fig. 4(a) o ângulo de incidência na entrada é grande ( $\theta_i > \theta_0$ ), então a forma de anel é observada, enquanto na fig. 4(b) vemos a forma de um disco pois o ângulo de incidência é menor que o ângulo de transição ( $\theta_i < \theta_0$ ). Observando cuidadosamente, podemos ver a intensidade dos lobos dos vã-



a



b

Fig.4 - Formas de saída de uma fibra observada: a)  $\theta_i > \theta_0$  ; b)  $\theta_i < \theta_0$ .



rios modos que se propagam. Estes tornam-se muitos evidentes se a tela de observação é colocada a 1 metro da extremidade da fibra. Também podemos ver pequena quantidade de luz dentro da forma de anel e fora do disco. Isto é devido à conversão de modos na fibra.

A fig. 5 mostra o gráfico traçado da intensidade na saída x distância (ao longo do eixo), obtida com 21 m de fibra  $n \approx 1$  para três diferentes ângulos de incidência. A fig. 5(c) mostra o gráfico em que a máxima intensidade coincide com o eixo da fibra, tal que o ângulo de incidência  $\theta_0$  corresponde ao de transição para esta fibra. A posição do eixo da fibra X e o ângulo de incidência na entrada da fibra  $\theta_i$  também é mostrado para cada caso. A escala horizontal em cada gráfico não é similar. Não nos preocupamos em calibrá-las, pois estamos interessados somente em observar os picos de maior intensidade em relação ao eixo da fibra. Pode ser visto claramente, que além dos picos de maior intensi-

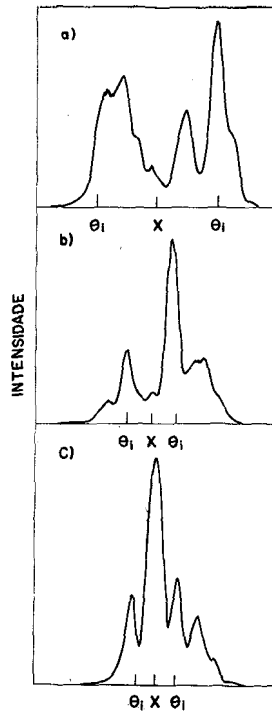


Fig.5 - Medidas da intensidade de saída, obtidas para três  $\theta_i$  na fibra CNET, de comprimento 21m (X é a posição do eixo da fibra): a)  $\theta_i = 0,11$  rad ; b)  $\theta_i = 0,086$  rad ; c)  $\theta_i = 0,068$  rad ( $\theta_i = \theta_0$  neste caso).

dade, existem pequenos picos subsidiários. Isto mostra a conversão de modos vizinhos muito próximos. Os resultados obtidos com outras fibras são mostrados na tabela II.

Para verificar a predição da equação (1), traçamos  $\log \theta_0$  versus  $\log L$  para as fibras de nºs 1, 3 e 4 como mostra a fig. 6, com valores de  $L$  variando de 5 a 200 metros. Pode ser visto que todos os coeficientes angulares estão próximos a 0,5 como foi predito pela equação (1). Este bom acordo da teoria com o experimento também foi encontrado por Gambling et al<sup>7</sup>. Certamente nossas medidas revelam que os coeficientes de conversão de modos de nossas fibras de sílica ( $D \sim 2 \times 10^{-5} \text{ rad}^2 \text{m}^{-1}$ ) são aproximadamente uma ordem de grandeza menor que as fibras mencionadas pelos autores em seu artigo<sup>7</sup> ( $D \sim 4 \times 10^{-4} \text{ rad}^2 \text{m}^{-1}$ ).

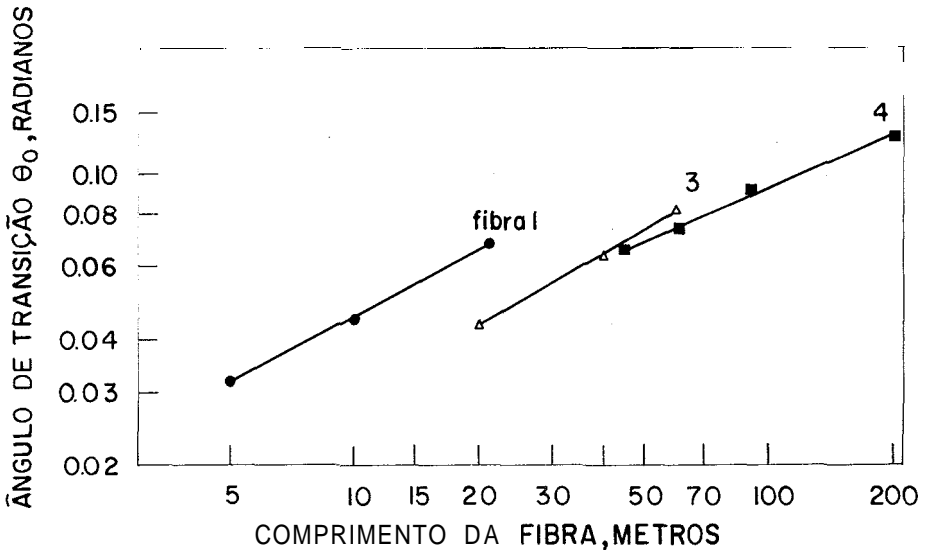


Fig.6 - Ângulo de transição em função do comprimento da fibra para três fibras diferentes.

Também temos testado nossas fibras medindo dispersão no domínio temporal, usando pulso de 0,5 ns de um laser de GaAs e um fotodiodo avalanche de silicium como detector. Em medidas preliminares, detectamos uma dispersão de ~1 ns em 60 m de fibra. Estes resultados serão assunto de uma futura publicação<sup>9</sup>.

## 6. CONCLUSÃO

Fizemos medidas do coeficiente de conversão de modos usando uma montagem experimental muito simples. Os valores de  $D$  obtidos são da ordem de  $2 \times 10^{-5} \text{ rad}^2 \text{m}^{-1}$  e muito bons se comparados com os resultados obtidos em outros laboratórios.

Somos gratos à Telecomunicações Brasileiras S/A (TELEBRÁS) por financiar este trabalho; aos Srs, Sirlei Rodrigues de Almeida e José Pedro de Alcântara pela fabricação das preformas e pelo puxamento das fibras. Desejamos agradecer também ao Dr. A. Cozannet do Centre National d'Études des Télécommunications (CNET) da França, por oferecer uma das fibras testadas. Um de nós, (J.B.M.A.Neto) agradece à FAPESP, da qual é bolsista de Mestrado.

## REFERÊNCIAS

1. a) Proceeding of the International Conference on Integrated Optics and Optical Communications, Japão, julho 1977. b) R. Gundlack, "Fiber-optic developments spark worldwide interest", Electronics, 49 (16), 81-104, agosto 5, 1976.
2. L.Koronajczwk e H.M.M.Graciosa, "Pesquisa e desenvolvimento em transmissão", Revista Telebrás, ano 1, n° 4, 30-34, outubro 1975.
3. B.M.Kale, J.E.Moore, J.M.L.Costa, "Fibras Óticas e suas aplicação às comunicações", Nova Eletrônica, n° 9, 40-43 e n° 10, 42-44, 1977.
4. E.Bochove, W.Meyer, J.E.Moore, "Light propagation properties of graded index fibers for optical communication", Rev.Bras.de Física, 7 (3), 511-540, dezembro 1977.
5. M.K.Barnoski e S.D.Personick, "Measurements in fibre optics", Proceedings of the IEEE, 66 (4), 429-441, abril 1978.
6. H.R.D.Sunak, "Experimental study of pulse dispersion in multimode optical fibre waveguides", Ph.D. Thesis, Universidade de Southampton, Southampton, U.K., 1975.
7. W.A.Gambling, D.N.Payne, H.Matsumura, "Mode conversion coefficients in optical fibres", Applied Optics, 14 (7), 1538-1542, julho 1975.

8. D.Gloge, P.W.Smith, D.L.Bisbee, E.L.Chinnock, "Optical fibre end preparation for low-loss splices", Bell System Technical Journal, 52 (9), 1579-1588, novembro 1973.
9. H.R.D.Sunak, J.B.M.A.Neto, "Measurements of pulse dispersion in optical fibres", a ser publicado.