

28

"COMPARAÇÃO ENTRE ALGUMAS TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO
DO PERFIL DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO EM FIBRAS ÓTICAS"

WALTER LUIZ DE ANDRADE CARVALHO

ORIENTADOR: PROF. DR. RAMAKANT SRIVASTAVA

Tese apresentada ao Instituto de
Física "Gleb Wataghin" como re-
quisito parcial para a obtenção
do Título de Mestre em Ciências.

Maio 1978

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Ramakant Srivastava, pelo auxílio inestimável.

A todo pessoal do Projeto de Fibras Óticas, que de várias formas colaborou para a elaboração deste trabalho.

Ao Paulinho pelos desenhos e à Márcia pela datilografia.

A todos aqueles que colaboraram cedendo o equipamento necessário ao trabalho.

Ao CNPQ e à TELEBRAS, que possibilitaram este trabalho.

A Suzy, pela paciência.

RESUMO

Neste trabalho fazemos um estudo de alguns métodos de determinação do perfil de índice de refração em fibras óticas. É dada ênfase especial ao método de campo próximo, em que apresentamos vários resultados de medidas com dois tipos de fibras. É feita uma análise dos fatores que influenciam o método, especialmente da influência dos modos vazantes. São feitas medidas também com as técnicas de Campo Próximo Modificado e Refletividade. Finalmente, são feitas comparações entre os métodos.

INDICE

Introdução	1
Capítulo I. <u>Generalidades</u>	
1. Tipos de fibras	3
2. Características da transmissão em fibras	4
Capítulo II. <u>Preparação e caracterização geométrica das amostras</u>	
1. Introdução	8
2. O método da quebra sob tensão	
a) Fraturas em bastões de vidro	8
b) A máquina de quebrar fibras	10
3. O polimento	12
4. Medidas dos diâmetros da casca e do núcleo	13
5. Medidas da abertura numérica	13
Capítulo III. <u>O método do Campo Próximo</u>	
1. Introdução	15
2. Os raios vazantes	16
3. A montagem experimental	20
4. Procedimento experimental	21
5. Resultados e discussão	23
Capítulo IV. <u>Outros métodos utilizados</u>	
I. <u>O método da Refletividade</u>	
1. Introdução	39
2. A montagem experimental	39
3. O procedimento experimental	41
4. Resultados e discussão	44
II. <u>O método do Campo Próximo Modificado</u>	
1. Introdução	47
2. A montagem experimental	48
3. O procedimento experimental	49
4. Resultados e discussão	50

Capítulo V. Conclusão

- 1) Vantagens e desvantagens de cada processo
 - A) Interferometria 56
 - B) Refletividade 56
 - C) O Campo Próximo 57
 - D) O Campo Próximo Modificado 58
- 2) Comparação entre os métodos 58
- 3) Propostas para trabalhos futuros 59

Bibliografia 60

INTRODUÇÃO:-

Nos últimos anos, o mundo tem assistido a um tremendo esforço de pesquisa no campo das comunicações óticas.

Os trabalhos iniciais em fibras óticas visavam apenas a sua utilização como transmissores de imagens óticas, e as perdas eram bastante elevadas {20}. Mas, com o advento dos lasers de semicondutores {1} Kao e Hockham {19} reconheceram a possibilidade de sua utilização em sistemas de comunicações e provaram a viabilidade da obtenção de fibras com perdas muito pequenas. A partir de então, os processos de fabricação de fibras óticas melhoraram sensivelmente e hoje em dia falamos em fibras com perdas inferiores a 1 db/km no infravermelho próximo. Os estudos das características de propagação em fibras tornaram-se importantes tanto para o controle da fabricação das fibras como para o desenho de sistemas. Atualmente, está em curso, em vários centros do mundo, o desenvolvimento de sistemas completos de comunicações óticas que apresentam grandes vantagens sobre os sistemas convencionais, tais como: menor peso, imunidade à interferência, maior largura de banda, baixa perda.

No Brasil tivemos, em 1975, o início das atividades em Fibras Óticas no Instituto de Física Gleb Wataghin, sob o patrocínio da Telebrás. O trabalho do grupo visa tanto a obtenção de fibras com poucas perdas, como a compreensão dos mecanismos de propagação em fibras e as influências que sofrem dos processos de fabricação.

Neste trabalho procuramos rever alguns dos métodos de determinação do perfil de índice de refração das fibras. Tal perfil tem importância fundamental para o comportamento da fibra como parte integrante de um sistema de comunicações. Deverá ser estabelecido pelo grupo um procedimento rotineiro de medidas de índice de refração que forneça realimentação para o estudo dos métodos de fabricação de fibras, atualmente em curso. Neste sentido, fizemos uma avaliação das vantagens e desvantagens de alguns processos de medida, suas limitações e viabilidade como processo de rotina. Uma ênfase especial foi dada ao processo de campo próximo, que, pela sua simplicidade e alta resolução, parecia ideal para uma montagem de rotina.

No Cap. I apresentamos alguns rudimentos da propagação em fibras, definimos alguns termos e mostramos alguns resultados importantes para a caracterização das fibras.

No Cap. II descrevemos sucintamente alguns dos processos de preparação das amostras, assim como a sua caracterização geométrica.

No Cap. III descrevemos o método do campo próximo, alguns

efeitos de propagação envolvidos e apresentamos os resultados obtidos para os dois tipos de fibras.

No Cap. IV descrevemos os métodos da Refletividade e do Campo Próximo Modificado, e mostramos suas limitações e conveniências.

No Cap. V fizemos então uma comparação dos métodos apresentados, uma análise dos resultados obtidos e apresentamos as conclusões do trabalho.

CAPITULO I:-

FIBRAS ÓTICAS: GENERALIDADES

1- Tipos de fibras:

Uma fibra ótica é, essencialmente, composta de um cilindro dielétrico de índice de refração n_1 encapsulado em um anel cilíndrico de índice de refração $n_2 < n_1$. O cilindro interno é chamado núcleo e o anel externo casca da fibra.

Dentro deste princípio geral, podemos classificar as fibras em vários tipos, segundo o seu perfil de índice de refração. Os tipos mais importantes são apresentados na Fig. 1.

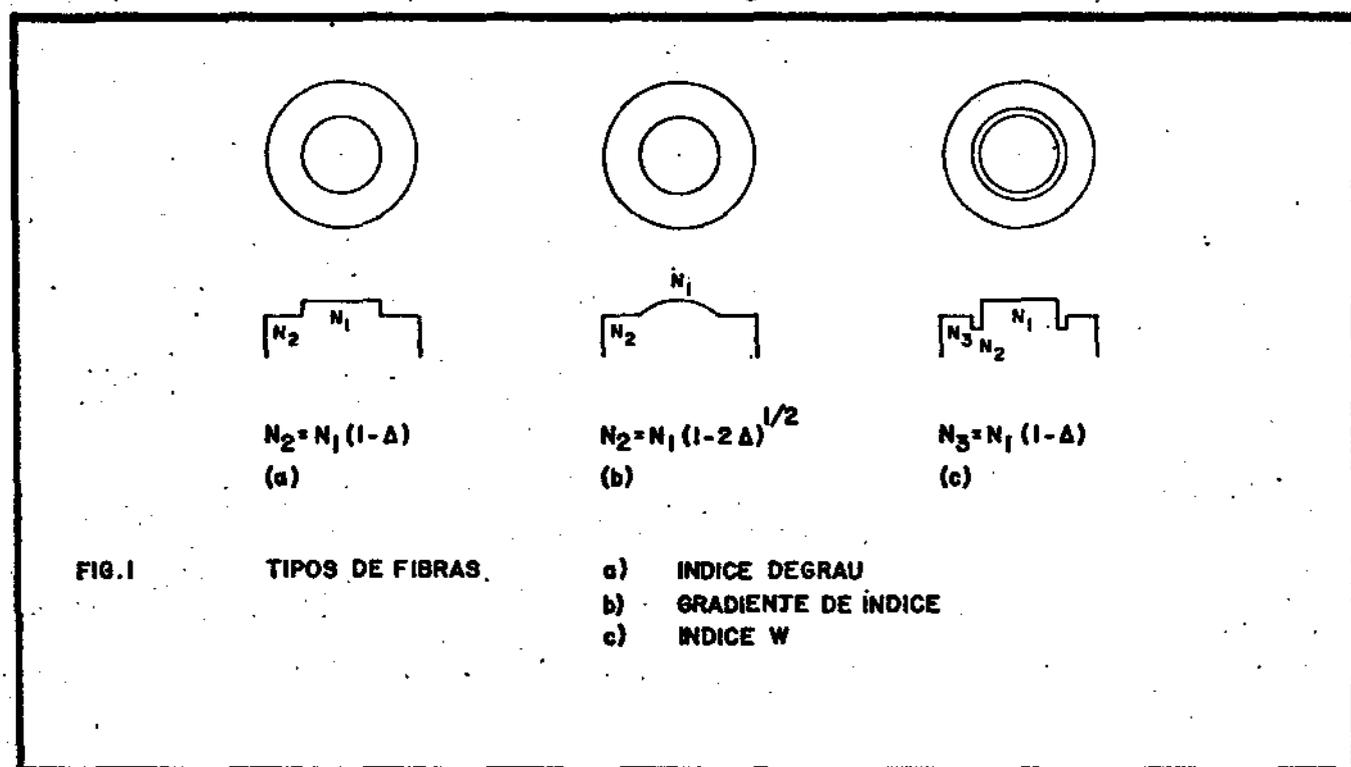


Fig. 1

Na fibra tipo índice de grau (a) temos um núcleo com índice de refração uniforme n_1 , cercado por uma casca de índice uniforme n_2 . Na fibra de gradiente de índice (b), temos um núcleo em que o valor do índice de refração cai gradativamente, de um valor máximo no centro da fibra, até o valor n_2 , constante na casca. Podemos ainda encontrar fibras que entre o núcleo e a casca apresentam uma depressão no valor do índice de refração. São as fibras de perfil em W(c).

A outra grande classificação de fibras refere-se ao número de modos que uma fibra pode suportar. Elas são chamadas fibras multi-modo quando transportam um grande número de modos e são fibras mono-modo quando suportam apenas um modo.

A maneira mais simples e intuitiva de apresentarmos as características de transmissão das fibras é raciocinarmos em termos de fibras multimodo de índice degrau, e considerarmos a reflexão total na interface núcleo-casca dos raios que se propagam pelo núcleo. Para tanto definimos inicialmente raios meridionais como sendo aqueles que interceptam, em sua trajetória, ao eixo da fibra. Raios oblíquos são aqueles que passam sempre ao largo do eixo da fibra.



Fig. 2

Na Fig. 2 vemos que um raio meridional incidente na fibra com um ângulo θ se propaga a um ângulo θ_0 com o eixo da fibra. Vemos também que, a partir de um certo valor $\theta = \theta_c$, a luz é refratada para fora da fibra, não sofrendo reflexão total. Este valor θ_c define a "abertura numérica" (A.N.) da fibra, que nos dá uma descrição do cone de aceitação da luz pela fibra. Temos {20}

$$AN = n \sin \theta_0 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1)$$

No caso de raios oblíquos, definimos {35 }

$$AN(r, \phi) = \begin{cases} \{[n^2(r) - n_2^2] / [1 - \sin^2 \phi \cdot r^2/a^2]\}^{1/2} & \text{- para } n(r)r |\sin \phi| \leq n_1 \\ n(r) & \text{- no resto} \end{cases} \quad (2)$$

(ϕ = ângulo de obliquidade)

Matsumura {24} mostra que no caso das fibras de gradiente de índice o ângulo de aceitação é portanto, a abertura numérica para raios oblíquos é inferior à abertura numérica para raios meridionais. Mostra também que a AN para raios meridionais é maior em fibras de índice degrau do que em fibras de gradiente de índice. Como, de 2, a AN para raios oblíquos em fibras de índice degrau é maior que para raios meridionais, vemos que a capacidade de aceitação de luz em fibras de índice degrau é maior que em fibras de gradiente de índice.

Na Fig. 2 podemos notar que o caminho ótico para os raios muito inclinados em relação ao eixo da fibra é maior que para os raios paralelos ao eixo. Como a distância ótica percorrida pelos primeiros é {20}

$$D_{ot} = n_1 L \sec \theta_0 \quad (3)$$

onde L é o comprimento da fibra.

E considerando cada direção como equivalendo a um modo guiado pela fibra [31] temos que o valor máximo da dispersão modal é

$$\Delta_t = n_1 \frac{L}{c} (\sec \theta_{max} - 1) \quad (4)$$

onde c = velocidade da luz no vácuo

θ_{max} = ângulo máximo com o eixo, para reflexão total.

No caso das fibras de gradiente de índice, temos uma trajetória para os raios como mostrado na Fig. 3.

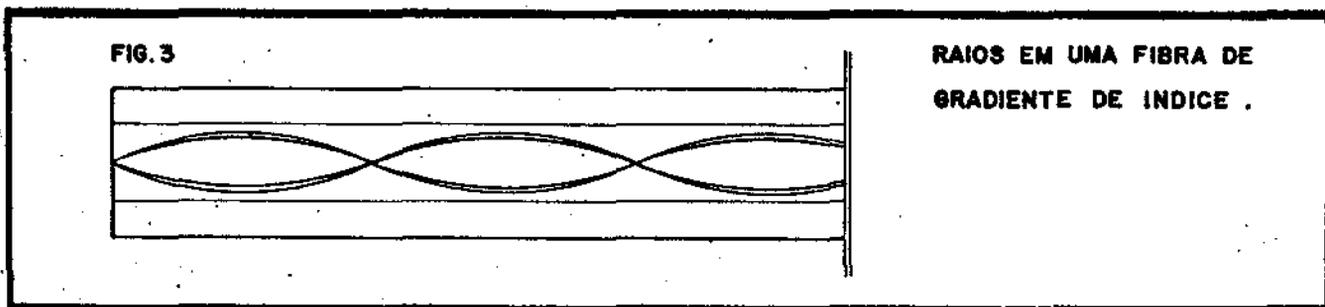


Fig. 3

Vemos que os raios que percorrem maiores distâncias o fazem com mais velocidade e o efeito resultante é uma redução na dispersão modal. Efetivamente, Gloge e Marcatili [13] mostraram que esta dispersão modal é quase nula para certos valores de α em um perfil dado por

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \{1 - 2\Delta (r/a)^\alpha\}^{1/2} & , r < a \\ n_1 \{1 - 2\Delta\}^{1/2} & , r > a \end{cases} \quad (5)$$

onde r é a distância do eixo da fibra, a o raio do núcleo, Δ da ordem de 0,01 a 0,02 e α é um parâmetro entre 1 e ∞ . Para $\alpha = 1$ o perfil é cônico, quase parabólico para $\alpha = 2$, converge para o índice degrau quando $\alpha \rightarrow \infty$.

O valor mínimo da dispersão modal é dado por [13]

$$\alpha_{otimo} = 2 - 2\Delta \quad (6)$$

Neste caso a dispersão modal é igual a [13]

$$\Delta_t = \frac{Ln_1}{c} \frac{\Delta^2}{8} \quad (7)$$

são a dispersão material (variação do índice de refração com o comprimento de onda) e o atraso como função do comprimento de onda dentro de cada modo. Uma discussão destes efeitos pode ser encontrada em [25], [12].

Um outro parâmetro importante para o nosso trabalho é a chamada "frequência normalizada" V da fibra, dada por

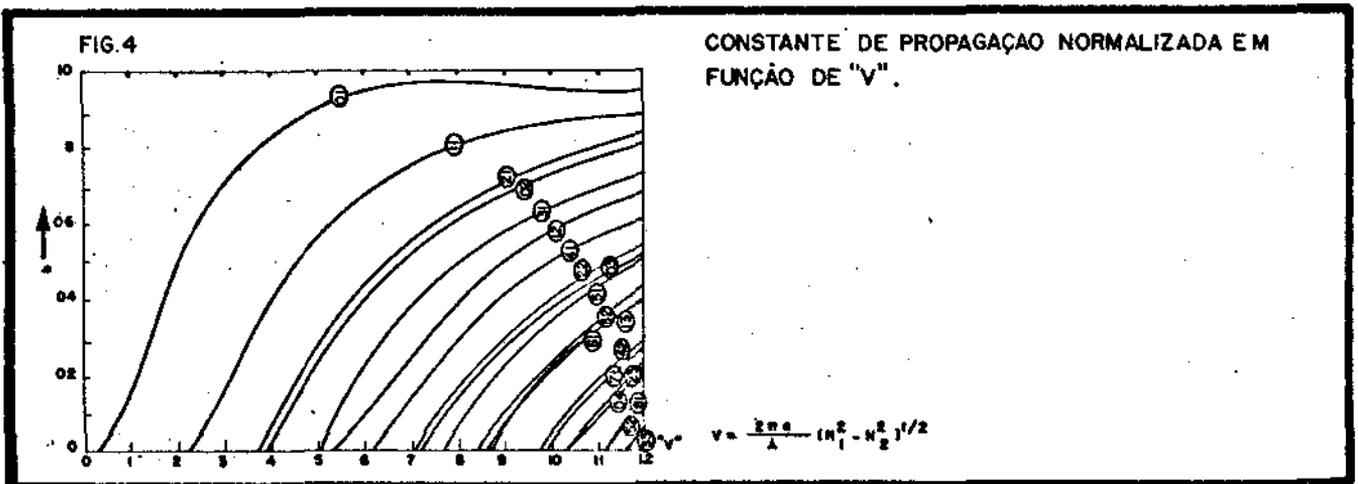
$$V = \frac{2 \pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz utilizada nas fibras.

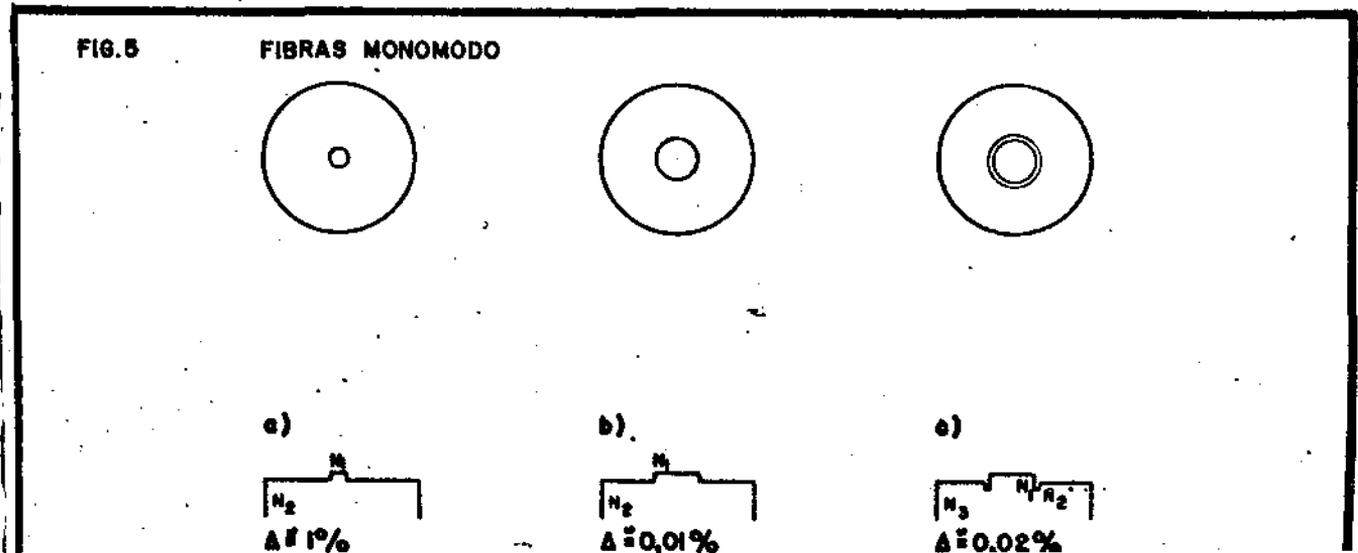
O número de modos contidos pela fibra é então dado por [25]

$$N = \frac{V^2}{2} = (n_1 k a)^2 \Delta \quad (9)$$

com $k = \frac{2\pi}{\lambda}$



Na Fig. 4 vemos que abaixo de $V = 2,405$ apenas o modo fundamental encontra condições para a propagação. Fibras com V inferior a este valor são fibras monomodo. Praticamente podemos consegui-las (Fig. 5) diminuindo bastante o valor de a ou a diferença entre n_1 e n_2 .



No primeiro caso, embora ela conduza bem a luz, a dimensão reduzida do núcleo dificulta muito o acoplamento e a realização de emendas na fibra. No segundo caso, as perdas por radiação seriam muito altas. Por isto, desperta atenção o perfil W mostrado em (c), pois apresenta boa retenção do modo fundamental e boa discriminação contra modos de ordem superior {28 }.

Os resultados apresentados até agora baseiam-se quase totalmente na ótica geométrica. Para uma apresentação da análise eletromagnética assim como as referências à bibliografia existente, existem bons artigos de revisão tais como { 5 }, {12 } , {25 }.

CAPÍTULO II:-

PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DAS AMOSTRAS

1. Introdução:-

O preparo das fibras para as diversas análises é de fundamental importância para o trabalho, como será visto a seguir. Devido à fragilidade e às reduzidas dimensões das fibras, a preparação de superfícies bem planas e perfeitamente limpas exige cuidados especiais.

Para os métodos de medida de perfil de índice de refração utilizados, alguns parâmetros geométricos devem também ser determinados, tais como o diâmetro da casca e o diâmetro do núcleo e a abertura numérica.

O controle da qualidade das superfícies foi feito, assim como a medida dos diâmetros da casca e do núcleo, utilizando-se um microscópio metalográfico invertido Zeiss.

A medida da abertura numérica foi feita determinando-se o ângulo máximo de aceitação da fibra, de acordo com o processo descrito adiante.

Quanto à preparação das extremidades de fibras óticas para análises existem 3 métodos básicos que são:

- a) a quebra sob tensão
- b) o polimento
- c) a quebra por choque térmico

Destes, procuramos nos aprofundar nos dois primeiros, pois o método do choque térmico, na forma como o executamos, não permite um maior grau de controle sobre a qualidade da superfície, funcionando na base das tentativas; com os outros dois processos conseguimos bons resultados e eles são discutidos a seguir.

2. O método da quebra sob tensão:-

a) fraturas em bastões de vidro

O processo de fratura em vidros é conhecido há bastante tempo, tendo sido apresentado um estudo a respeito em 1920 por Griffith [15]. Em seu trabalho, ele já utilizava fibras de vidro para analisar a influência de defeitos do material na propagação da fratura.

Um dos fatores bem conhecidos da fratura de materiais "quebradiços" (brittle) é que as faces da fratura apresentam uma morfologia característica, de acordo com o valor local da energia exis-

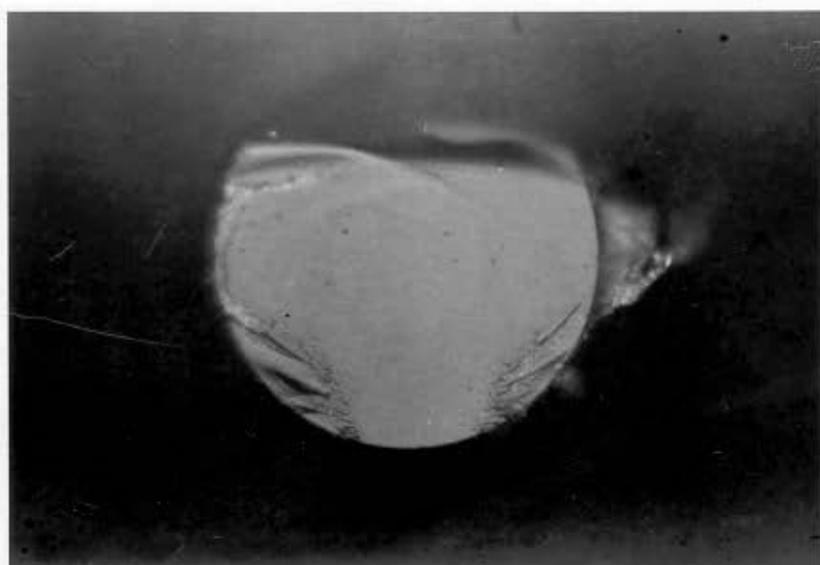
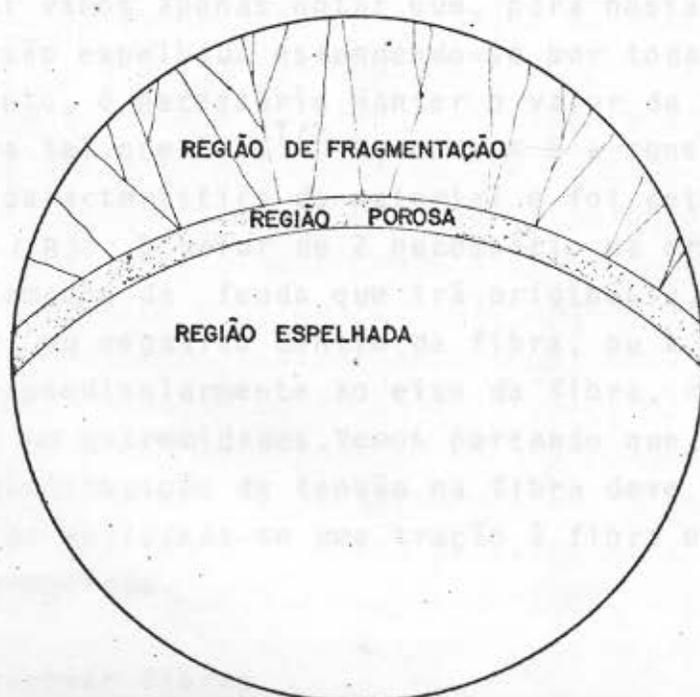


FIG 6



FACE DE UMA QUEBRA, MOSTRANDO AS 3 REGIÕES

distintas, a saber (fig. 6):

- (i) região espelhada - uma região óticamente plana, adjacente ao início da quebra.
- (ii) região porosa - uma região um pouco fosca, no contorno da região espelhada.
- (iii) região de fragmentação - região em que a frente de fratura se subdivide em várias outras, resultando um relevo bastante irregular.

Foi demonstrado experimentalmente {21} que, para o vidro, a tensão de quebra, Z , é inversamente proporcional à raiz quadrada da profundidade r da região espelhada ou seja:

$$Z (r)^{1/2} = \text{constante} \quad (10)$$

Johnson e Holloway {18} estenderam a análise para o caso de um bastão curvo, postulando que, para todos os pontos da fronteira da região espelhada:

$$Z_p (r)^{1/2} = \text{constante} \quad (11)$$

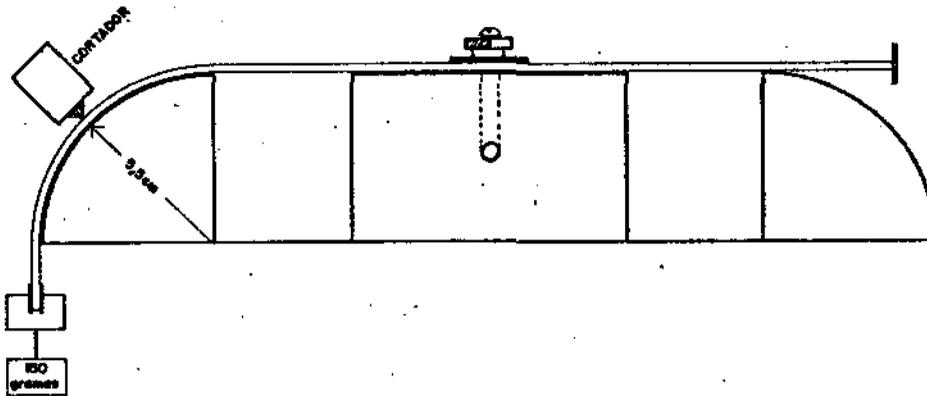
onde Z_p é a componente normal ao plano da fratura da tensão (stress) local no ponto P antes do início da quebra. De (11) vemos que, se controlarmos a distribuição de Z_p , podemos controlar o raio da região espelhada. Uma explicação física para o fenômeno pode ser encontrada na ref. {18}. Aqui vamos apenas notar que, para nossas aplicações, devemos ter a região espelhada estendendo-se por toda a superfície da fibra. Para tanto, é necessário manter o valor da tensão em todos os pontos da fibra tal que $Z(r)^{1/2} < K$, onde K é a constante da eq. (11). Esta constante é característica do material e foi determinada experimentalmente {14}, {18}. O valor de Z necessário na origem da fratura vai depender do tamanho da fenda que irá originá-la. Z não deve nunca tornar-se zero, ou negativo dentro da fibra, ou a fratura deixará de propagar-se perpendicularmente ao eixo da fibra, causando o aparecimento de ombros nas extremidades. Vemos portanto que, para obtermos boas quebras, a distribuição de tensão na fibra deve ser ajustada. Isto pode ser feito aplicando-se uma tração à fibra e curvando-se-a segundo o raio apropriado.

b) a máquina de quebrar fibras

Baseados nas mesmas considerações anteriores, Gloge et al {14} propuseram um aparelho para fazer um estudo do ajuste dos diferentes parâmetros de quebra da fibra. Basicamente, tal aparelho per-

mitia aplicar várias trações à fibra, curvando-a segundo diferentes raios e também controlar a pressão do cortador que produzia a fenda inicial. Baseados nos resultados apresentados por estes autores, projetamos um aparelho bastante simplificado apresentado na fig.(7).

FIG. 7

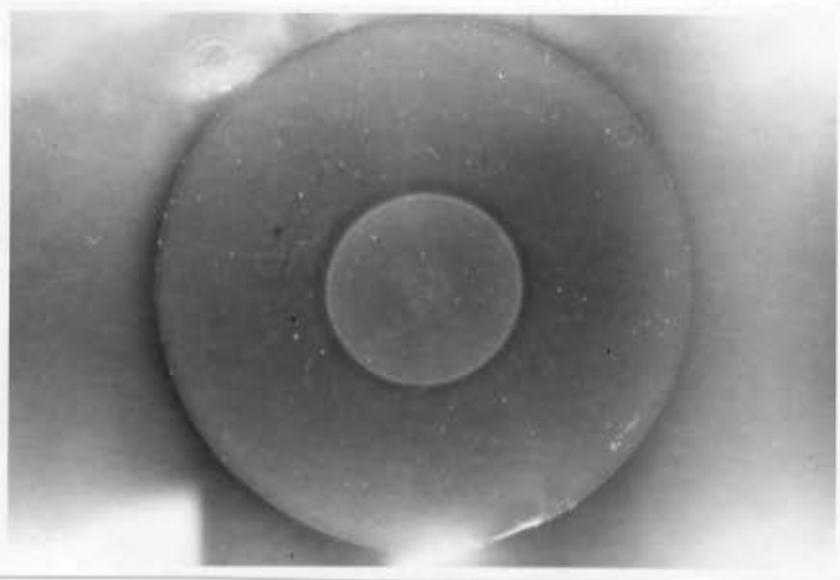


APARELHO PARA QUEBRA DE FIBRA

No nosso caso, o raio de curvatura da fibra foi de 5,5cm e várias trações diferentes foram aplicadas à mesma, ora utilizando-se uma mola calibrada, ora pendurando-se pesos à sua extremidade. Pela observação ao microscópio ótico das superfícies geradas podíamos deduzir aproximadamente as causas de irregularidades que porventura houvessem. Mas, na maior parte dos casos em que pudemos notar uma pequena região porosa e uma de fragmentação, tais regiões encontravam-se na casca das fibras, não prejudicando a superfície do núcleo, ainda na região espelhada. Um problema que não pudemos controlar qualitativamente, mas procuramos resolver pela repetição, era o do corte inicial na fibra para geração de fenda iniciadora da fratura. Utilizando um cortador de ponta de diamante, do tipo comum de vidraceiro, verificamos ser necessário usar de muita cautela e tentar tocar a fibra com o cortador na maior delicadeza possível para obtermos bons resultados. (Gloge et al usaram pressões variando entre 1,5 e 7,5 gramas para o cortador). Além do cortador de ponta de diamante, utilizamos também algumas lâminas de aço que se revelaram bem menos eficientes.

Para a maior parte das fibras que estudamos, verificamos que uma tração da ordem de 150 gramas produziu os melhores resultados, com quebras praticamente perfeitas. Na fig. (8) vemos uma

superfície de fibra obtida por este processo, que não apresenta irregularidades visíveis no microscópio óptico.



Após algumas tentativas, conseguimos obter resultados plenamente satisfatórios com este método, e este foi o processo utilizado na preparação das superfícies de fibras para análise pelos métodos descritos neste trabalho.

3. O Polimento:-

Ao tentarmos fazer o polimento em fibras, visávamos especificamente preparar amostras que se prestassem a medidas interferométricas de índice de refração. Isto significava preparar uma pequena pastilha de cerca de $50\mu\text{m}$ de espessura com a fibra. Mas as técnicas básicas utilizadas servem para o preparo de amostras para qualquer tipo de medida.

Em primeiro lugar, para darmos suporte à fibra, usamos um tubo capilar ao qual a fixamos por meio de resina "epoxy" líquida. Em seguida, cortamos uma ponta em uma serra circular e fizemos um desbaste com SiC em base de vidro, para começarmos a uniformizar a superfície. A próxima etapa era o esmerilhamento com pasta de diamante e alumina fina. O resultado obtido após o esmerilhamento já era bastante bom. Conseguimos obter pastilhas de cerca de $50\mu\text{m}$ de espessura com duas superfícies aparentemente perfeitas, como observado no microscópio óptico. Para a próxima etapa, a do polimento final, deveríamos utilizar óxido de cério sobre uma base de pife. No entanto, como sur-

giram problemas com o microscópio que deveríamos utilizar, abandonamos o processo, pois para as outras técnicas de medida podíamos utilizar a quebra sob tensão, mais simples e muito mais rápida.

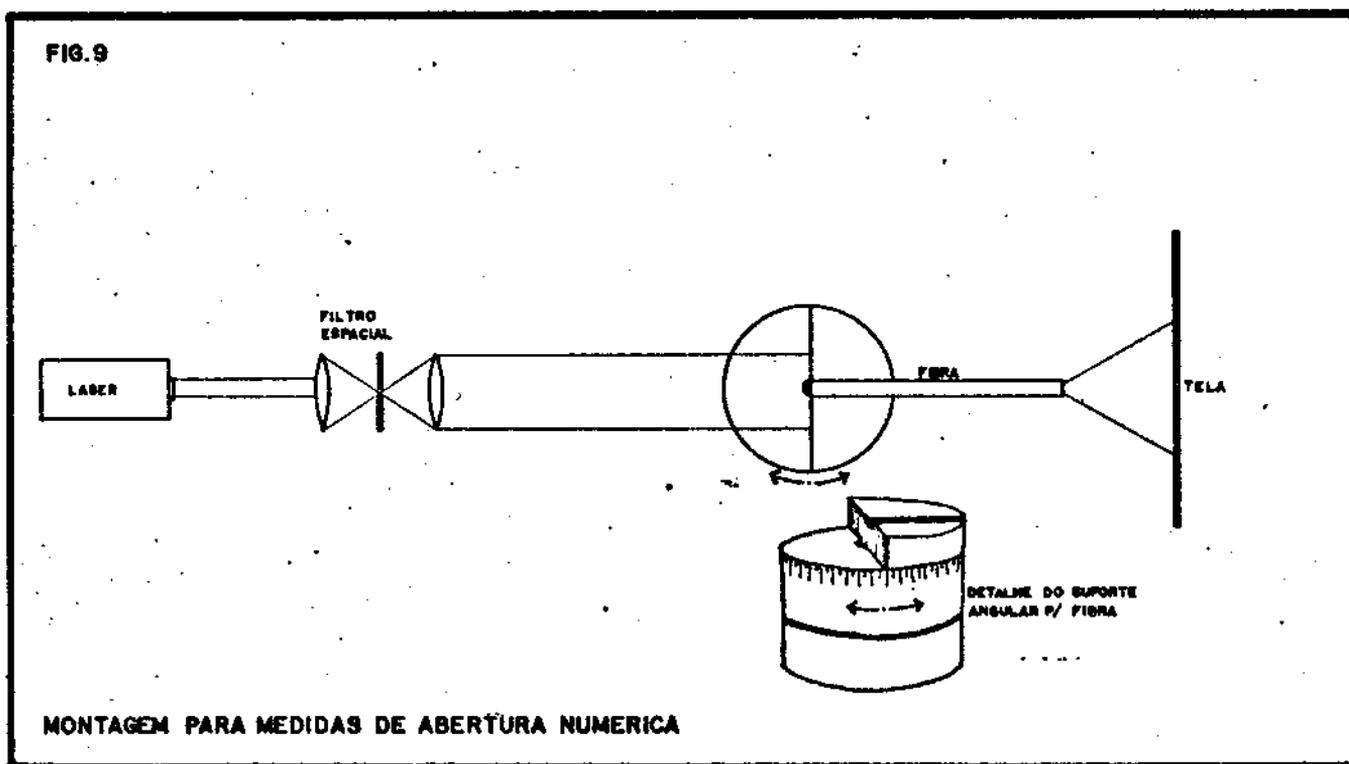
Além do caso específico da medida por interferometria, o polimento ainda é vantajoso, por exemplo, para o preparo de amostras da preforma, antes do puxamento da fibra, e para isto continua sendo utilizado.

4. Medidas dos diâmetros da casca e do núcleo:-

Tais medidas foram feitas utilizando-se o microscópio metalográfico invertido Zeiss. No plano de imagem da ocular inserimos uma escala milimetrada. Utilizando um objeto micrométrico (uma escala de um milímetro dividido em centésimos, da firma E.Leitz), fizemos a calibração de nossa escala. Em seguida, pela observação da imagem da fibra sobre a escala, fazíamos a medição. O resultado obtido foi comparado aos resultados conseguidos com a montagem de refletividade descrita no cap. (IV). Neste caso, deslocamos a fibra no foco de uma objetiva de microscópio iluminada com um laser, e observamos os limites da região do núcleo. Dentro dos limites da resolução neste caso, a concordância obtida foi boa.

5. Medidas da abertura numérica:-

Para esta medida, a montagem utilizada é mostrada na fig. (9).



Tínhamos um feixe de laser filtrado e expandido incidindo sobre a face da fibra. A intensidade capturada pela fibra era suficiente para gerar um ponto brilhante sobre um anteparo colocado logo após a extremidade posterior da fibra. A face de entrada da fibra, um suporte angular preciso, da forma mostrada na fig. (9). Alinhando o feixe do laser e o suporte angular de forma a termos a incidência normal ocorrendo na posição 0° do suporte, variamos o ângulo do suporte até que o ponto desaparecesse no anteparo. Para as fibras de índice degrau (CNET) e gradiente de índice (Bell) que utilizamos, os resultados encontrados foram:

Índice degrau:-

positivo - $10^\circ 30'$

negativo - 350°

gradiente de índice:-

positivo - 14°

negativo - 346°

Portanto temos as aberturas numéricas:

Índice degrau - $AN = 0,21$

gradiente de índice - $AN = 0,24$

CAPÍTULO III:

O MÉTODO DO CAMPO PRÓXIMO

1. Introdução:-

O método do campo próximo foi proposto por Gloge e Marcattili [13] que notaram que a distribuição de potência no campo próximo da saída da fibra, quando excitado por uma fonte incoerente é uma função do perfil do índice de refração da fibra.

Neste trabalho, os autores usam a aproximação da ótica geométrica e portanto tratam exclusivamente de fibras multimodo, ou seja, com valores de V altos. Supondo uma excitação uniforme de todos os modos na entrada da fibra (fonte lambertiana) os autores computam a potência aceita pela fibra achando o ângulo sólido de aceitação a cada ponto. Definem então uma abertura numérica local por

$$A(r) = n(r) \sin \theta_c(r) = \{n^2(r) - n_2^2\}^{1/2} \quad (12)$$

Como a potência transmitida pelos raios guiados é proporcional ao quadrado da abertura numérica [30], temos que a potência aceita em r é

$$P(r) = P(0) \frac{A^2(r)}{A^2(0)} = P(0) \frac{n^2(r) - n_2^2}{n^2(0) - n_2^2} \quad (13)$$

Se considerarmos todos os modos como propagando-se com a mesma atenuação, e na ausência de acoplamento entre os modos, esta mesma distribuição de potência deve verificar-se na saída da fibra.

Estas conclusões formam a base do método do campo próximo. Para podermos utilizá-las praticamente, devemos considerar os principais efeitos que afetam a distribuição do campo próximo na saída da fibra. Três fatores são mais importantes, respectivamente:

- a) atenuação diferencial entre os modos
- b) efeitos de conversão de modos devidos a pequenas irregularidades na fibra
- c) a presença de modos "vazantes" (leaky)

Como os dois primeiros efeitos aumentam de intensidade com o comprimento da fibra, podemos praticamente eliminá-los utilizando fibras bem curtas para as medidas. Mas o 3º efeito, a presença de raios vazantes, é inversamente proporcional ao comprimento da fibra e portanto deve ser levado em consideração na análise de dados obtidos a partir de pequenos comprimentos de fibra. Para tanto, vamos fazer uma breve digressão, tratando de raios vazantes e seus efeitos sobre os resultados das medidas.

Podemos classificar os raios existentes numa fibra em 3 categorias, de acordo com a capacidade da mesma de guiá-los. São, respectivamente:

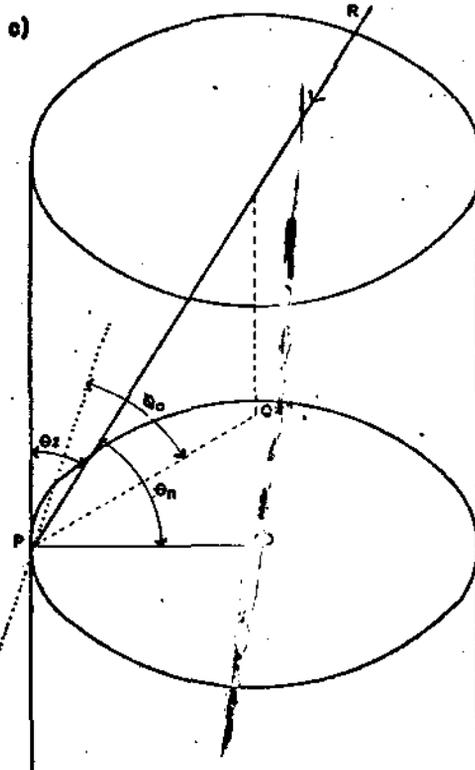
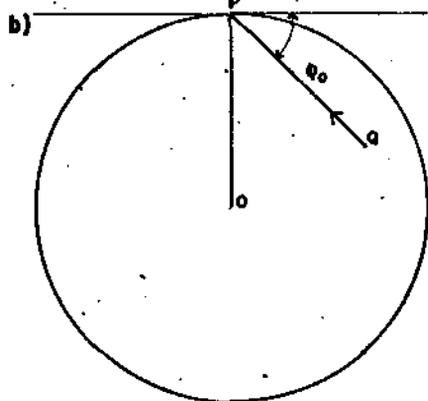
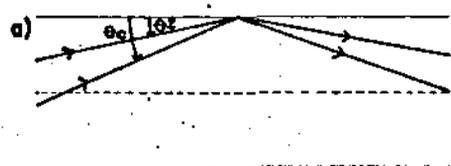
- i) raios guiados
- ii) raios vazantes
- iii) raios refratados

Os raios refratados são aqueles que, por atingirem a interface núcleo-casca a ângulos muito grandes, com o eixo da fibra não são totalmente refletidos e perdem-se por refração. (Fig. 2).

Os raios guiados são aqueles que incidem na interface a um ângulo inferior a θ_c (Fig.9) onde θ_c é o complemento do ângulo crítico necessário à reflexão total [5].

Os raios vazantes serão melhor definidos a partir da Fig. 10[31].

FIG.10



RAIOS OBLIQUOS E ANGULOS EM UMA FIBRA DE INDICE DEGRAU

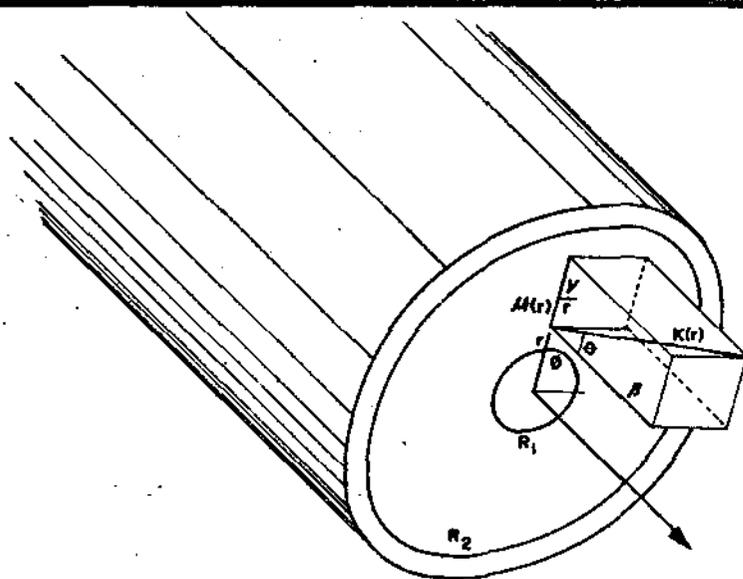
NA FIGURA, P É O PONTO DE INCIDENCIA DO RAI "R". "PQ" É A PROJEÇÃO DE "R" NA SECCÃO TRANSVERSAL. " θ_n " O ANGULO ENTRE "R" E A NORMAL "OP". " θ_0 " O ANGULO ENTRE "PQ" E O PLANO TANGENTE À INTERFACE

Na Fig. 9 vemos que, se $\phi = \pi/2$ (raios meridionais), temos o caso da Fig. (a) e os raios com $\theta_z > \theta_c$ são refratados. Mas, se considerarmos os raios oblíquos, $\phi \neq \pi/2$ (b), e muitos raios com $\theta_z > \theta_c$ têm $\theta_n < \{\pi/2 - \theta_c\}$, ou seja, seu ângulo com a normal no ponto de incidência é maior que o ângulo crítico e portanto, devem ser totalmente refletidos, segundo a ótica geométrica. No entanto, estes raios sofrem

um efeito de tunelamento [30] [36], semelhante ao observado em Mecânica Quântica, e vão lentamente vazando para o exterior da fibra. Alguns destes raios ainda mostram resíduos na fibra mesmo após várias centenas de metros percorridos.

Para uma explicação física do fenômeno, vamos recorrer à decomposição em ondas planas (método WKB) da ótica física.

FIG. 11



VETOR DE ONDA EM UMA FIBRA MULTIMODO

Temos na fig. 11 o vetor de onda local

$$K(r) = \frac{2\pi n(r)}{\lambda} \quad (14)$$

(λ é o comprimento da onda da radiação).

decomposto em seus componentes num sistema de coordenadas cilíndricas. A componente radial $\mu(r)$ é dada por

$$\mu(r) = \{K^2(r) - \beta^2 - v^2/r^2\}^{1/2} \quad (15)$$

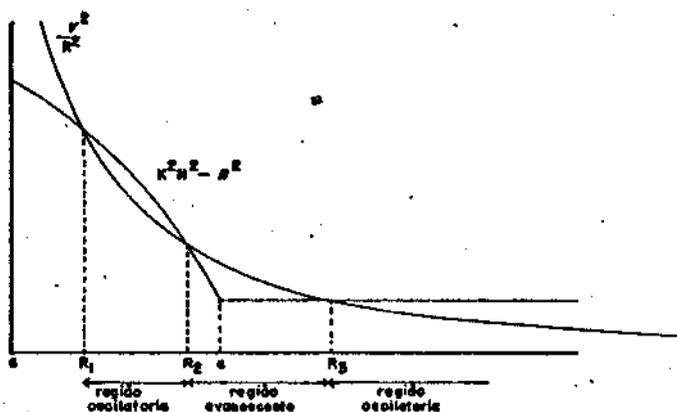
A constante de propagação β , para os modos guiados tem um valor mínimo [23]

$$\beta_c = \frac{2\pi n_2}{\lambda} \quad (16)$$

correspondente à constante de propagação no corte. Constantes de propagação inferiores a β_c encontram condições de propagação na casca e representam modos refratados. Dados dois valores, β e v , para os componentes do vetor de onda no núcleo, podemos encontrar regiões em que $\mu(r)$ é real, gerando uma periodicidade radial do campo [13]. Na fig. 12, mostramos as regiões de solução real e imaginária da eq.(15)

FIG.12

REGIÕES DA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO



Neste caso, representamos um modo vazante em que β está

logo antes do corte. Vemos que tal modo apresenta

- uma região de periodicidade radial no núcleo, entre R_1 e R_2 , representando energia ligada.
- uma região de campo evanescente, entre R_2 e R_3 , onde não há propagação.
- uma nova região de oscilação possível, quando $r > R_3$, representando potência radiando-se da fibra.

Os valores-limite da constante de propagação entre os quais podemos encontrar tal tipo de modos, são dados por { 2 }

$$K^2 n_2^2 - \frac{v^2}{a^2} < \beta^2 < K^2 n_2^2 \quad (17)$$

onde K é o vetor de onda no vácuo.

Ao calcular a velocidade de fase dos modos na fibra, Bo-chovè et al { 5 } apresentam a razão física para o tunelamento. Eles mostram que, quando $r = R_3$, a velocidade de fase da radiação começa a exceder o valor da velocidade de fase de uma onda livre. Como isto não é possível, o problema é resolvido por uma emissão de radiação. Argumento semelhante é apresentado por Marcuse { 22 }.

O problema dos raios vazantes é mais sério no caso das fibras de gradiente de índice pois eles são raios oblíquos e, como vimos, todos os raios oblíquos nestas fibras estão incluídos na abertura numérica meridional. No caso das fibras de índice degrau, tais raios excedem a abertura numérica meridional e poderíamos por uma filtragem espacial, tentar evitar o seu lançamento.

No nosso caso de interesse, o método de medidas de índice de refração pelo campo próximo, o trabalho original de Gloge e Marcatili não leva em consideração a existência de raios vazantes. Conseqüentemente, na expressão (13) deve ser incluído um fator de correção que tenha em conta a presença e a atenuação destes raios. Tal fator de correção foi apresentado por { 29 } que deram a seguinte for-

ma ã eq.

$$\frac{P(r)}{P(0)} = \frac{n^2(r) - n_2^2}{n^2(0) - n_2^2} C(r, z) \quad (18)$$

onde

$$C(r, z) = 1 + \frac{4}{\pi(n^2(r) - n_2^2)} \int_0^{\max} \frac{dv}{a^2 r k^3} \frac{\int_0^{\sqrt{\mu^2 + v^2}} \mu d\mu \exp\{-\alpha(\mu v)z/a\}}{\{n^2(r) - n_0^2 + (\mu^2/a^2 k^2) - (v^2/r^2 k^2)\}^{1/2}} \quad (19)$$

com

$$u^2 = a^2 \{K^2 n^2(0) - \beta^2\} \quad (20)$$

α = coeficiente de atenuação.

A integral pode ser dividida em 3, correspondendo a regiões de raios guiados, refratados e vazantes. O coeficiente de atenuação $\alpha(\mu, v)$ para raios ligados é igual a zero, para raios refratados é infinito e para raios vazantes assume um valor a ser calculado entre 0 e ∞ . Para este cálculo consideramos a forma dada por Bochove et al [5]

$$\alpha = \frac{F}{A} \quad (21)$$

com

$$A = \text{período do raio} = 2 \int_0^{r_t} \frac{n(r) \cos \theta_0 dr}{\sqrt{n(r)^2 - n(0) \cos^2 \theta_0}} \quad (22)$$

$$F = \exp \left\{ - \frac{4\pi}{\lambda} \int_{R_2}^{R_3} (\beta^2 + v^2/p^2 - n(r)^2)^{1/2} dr \right\} \quad (23)$$

onde

r_t = ponto de retorno do raio

$\beta = n(r_0) \cos \theta_0$

$v = r_0 n(r_0) \sin \theta_0 \cos \phi_0$

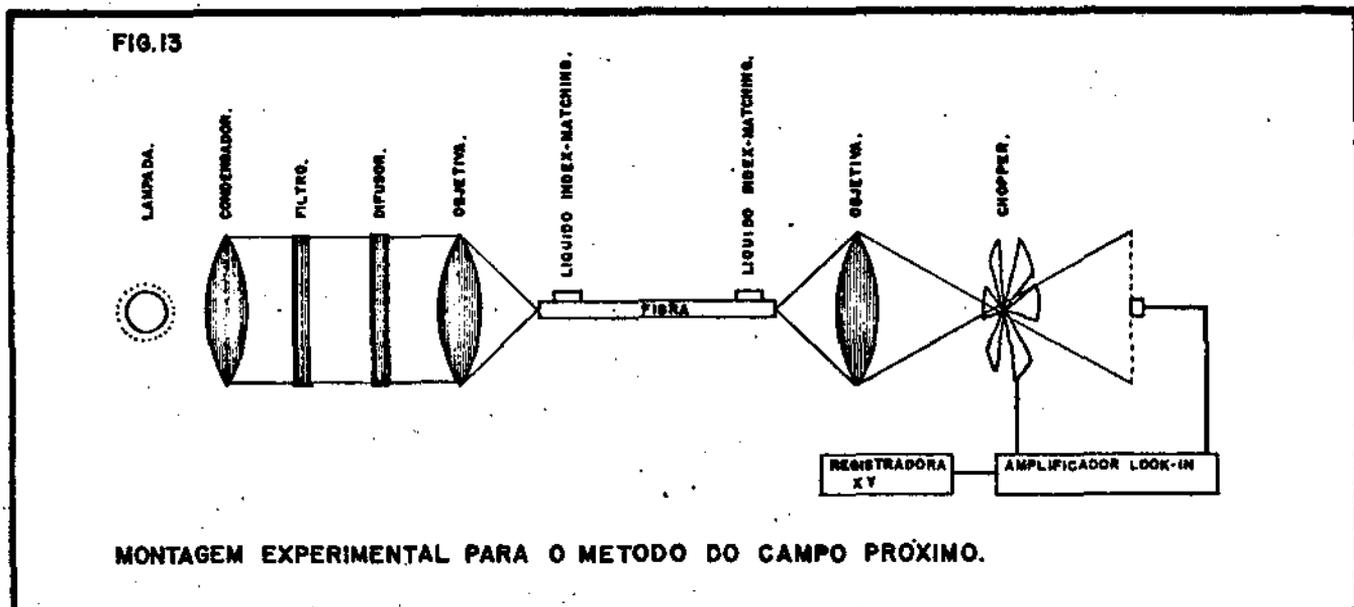
r_0 = distância da referência do raio oblíquo ao eixo da fibra.

Para $z \rightarrow \infty$, o fator de correção (19) se reduz a $C(r, \infty) = 1$, como esperado para modos guiados. Para $z = 0$, quando os modos vazantes estão presentes sem atenuação.

$$C(r, 0) = \frac{1}{\{1 - (r/a)^2\}^{1/2}} \quad (24)$$

3. A montagem experimental:

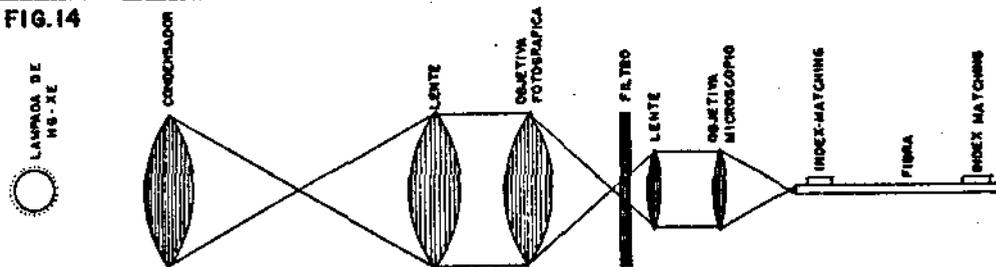
A montagem experimental é mostrada na fig. (13)



Uma fonte lambertiana, no caso uma lâmpada de tungstênio com alimentação estabilizada (Jarrel Ash) tem sua luz recolhida por uma lente e colimada. A luz passa então por um filtro de banda larga ($\Delta\lambda \sim 80$ nm) centrado em 520 nm, e incide em uma placa difusora. É então focalizado pela objetiva (40x, 0.65) sobre a extremidade da fibra. A fibra está suportada em um microposicionador XYZ e parcialmente imersa em glicerina para espalhamento da radiação que venha a se propagar pela casca. A outra extremidade da fibra é presa a um suporte fixo, e temos uma objetiva (Zeiss - 40x, 0.85) montada em outro microposicionador XYZ focalizando a sua face. A imagem da face da fibra é então projetada em um plano L, onde temos um diodo PIN (EG&G-100A) com pré-amplificador e coberto por uma placa com um pequeno orifício de 100 μ m de diâmetro. Este diodo está colocado sobre um micromanipulador XYZ motorizado, que permite deslocá-lo lentamente pelo plano da imagem. O sinal do detetor é então enviado a um amplificador de tipo lock-in (PAR 124A). Acoplado ao amplificador e interceptando o feixe luminoso antes do detetor temos também um "chopper", que serve para dar uma frequência de referência ao sinal detetado. A saída do amplificador é ligada a uma registradora XY (HP 7101BM). Nesta registramos, finalmente, a intensidade recebida pelo detetor como função da posição do orifício na imagem da face da fibra.

Como a intensidade fornecida pela lâmpada era baixa, não conseguimos fazer medidas usando um filtro de interferência com a montagem acima, pois o nível de ruído ficou muito alto. Substituímos então o sistema de iluminação pelo sistema descrito abaixo.

FIG.14



MONTAGEM UTILIZANDO LAMPADA DE HG-XE

Neste caso, utilizamos como fonte, uma lâmpada de Hg-Xe, de 1000 W (sistema Oriel 6128 com lâmpada Hanovia). Na montagem (housing) da lâmpada temos um espelho atrás da mesma, e uma lente coletora muito clara ($f = 1:0,7$). Como, para a colimação não dispúnhamos de lente com f equivalente, utilizamos o melhor valor que encontramos, que foi $f = 1:1,25$. A luz passava então por uma objetiva fotográfica, totalmente aberta (Canon $f = 1:1,4$), era focalizada e finalmente colimada por uma lente pequena, de $f = 1:1$. Antes da colimação, a luz passava por um filtro de interferência com largura de banda de 9,8nm, e centrado em 546nm. Alternativamente, utilizamos também o filtro de banda larga mencionado anteriormente. O feixe filtrado e colimado incidia então numa objetiva de microscópio (40x, 0.65) e uma imagem da lâmpada era formada sobre a superfície da fibra. Daí por diante, a montagem experimental era idêntica à descrita anteriormente.

4. Procedimento Experimental:-

A primeira etapa foi a verificação das condições de iluminação da fibra. Como vimos anteriormente, é necessária a excitação uniforme de todos os modos da fibra. Para tanto necessitamos de uma fonte lambertiana que tanto pode ser uma fonte térmica como uma lâmpada de tungstênio, ou uma lâmpada de arco, ou um LED, que é uma aproximação razoável.

No nosso caso, utilizamos as lâmpadas de tungstênio e de Hg-Xe. Para a lâmpada de tungstênio, estudamos inicialmente a distribuição de intensidade existente na imagem. Neste sentido, fizemos a varredura da imagem da lâmpada utilizando um fotodiodo coberto por uma placa com um orifício de 100 μ m. Verificamos que a imagem da parte anterior do filamento apresentava intensidade superior em mais de 10% à imagem da parte posterior do mesmo. Para corrigir este problema, introduzimos no feixe uma lâmina de microscópio esmerilhada atuando como difusora. Conseguimos então, uma maior uniformidade na iluminação da fibra. O preço pago para esta uniformidade foi uma queda grande na intensidade, o que impossibilitou a utilização de filtros

de banda estreita com a lâmpada de tungstênio. Procuramos então, utilizar a fonte de Hg-Xe, muito mais potente, e bem mais uniforme no centro do plasma. Fazendo coincidir a imagem do centro do plasma com a face da fibra, conseguimos uma iluminação bastante razoável e bem mais intensa que a conseguida com a lâmpada de tungstênio. Com isto foi possível realizarmos medidas com filtros de interferência, sem maiores problemas com o nível de ruído.

O problema do truncamento angular da fonte lambertiana pelo sistema ótico foi resolvido utilizando-se, nas duas montagens, ângulos máximos de iluminação ou, o que dá no mesmo, aberturas numéricas bem superiores à abertura numérica da fibra. Com isto asseguramos a excitação de todos os modos da fibra, guiados e vazantes.

Para o alinhamento da extremidade da fibra com a imagem da lâmpada, fizemos inicialmente um ajuste visual, grosseiro. Em seguida, monitorando com o detetor a intensidade no centro da imagem da fibra, ajustamos a posição de face de entrada para termos um máximo de intensidade, o que significa que estamos lançando na fibra a maior intensidade possível nos raios meridionais e portanto, a imagem está centrada.

O alinhamento dos planos da face de saída da fibra e da imagem foi obtido iluminando-se a fibra com a luz branca e observando-se as aberrações cromáticas que ocorriam na imagem. Estas eram devidas ou a deslocamentos da objetiva ou a deslocamentos angulares da fibra. O eixo do sistema fibra-objetiva-imagem era ajustado a grosso modo por meio de uma régua e ajustado finalmente observando-se a imagem da fibra. Um mal alinhamento do sistema resulta num perfil assimétrico, tal como é mostrado na fig. (16).

O estudo da imagem e da focalização foi feito colocando-se, no plano do detetor, um cartão branco à guisa de tela, no qual era examinada a imagem. O efeito de uma má focalização era uma indefinição na imagem, com a conseqüente perda de resolução. Tal efeito é evidenciado pela fig. (17).

Outro cuidado importante é o controle do estado das faces da fibra. Uma superfície imperfeita na saída da fibra seria revelada pela imagem, com a conseqüente deterioração do perfil obtido. A tolerância já é maior com respeito à face de entrada, onde pequenos defeitos não influenciam de forma detectável o resultado final. O processo de preparo das extremidades utilizadas foi a quebra sob tensão, descrito no Cap. (II). Após a quebra, devemos ter o máximo cuidado em conservar as extremidades limpas, pois qualquer sujeira aparecerá na imagem, perturbando o resultado.

Para a extinção da radiação que se propagava pela casca,

ar, e facilitando o espalhamento de luz, pois o índice de refração da glicerina é bem próximo daquele do vidro.

A distância entre a objetiva de microscópio na saída da fibra e o plano do detetor era determinada pelo diâmetro desejado para a imagem da fibra. Tal diâmetro correspondia a uma ampliação de cerca de 120 vezes da superfície da fibra, de forma a termos o diâmetro do orifício, 100µm, correspondendo a um ponto de 0.83µm na superfície da fibra. O limite de resolução de objetiva, devido à difração é dado aproximadamente por (10)

$$Co = \frac{1.22 \lambda}{NA} = 0.78\mu m \quad (25)$$

Portanto, 0.8µm era o limite de resolução do sistema. Um aumento na imagem, para permitir a utilização de orifícios maiores, foi possível utilizando-se uma ocular após a objetiva, atuando o sistema como um microprojektor. Mas os problemas adicionais de alinhamento, aliados à queda de intensidade na imagem, não foram acompanhados de melhoria substancial nos resultados, e o processo foi abandonado.

O ajuste da varredura foi feito tirando-se partido da existência de um defeito ("dip") no centro das fibras. Com o micrômetro motorizado na metade de seu curso, ajustávamos a posição do orifício para que coincidissem exatamente com o ponto escuro gerado pelo defeito. Em seguida, colocávamos o micrômetro em posição de iniciar a varredura. Um dos problemas que tivemos com as varreduras foi o controle da velocidade do motor. Como o controlador era apenas uma alavanca, não conseguíamos acoplá-lo à velocidade da registradora e a escala do perfil segundo o diâmetro, não era única. O controle aproximado da velocidade de varredura foi feito com a utilização de um cronômetro.

5. Resultados e Discussão:-

Em primeiro lugar, o método é bastante sensível para a determinação do perfil de índice de refração. Sua resolução como vimos, é da ordem de 1µm. Para estimarmos a sensibilidade, podemos facilmente derivar da eq. (13) a seguinte equação:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{2n(r)}{n^2(r) - n_2^2} \Delta n(r) \quad (26)$$

Tomando aproximadamente

$$n(r) = 1.5 \quad AN = 0.2$$
$$n^2(r) - n_2^2 \leq (AN)^2 = (0.2)^2 = 0.04 \quad (27)$$

$$\frac{\Delta P}{P} \geq 75 \Delta n$$

Supondo $\Delta n = 1\%$, vemos que normalmente $\frac{\Delta P}{P} \geq 75\%$; com um erro experimental de, no máximo 3%, vemos que o método pode revelar detalhes de 4×10^{-4} na variação do índice de refração.

Para a determinação do perfil de $n(r)$, a partir do perfil de intensidade obtido, partimos da eq. (13)

$$\frac{P(r)}{P(o)} = \frac{n^2(r) - n_2^2}{n^2(o) - n_2^2} \approx \frac{n(r) - n_2}{n(o) - n_2} \quad (28)$$

Logo

$$n(r) = n_2 + \frac{P(r)}{P(o)} \cdot (n(o) - n_2) \quad (29)$$

Para a determinação de $n(o) - n_2$ temos:

$$\begin{aligned} n^2(o) - n_2^2 &= (AN)^2 \\ (NA)^2 &= (n(o) - n_2)(n(o) + n_2) \approx 3(n(o) - n_2) \\ n(o) - n_2 &= \frac{(AN)^2}{3} \end{aligned} \quad (30)$$

A obtenção do valor de (AN) é descrita no cap. (II). No nosso caso presente obtivemos

- a) - Índice degrau (Fibra CNET) - $AN = 0.21$
- b) - Gradiente de índice (fibra Bell) - $AN = 0.24$

Com isto determinamos $n(o) - n_2$ nos dois casos:

- a) - $n(o) - n_2 = 0,0147$
- b) - $n(o) - n_2 = 0,0192$

Um perfil de intensidade típico é mostrado na fig. (15).

O perfil foi obtido para um comprimento de 73cm e podemos ver a influência da presença de raios vazantes evidenciada pelos "ombros" no perfil. Outro fator que aparece claramente é a presença do defeito ("dip") no centro da fibra. As ondulações verificadas são devidas às camadas depositadas durante o processo de fabricação da preforma.

Adams et al {3} mostram que para valores de V suficientemente baixos, podemos ter também oscilações na intensidade devidas à existência de modos discretos na fibra. Tais oscilações podem ser praticamente eliminadas retificando-se uma fonte com largura de banda suficientemente grande (aproximadamente 100 nm {3}). No nosso caso o valor de V era

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (AN) = \begin{cases} 104 & \text{- índice degrau} \\ 141 & \text{- gradiente de índice} \end{cases} \quad (31)$$

$$a = \begin{cases} 43\mu\text{m} & \text{, degrau} \\ 51\mu\text{m} & \text{, gradiente} \end{cases} \quad \lambda = 0,5460\mu\text{m}$$

Com estes valores, podemos considerar a distribuição de modos na fibra como sendo contínua, e a existência de oscilações ser atribuída às camadas de CVD.

Para um estudo da influência dos raios vazantes na fibra de degrau de índice, fizemos um estudo do efeito do comprimento no perfil obtido. As figs. (18), (19), (20), mostram os perfis obtidos, respectivamente para comprimentos de 3-2 e 0,53 metros. Como, devido ao problema mencionado anteriormente, as escalas horizontais não eram as mesmas, fizemos uma transposição dos resultados obtidos para uma escala única, que permitisse melhor comparação. Podemos notar que, à medida em que encurta a fibra, as bordas do perfil vão aumentando de intensidade, devido à presença dos raios vazantes. Na fig. (21) colocamos agora os valores de $n(r)$ para os três comprimentos considerados e fica bem evidente o efeito dos raios vazantes.

Ao menor comprimento considerado, aplicamos a aproximação do fator de correção válido para comprimento nulo, com todos os raios vazantes presentes. Pela observação deste perfil corrigido, fig. (22), e pela fig. (21), podemos notar a rápida atenuação que acompanha tais raios. Mas vemos também que, mesmo após 3 metros, ainda encontramos evidência de sua presença. E uma fração ainda se propaga por grandes distâncias na fibra [32].

Medimos também uma fibra de gradiente de índice, com os comprimentos de 47 - fig. (23) - e 132 cm - fig. (24). Na fig. (25) comparamos os valores calculados de $n(r)$. O efeito esperado devido aos raios vazantes deveria ser bem menor que no caso anterior, pois temos que o número de modos vazantes existentes em fibras de perfil parabólico e degrau é dado por (26).

$$N_{\text{parabólico}} = \frac{v^2}{12} \quad (32)$$

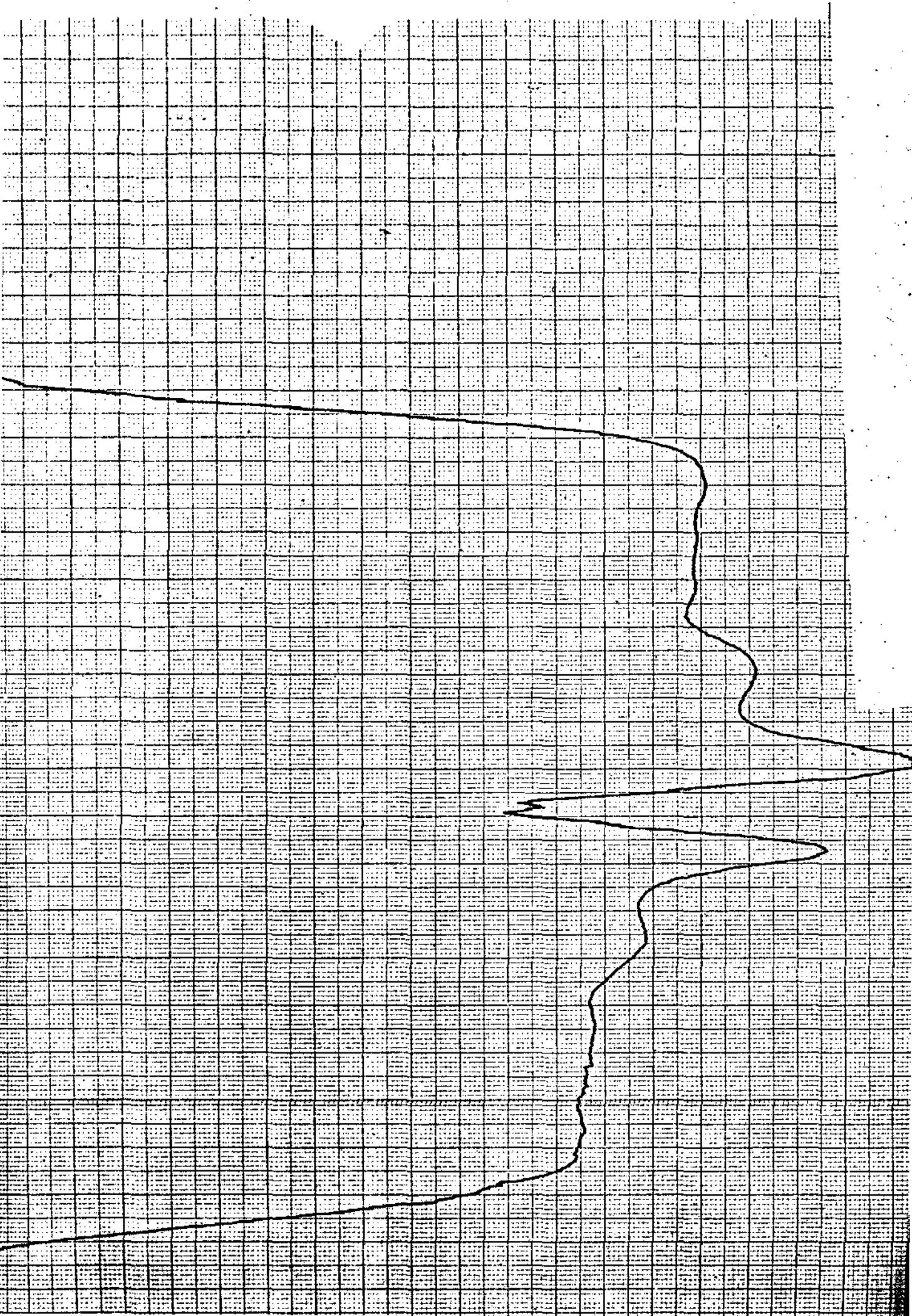
$$N_{\text{degrau}} = \frac{v^2}{2} \quad (33)$$

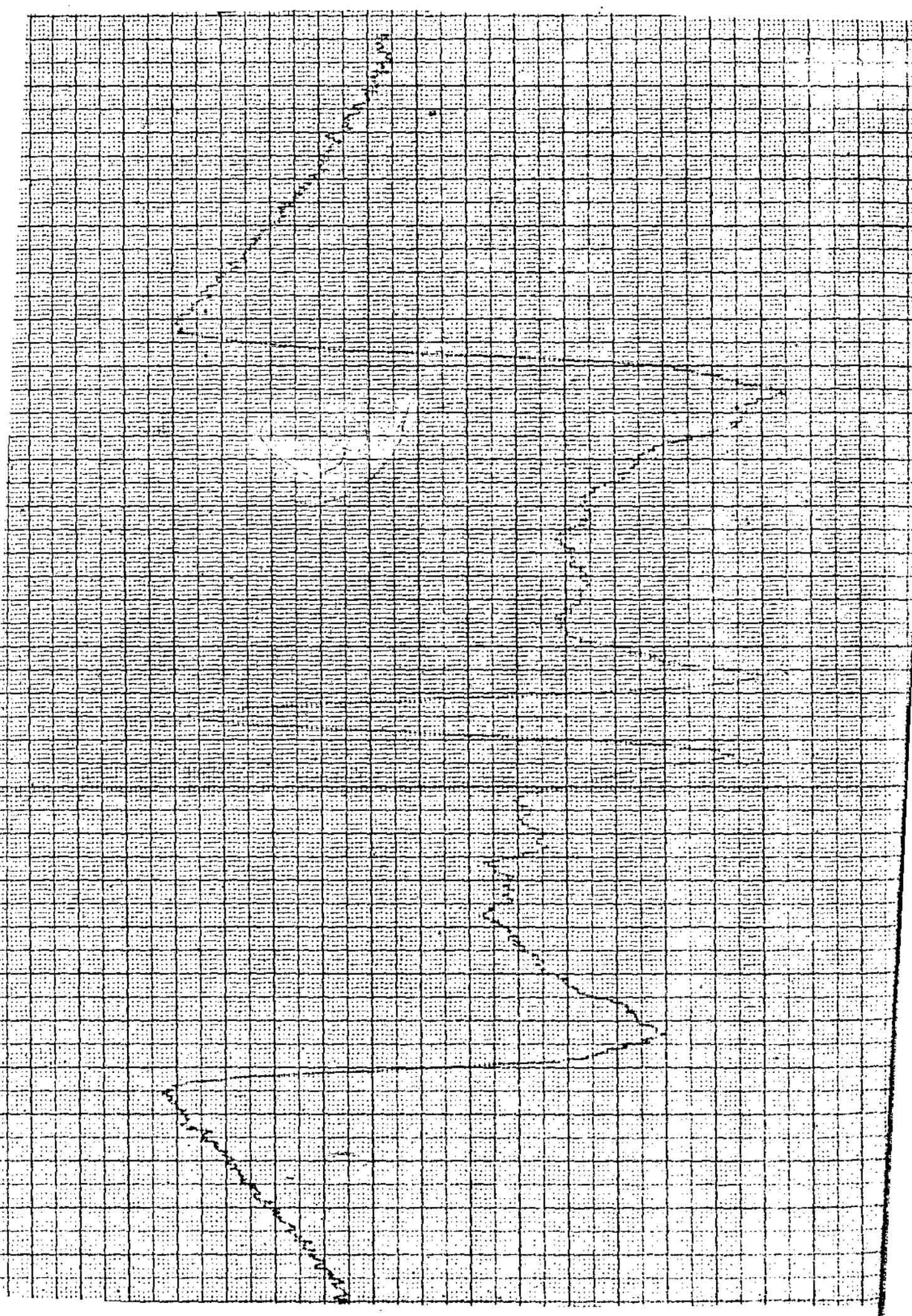
Mas, como vemos, não existe nenhuma evidência da presença de raios vazantes nos perfis apresentados. Este resultado confirma os resultados de outros autores [8], [26], que também não encontraram sinal da presença de raios vazantes em medidas semelhantes. O autor da ref. [26] encontrou uma concordância muito boa entre o perfil obtido em uma fibra de 2m de comprimento, usando esta mesma técnica, e o perfil obtido utilizando-se de medidas interferométricas. O fato parece indicar um mecanismo adicional de perda não considerado nos trabalhos até agora realizados. Um outro efeito que precisa ser examinado com mais atenção é a presença do defeito no centro da fibra. Este contribui para um aumento nas perdas de raios guiados [17], e esta perda poderia es-

tar compensando a existência de raios vazantes. Por outro lado, os autores da ref. (29), no trabalho básico sobre o método, apresentam clara evidência de raios vazantes em uma fibra de abertura numérica bastante alta (0,43). Tal fibra aparentemente não apresenta o defeito central típico de fibras produzidas pelo método CVD.

Pelos resultados apresentados, podemos ver que o método é capaz de resolver detalhes muito pequenos no perfil de índice de refração em uma fibra. Isto é particularmente vantajoso no estudo de fibras fabricadas pelo processo CVD. Um problema que o método apresenta é não fornecer valores absolutos, que devem ser obtidos por outro método. Outro problema é que, como é baseado na aproximação da ótica geométrica, só pode ser aplicado a fibras de valor V grande, preferencialmente da ordem de 100.

Isto exclui a possibilidade de uma utilização para fibras que transportam poucos modos e, principalmente, as fibras monomodo. Um terceiro problema é a análise do comportamento de raios vazantes que exige alguma computação e, no caso das fibras de gradiente de índice, a determinação de sua presença ou não. A maior vantagem que o método apresenta é a facilidade de implementação experimental, se comparada aos outros métodos existentes. Uma comparação mais completa entre este método e outros será apresentada no cap. (V).





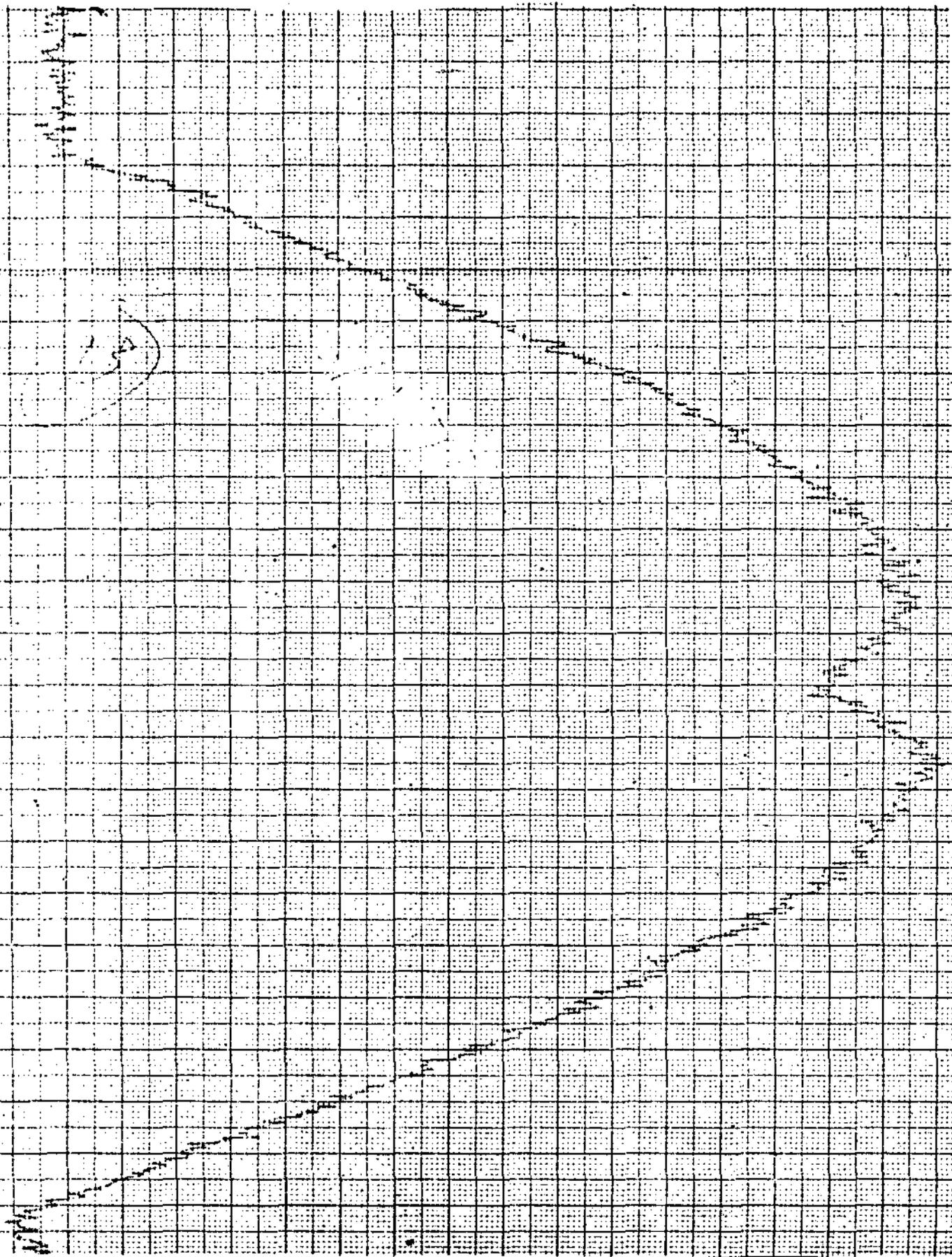




FIG. 18

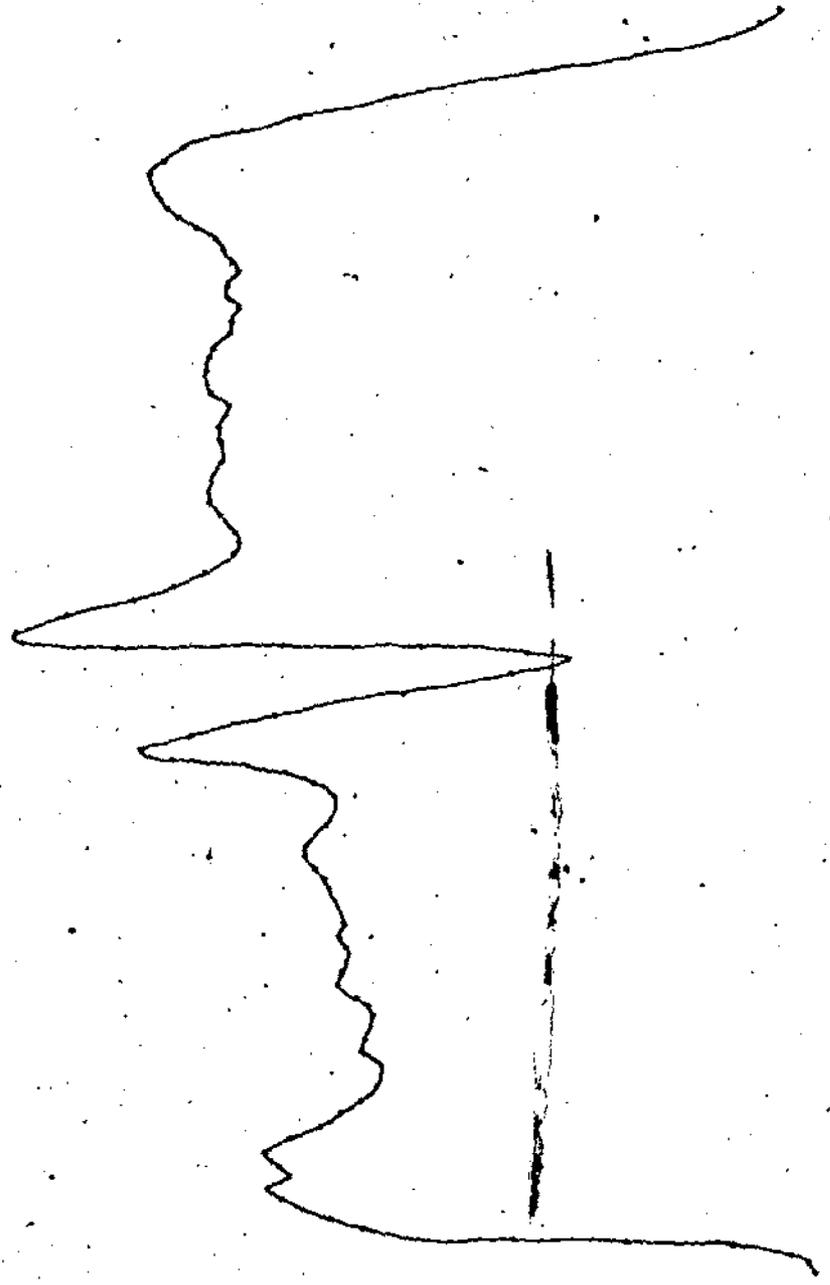
CAMPO PROXIMO
INDICE DEBILAU
L1 8 m

Errore sperimentale

FIG. 19

CAMPO PROXIMO
INDICE DESSAU
L: 2 m

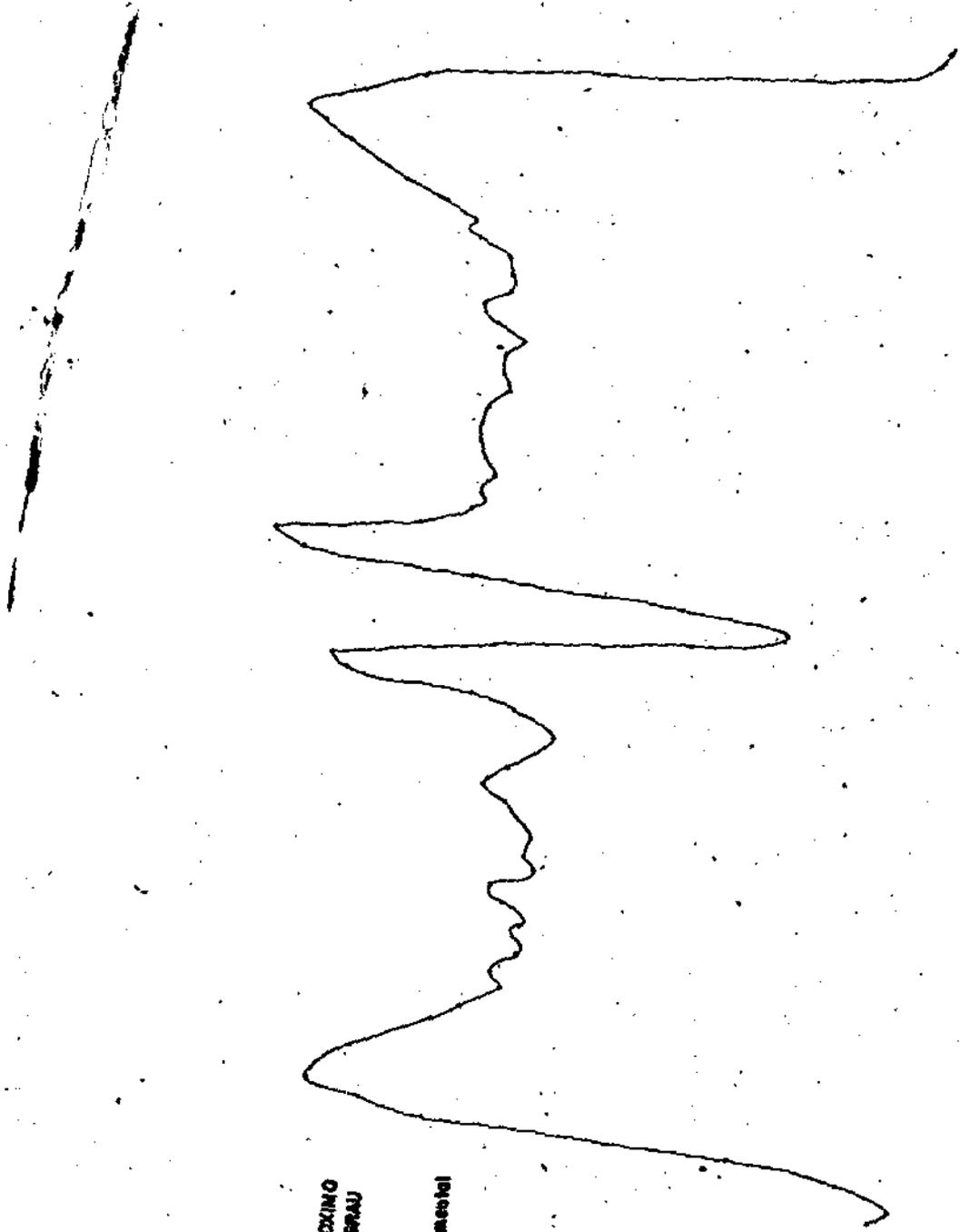
Erro sperimentali



- FIG. 20

CAMPO PROXIMO
INDICE DE GRAU
L: 0,53m

Leve experimental



COMPARAÇÃO ENTRE PERFIS OBTIDOS PARA COMPRIMENTOS DIFERENTES

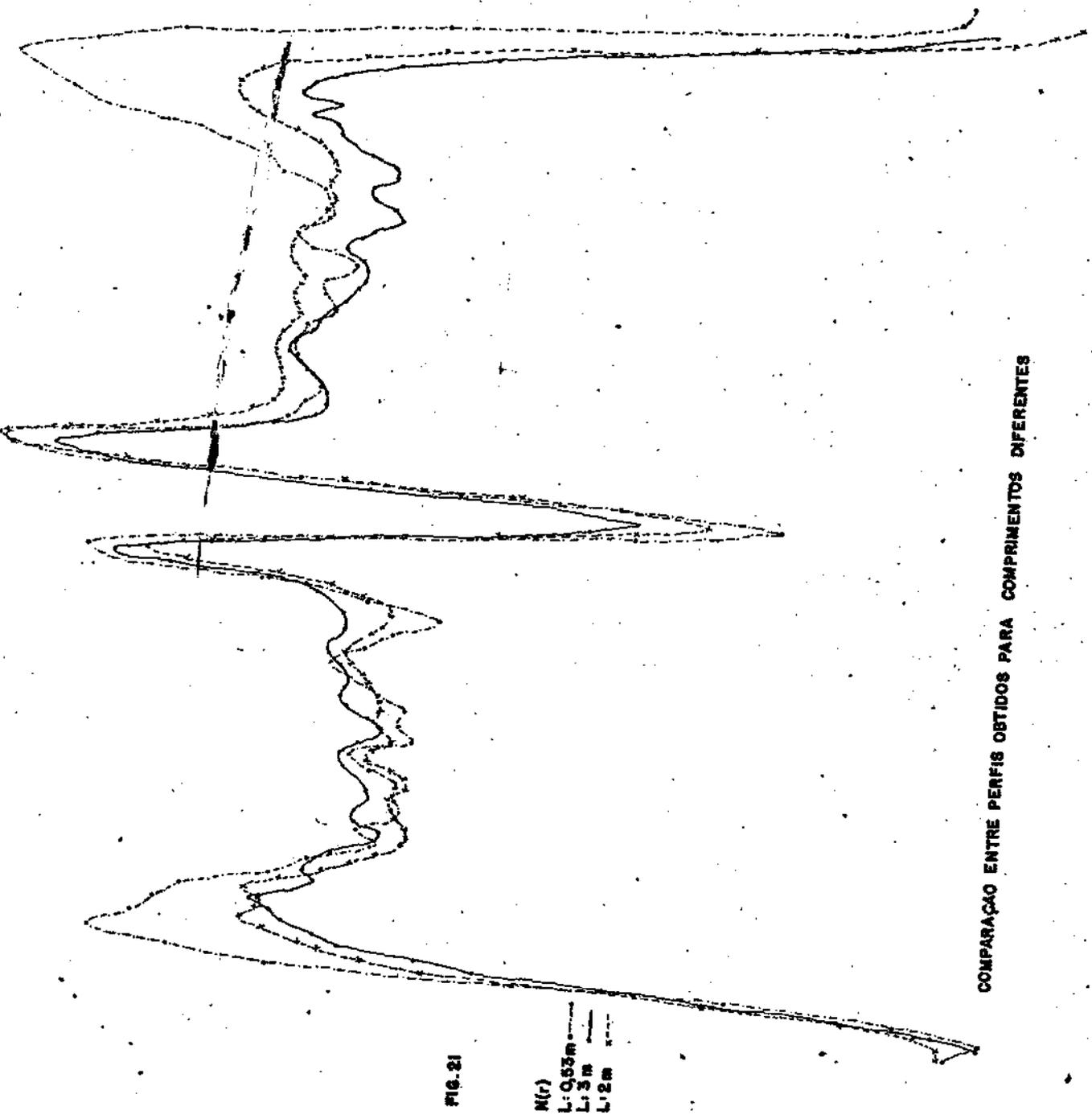


FIG. 21

$M(r)$
 $L=0.55m$
 $L=3m$
 $L=2m$

FIG. 22

CAMPO PROXIMO
N(7) CORRIGIDO
L. 0,53m



FIG. 23

CAMPO PROXIMO
GRADIENTE DE INDICE

L: 0,47m

erro experimental

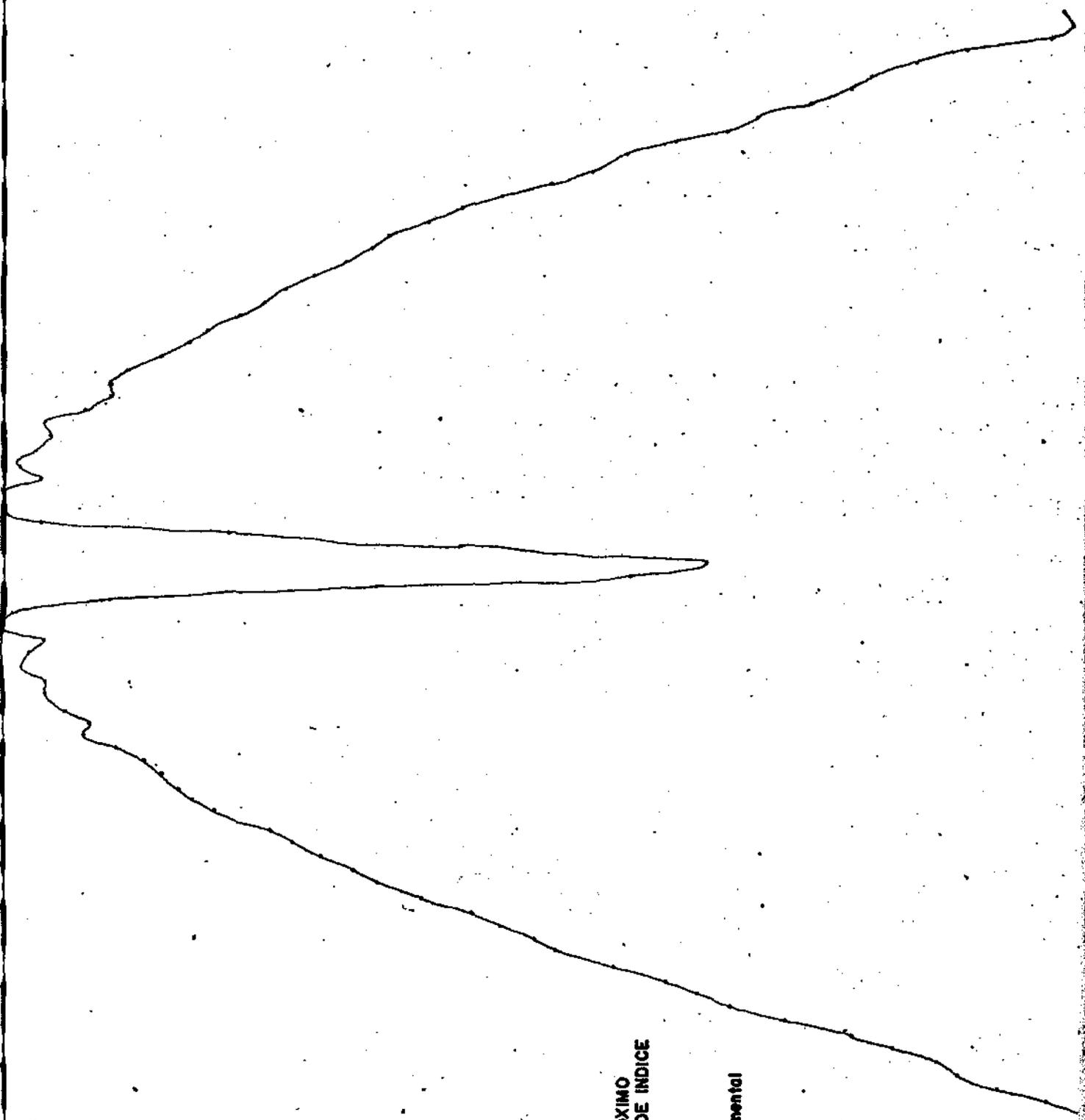
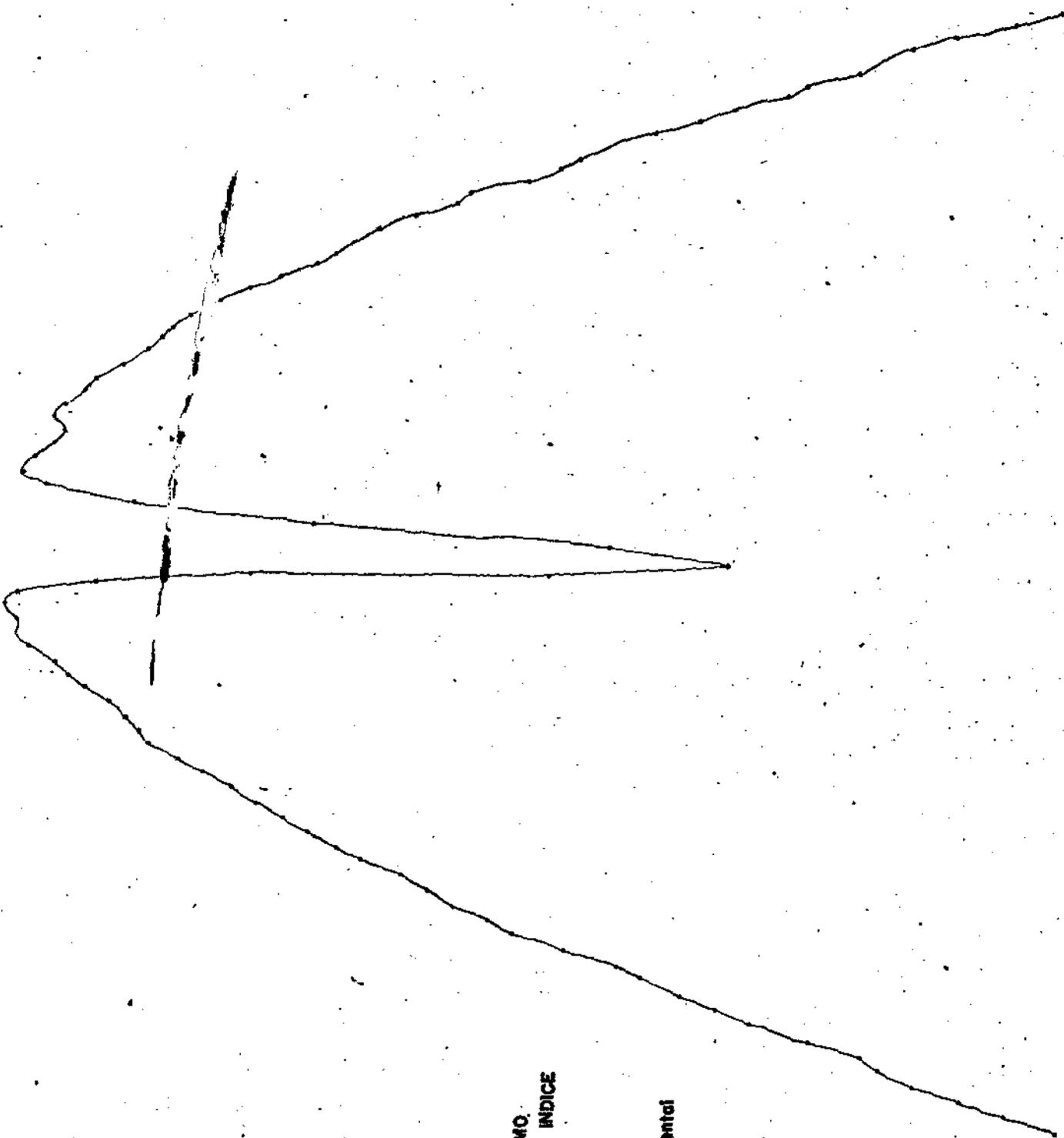


FIG.2.4

CAMPO PROXIMO
GRADIENTE DE INDICE
L: 1,32

erro experimental



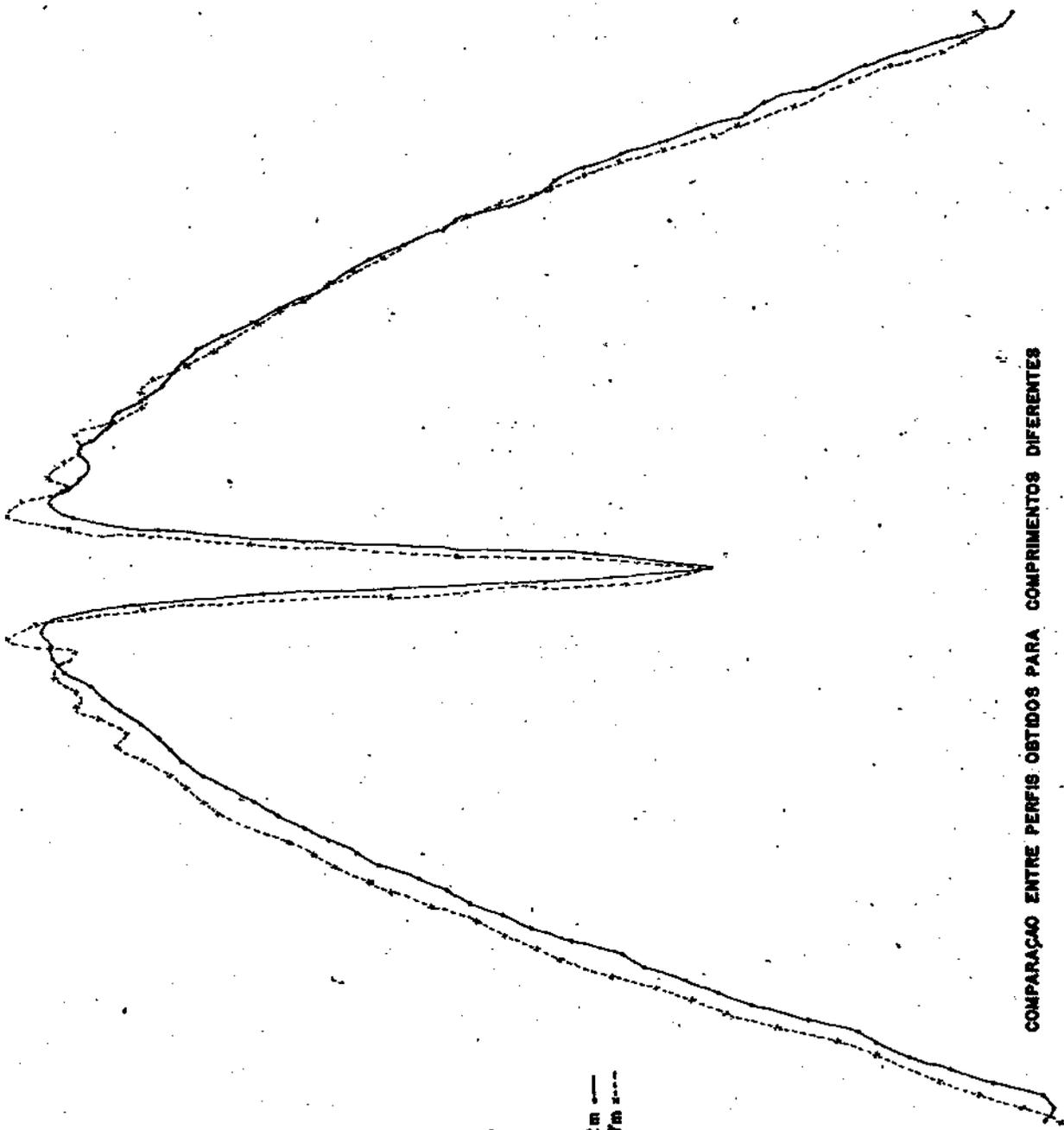


FIG. 25

$N(r)$
L: 1.32m —
L: 0.47m - - -

COMPARAÇÃO ENTRE PERFIS OBTIDOS PARA COMPRIMENTOS DIFERENTES

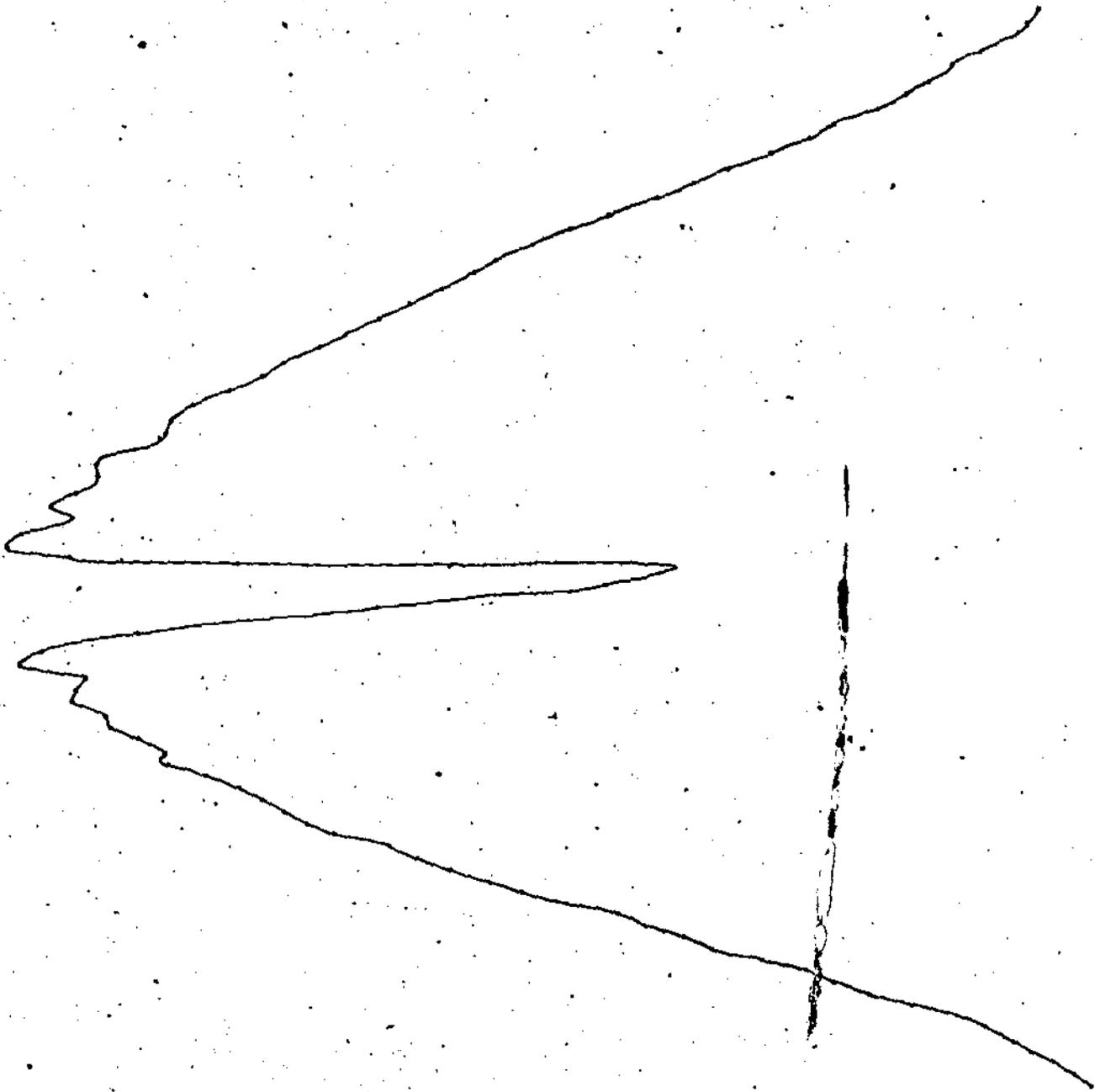


FIG. 26

CAMPO PROXIMO
M(r) CORRIGIDO
L: 0,47m.

CAPÍTULO IV:

OUTROS METODOS UTILIZADOS:

1. O METODO DA REFLETIVIDADE

Introdução:-

Este método foi descrito simultaneamente por Eickhoff e Weidel { 9 } na Alemanha e Ikeda, Tateda e Yoshikiyo {16} no Japão.

Baseia-se o método no fato que para incidência normal à superfície, a refletividade é dada por { 6 }

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \tag{34}$$

onde $n = \frac{n_2}{n_1}$ e a luz é incidente a partir do meio 1, sendo n_1 e n_2

os índices de refração dos meios 1 e 2 respectivamente.

Da fórmula (34) podemos facilmente deduzir duas outras fórmulas relacionando pequenas alterações no índice de refração a pequenas variações na refletividade:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{4}{n^2-1} \Delta n \tag{35}$$

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta R}{R} \left(\frac{\sqrt{R}}{1-R}\right) \tag{36}$$

Se considerarmos uma fibra de quartzo no ar, teremos que $n = 1.465$ e, substituindo em (35) fica

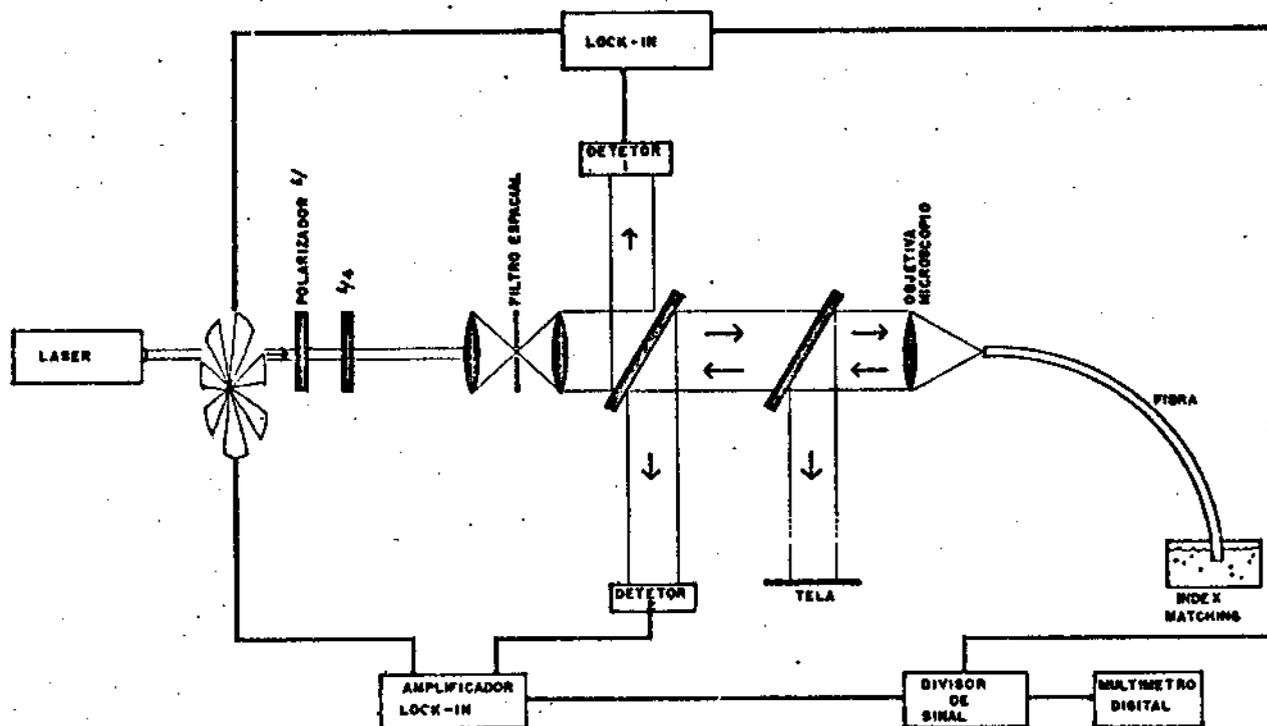
$$\frac{\Delta R}{R} = 3,5 \Delta n \tag{37}$$

Tomando $\Delta n = 0,01$, teremos uma mudança em R de 3,5%. Considerando que a variação mínima de n em fibras é da ordem de poucos por cento, vemos que é exigida uma grande precisão na medida de R.

A montagem experimental:-

A montagem experimental é mostrada na Fig. (27).

FIG.27 MONTAGEM PARA REFLETIVIDADE



A fonte usada foi um laser de He-Ne (Spectra Physics, mod. 125A). Em primeiro lugar, a luz passa por um "chopper" que fornece a referência para detecção por um amplificador de tipo "lock-in". Em seguida, o feixe atravessa um polarizador e uma placa de $\lambda/4$ ajustados de forma a termos luz polarizada circularmente. Isto, por um lado evita problemas de polarização na reflexão e permite que utilizemos a aproximação de incidência normal; por outro lado, também não permite que a luz refletida retorne à cavidade do laser. Logo após, o feixe é filtrado espacialmente e recolimado com um diâmetro de 15mm. Temos então um divisor de feixes (beam splitter) que nos dá dois caminhos. Um segue diretamente para um detetor (EG&G-SGD444) sendo utilizado como valor de referência para o controle das flutuações de intensidade do laser. O outro, após passar por uma lâmina de microscópio, segue para a objetiva de microscópio (Zeiss 80x, NA: 0,95), onde o feixe é focalizado sobre a superfície da fibra. A luz refletida da amostra é então coletada pela objetiva e colimada, pois a fibra encontra-se no plano focal desta última. Uma parcela é desviada pela lâmina de microscópio e serve para o controle da focalização, inicialmente com a utilização de uma ocular e finalmente, pela observação do tamanho do ponto (spot) em um anteparo distante 10 metros. O restante retorna ao divisor de feixes e é desviado para o detetor (EG&G-SGD 100A) que nos dá o valor refletido.

Os sinais dos detetores de referência e da luz refletida são

então enviados a dois amplificadores tipo "lock-in" (PAR 124A). As voltagens provenientes dos amplificadores são divididas em um divisor analógico (Molectron) e o quociente é mostrado em um multímetro digital (Philips). Este quociente será o valor registrado, de acordo com o procedimento mostrado adiante.

A fibra é preparada da forma descrita no Cap.(II) e montada sobre um suporte com rotações em torno de 3 eixos. Este suporte é colocado sobre um microposicionador XYZ com resolução de aproximadamente 1,3 microns. Com isto conseguimos ajustar a superfície da fibra no plano focal da objetiva, pela observação do ponto refletido no anteparo.

A outra extremidade da fibra é então imersa em glicerina para evitar reflexões que possam interferir. Nos casos em que combinamos esta medida com o método do campo próximo modificado, esta ponta imersa foi colocada sobre um detetor, como descrito adiante.

3.0 procedimento experimental:-

No nosso caso, para melhor rejeição das flutuações do laser, optamos por fazer uma medida relativa da refletividade, obtendo o quociente Q do valor refletido pelo valor da referência. Com a utilização de filtros de densidade neutra, conseguimos variações de 2 ordens de grandeza na fonte, mas o valor do quociente permanece estável, comprovando a linearidade do sistema.

Para testes gerais e calibração da montagem foram utilizados dois prismas, um de sílica fundida e outro de vidro BK-7, em lugar de fibra. A focalização foi feita sobre uma superfície polida do prisma. A luz que penetrava no prisma era refletida normalmente à incidência e não perturbava o resultado.

Os índices de refração dos vidros foram fornecidos pelo fabricante e são:

BK-7 - 1.5146
Sílica - 1.4568

De (34) podemos calcular a refletividade para incidência normal e temos

BK-7 - $R = 0.04188$
Sílica - $R = 0.03457$

Utilizando estes valores, fazemos a calibração das montagens medindo os valores de Q para os dois vidros e determinando a constante do sistema $\alpha = \frac{R}{Q}$. Obtemos

BK-7 - $Q = 0.990$ $\alpha = 0.04230$
Sílica - $Q = 0.825$ $\alpha = 0.04195$

Utilizamos então o valor médio $\alpha = 0.04215$ como constante de calibração do sistema.

Ainda utilizando os dois prismas fizemos uma avaliação dos erros envolvidos na medida. A reprodutibilidade da posição, observando-se o ponto no anteparo e fazendo a medição no micrômetro, foi de $\pm 2,5$ microns. Com focalizações repetidas, encontramos uma variação de 1,5% no valor de Q medido. Este erro inclui possíveis imperfeições na superfície e alinhamento do prisma com o plano focal.

O erro devido à eletrônica e às flutuações do laser foi de 3% e foi determinado observando-se as variações do valor medido durante algum tempo, para cada focalização. Este é o valor do erro relativo na refletividade medida. Como um valor típico para a diferença de índice de refração entre a casca e o núcleo de uma fibra de degrau de índice e inferior a 10%, vemos que com este método existe uma certa imprecisão na medida conseguida, sendo a sensibilidade muito inferior àquela exibida pelo método de campo próximo.

A resolução especial do sistema ficou determinada basicamente pela resolução do micrômetro, que era da ordem de 1,3 microns. O tamanho do ponto focal, no limite de difração da objetiva, pode ser calculado por (10)

$$S = \frac{1,22 \lambda}{NA} = \frac{1,22 \times 0,6328}{0,95} = 0,812 \mu\text{m} \quad (38)$$

para o laser de He-Ne, objetiva de $NA = 0,95$ em que a luz incidente enche toda a objetiva. Este é o valor teórico. Na ref. { 9 } os autores mencionam uma medição da distribuição da intensidade no ponto, encontrando uma gaussiana com largura de 0,85 microns. Esta medição não foi feita em nosso trabalho pois a resolução de micrômetro era o fator limite.

Para a determinação do centro da fibra, observamos em um anteparo a radiação que saia da fibra. Com isto conseguimos medir no micrômetro a localização da interface núcleo-casca em dois eixos perpendiculares. Fazendo a centralização de um dos eixos, procuramos fazer com que a varredura seguindo o outro, passasse pelo centro. Este foi um dos problemas encontrados, pois em várias ocasiões nós passamos ao largo do centro exato, e isto só era verificado muito depois, ao fazermos o gráfico dos pontos obtidos.

Um dos maiores problemas que enfrentamos, para o qual não tínhamos solução, foi que as fibras com que trabalhamos eram de núcleo dopado com boro. Neste caso alguns autores { 34 } encontraram variações na superfície devido à atmosfera até 15 minutos depois da

quebra da fibra. Em nosso caso, entre alinhamento e focalização da amostra e coleta de dados o tempo mínimo necessário era da ordem de 1 hora e meia. Como não dispunhamos de um valor absoluto de índice de refração devido a dificuldades com a interferometria, não nos foi possível estudar a extensão da influência desta alteração no perfil de índice. Os autores citados encontraram que a discrepância entre o valor absoluto e o valor medido era maior na região de maior concentração de boro.

4. Resultados e Discussão:-

Como vimos anteriormente, neste caso temos:

$$\frac{\Delta R}{R} = 3,5 \Delta n \quad (39)$$

Esta sensibilidade é excessivamente baixa para a fineza dos detalhes que queremos examinar, principalmente em fibras de CVD. Além disso, o ajuste da calibração da montagem é bastante problemático pois a estabilidade e a linearidade dos componentes em alguns casos deixaram muito a desejar.

Um resultado típico conseguido pelo método é exemplificado na fig. (28). Podemos ver a sua relevância, se comparado ao resultado da fig. (32), obtido na mesma varredura, através da técnica discutida a seguir, o campo próximo modificado (fig. (33)). Neste perfil assinalamos, para referência, pontos extremos e o centro da fibra determinados quando do alinhamento e centralização da mesma.

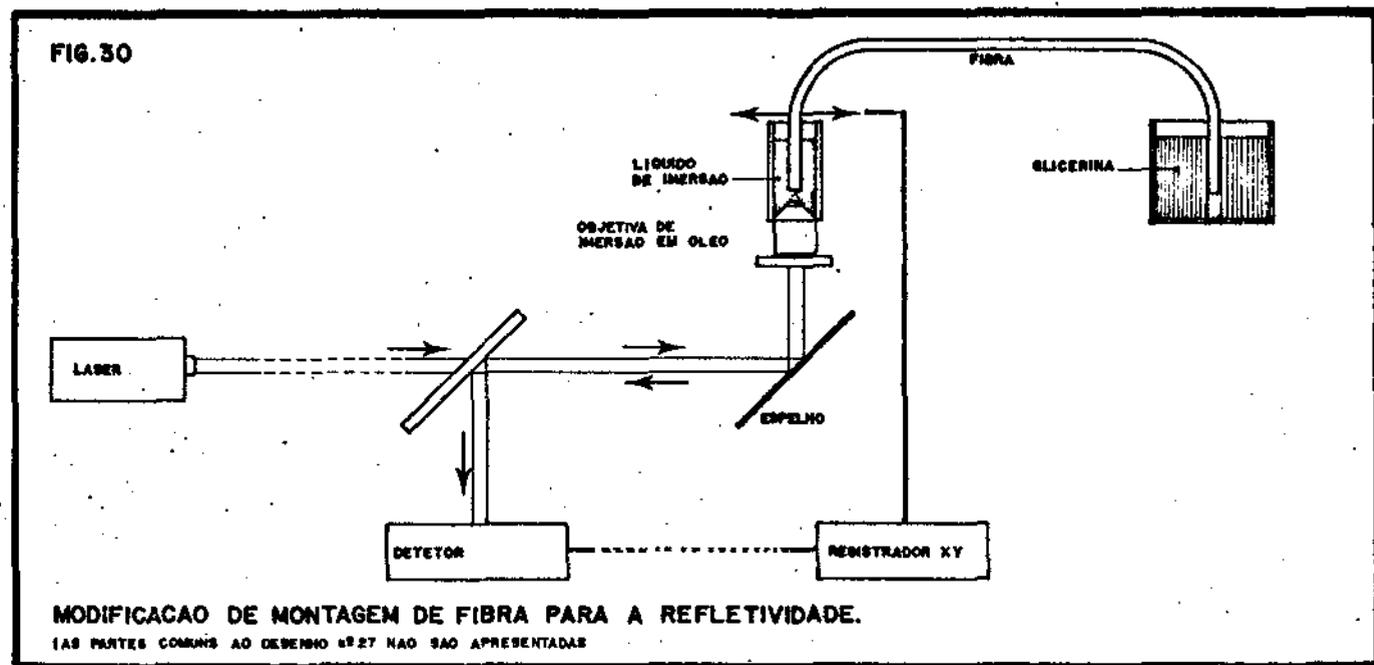
O gráfico da fig. (28) foi obtido logo após a quebra da fibra. Em uma amostra que havia sido quebrada há dias, não foi possível, na varredura, distinguir o núcleo da casca (fig. (29)) devido à deterioração da superfície quebrada pelo ambiente, logo após um certo intervalo de tempo. Nesta mesma figura podemos ver a influência de um defeito na superfície. Na inspeção da superfície com o microscópio ótico não conseguimos notar tal defeito, que aparece evidente na varredura. Isto reforça a necessidade de muito cuidado ao quebrarmos ou montarmos a extremidade da fibra para este processo. Uma observação da topografia da superfície quebrada em um microscópio eletrônico de varredura ajudaria a revelar problemas imperceptíveis no microscópio ótico.

Como mencionado anteriormente, um dos maiores problemas encontrados foi a centralização da fibra. Devido à demora na tomada de dados e à deterioração da amostra, qualquer erro de centralização exigia o preparo de nova amostra, novo alinhamento e algumas vezes até um ajuste da calibração. No caso do campo próximo, como a varredura era rápida e o registro imediato, qualquer problema verificado era logo corrigido alternando-se a posição de varredura.

Creemos que, na forma apresentada acima, o método é desaconselhado para a determinação do perfil do índice de refração em fibras óticas. A mesma conclusão pode ser encontrada em outros autores, na literatura.

Mas existe uma possibilidade de modificação do método, que será discutida abaixo, que aumenta tremendamente a sua sensibilidade. Embora ele permaneça bem mais complicado que o método do campo próximo, a sua insensibilidade aos efeitos da propagação e a possibilidade de obtermos valores absolutos para o índice de refração o tornam bastante atrativo, desde que os resultados obtidos se equivalham aos das outras técnicas.

A montagem experimental modificada é mostrada na fig. (30):



A modificação fundamental é a introdução de uma objetiva de imersão em óleo { 8 } e a substituição da interface fibra-ar pela interface fibra-óleo. Neste caso, como o índice de refração do óleo é 1,515 (óleo de imersão Zeiss) temos da eq. (35)

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{4}{n^2 - 1} \Delta n = 52 \Delta n \quad (39)$$

$$\text{onde } n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.456}{1.515}$$

Desta forma a sensibilidade do método torna-se quase comparável à do campo próximo. Se considerarmos o erro experimental na casa dos 3%, vemos que podemos revelar detalhes de 6×10^{-4} no perfil de índice de refração.

Na fig. (31) podemos ver que a montagem permanece inalterada quanto ao sistema de detecção; e quanto ao sistema de ilumina-

ção, até chegarmos à objetiva. Esta está agora colocada na vertical e em seu bojo adaptamos um pequeno cilindro para conter o óleo de imersão. A objetiva é especial para o trabalho em óleo (Zeiss, 100x 1,25). Em cima da objetiva, a fibra tem sua ponta mergulhada no óleo e é presa a um microposicionador, cuja base horizontal se desloca comandada por um motor do tipo "stepping". Podemos agora acoplar a saída do divisor de sinais ao eixo vertical da registradora XY e termos a velocidade de varredura acoplada ao eixo horizontal. Com isto conseguimos um registro direto do perfil de índice de refração e podemos calibrá-lo lendo no multímetro digital o valor de Q em alguns pontos.

Além da evidente melhoria em sensibilidade, temos várias outras vantagens introduzidas com estas modificações. Em 1º lugar, a extremidade de fibra imersa no óleo fica a salvo dos problemas relacionados com sujeira e deterioração. A maior rapidez na coleta de dados permite que se corrija imediatamente qualquer erro grosseiro, tal como falta ao passar pelo centro, desfocalização, etc. Esta maior velocidade contribui também para diminuir os problemas ligados à manutenção da estabilidade da eletrônica por um período de tempo muito longo.

Esta modificação servirá também para melhorar bastante a técnica do campo próximo modificado, a ser descrita em seguida.

O METODO DO CAMPO PRÓXIMO MODIFICADO

1. Introdução:-

Este método foi proposto simultaneamente por Summer (35) e Arnaud e Derosier (4). Baseia-se, como o método do campo próximo, no fato de que podemos definir uma abertura numérica local a cada ponto de fibra (13).

$$A(r) = (n^2(r) - n_2^2)^{1/2} \quad (12)$$

Como já vimos, uma objetiva de microscópio focalizará um feixe uniforme colimado sobre um ponto de diâmetro

$$S = \frac{1,22 \lambda}{AN} \quad (38)$$

Uma vez que tenhamos a AN da objetiva maior que a AN da fibra, este ponto focalizado sobre a superfície da fibra irá excitar um conjunto de modos que pode ser representado pela eq. (40).

$$P = \left\{ \sum_{\theta=0}^{\theta} P_g(\theta, \phi) \right\} + \left\{ \sum_{\theta=\theta_c}^{\psi} \alpha_v(\theta, \phi) P_v(\theta, \phi) \right\} + \left\{ \int_{\psi}^{\theta} \alpha_r(\theta, \phi) P_r(\theta, \phi) d\theta \right\} \quad (40)$$

onde

P_g = potência nos modos guiados representados pelo ângulo θ com o eixo.

P_v = potência nos raios vazantes associados aos ângulos (θ, ϕ) .

P_r = potência nos modos refratados representados pelos ângulos (θ, ϕ)

α_v = fator de perda associado ao modo vazante (θ, ϕ)

α_r = fator de perda associado ao modo refratado (θ, ϕ)

ϕ = ângulo azimutal definido na fig. (11)

ψ = ângulo máximo para raios vazantes

θ_c = ângulo crítico

Nesta equação está implícita uma integração em ϕ , de 0 a 2π .

O 1º termo da soma representa modos guiados pela fibra e vai ser responsável pela maior parte da potência recebida pelo detector. O 2º termo representa modos vazantes que também contribuirão parte da potência no detector, e o 3º termo representa modos refratados, que desaparecem rapidamente e não contribuem no detector.

Como vimos anteriormente, se definirmos a abertura numérica local da maneira apresentada, podemos escrever a potência aceita localmente por uma fibra multimodo na forma da eq. (13)

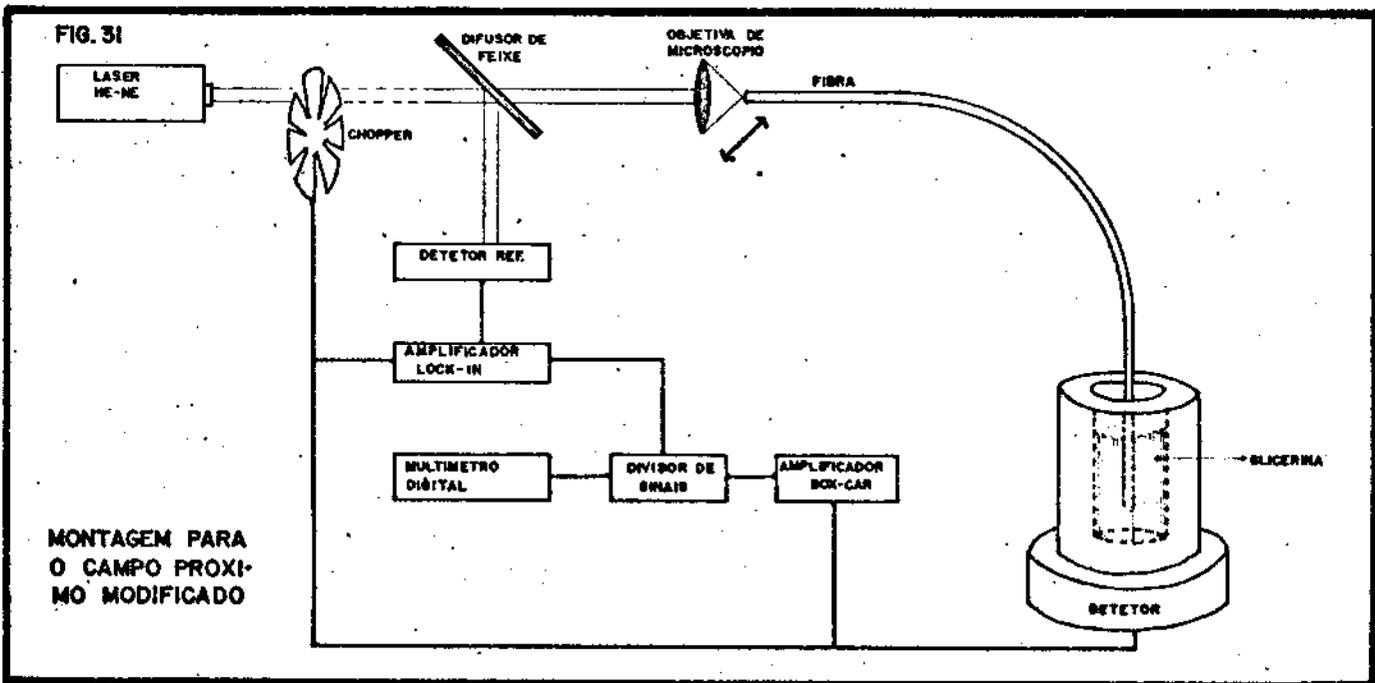
$$\frac{P(r)}{P(o)} = \frac{n^2(r) - n_2^2}{n^2(o) - n_2^2} \quad (13)$$

Se considerarmos, como no cap. (III), a contribuição dos modos vazantes, vemos que a potência observada pelo detetor devida à focalização do feixe sobre um ponto r da fibra será constituída de: toda a contribuição devida ao 1º termo da eq. (40), com uma dependência em r dada pela eq. (13); uma parte da contribuição do 2º termo da equação, que pode ser corrigida da maneira mostrada no cap. (III).

Vemos, portanto, que o método opera como o método do campo próximo, com uma inversão entre a fonte e o detetor. O detetor passa a ver toda a saída da fibra, enquanto a fonte vê somente um ponto da superfície da entrada.

2. A Montagem Experimental:-

No nosso caso, a montagem utilizada foi a mesma do método da refletividade, pois acoplamos os dois métodos. A única diferença foi a presença de mais um detetor e a eletrônica necessária (fig.31).



Os detalhes da montagem já foram discutidos junto ao método anterior, até o final da fibra. Neste caso, o final da fibra foi colocado em um pequeno cilindro constituído de um tubo capilar colado com cimento Lakeside ($n=1.5$) a um pedaço de lâmina de microscópio. O capilar era cheio de glicerina e a extremidade posterior da fibra colocada dentro dele. O conjunto era então colocado sobre a superfície de um detetor de potência (Coherent Radiation, mod. 212) que era acopla-

do a um amplificador. O sinal resultante era ainda amplificado e integrado por um amplificador "box-car" (PAR mod. 160) e colocado em um 29 divisor de sinais (Molectron) idêntico ao anterior. Em seguida, o quociente era mostrado em um voltímetro digital (Data Precision mod. 248). Algumas vezes, em lugar do "box-car" utilizamos um segundo "lock-in", idêntico ao anterior (PAR, 124A).

3. O Procedimento Experimental:-

Como fizemos estas medidas em conjunto com as medidas de refletividade, utilizando a montagem para as últimas, os cuidados com a iluminação da fibra, focalização do ponto, paralelismo da fibra com o plano focal, etc., foram os descritos anteriormente. Não utilizássemos a mesma montagem e o método seria de implementação mais simples que a utilizada. Os cuidados básicos, entretanto, permaneceriam os mesmos. Entre estes, o detetor deve ter uma área suficientemente grande para receber todos os raios oriundos da fibra. Isto torna o método praticamente insensível a efeitos de acoplamento de modos, que influenciam as medidas de campo próximo. Mas um problema deste último método subsiste, que é a atenuação diferencial de modos. Para eliminá-la devemos, nos dois métodos, utilizar pedaços bem curtos de fibra.

Para que tenhamos todos os termos da eq. (40) presentes, a radiação no ponto deve obedecer, pelo menos aproximadamente, à lei de Lambert. Os autores da ref. (4) fizeram esta verificação deslocando um detetor a uma certa distância do ponto focal. Para uma objetiva de $AN = 0.57$, e para ângulos inferiores ao correspondente à abertura numérica da fibra, foi encontrado uma concordância razoável entre os valores medidos e a lei esperada. Mas eles utilizaram como fonte um LED que se assemelha a uma fonte lambertiana. No nosso caso, usamos um feixe de laser filtrado e expandido, e iremos focalizar apenas uma porção razoavelmente uniforme do feixe. Também neste caso o desvio entre esta fonte e o emissor lambertiano ideal pode ser desprezado dentro dos limites de pequenas aberturas numéricas aceitas pelas fibras. Esta aproximação foi a utilizada pelo autor da ref. (35).

Tendo assegurada a excitação de todos os modos a cada ponto analisado, é necessário estudar o comportamento dos raios vazantes. Esta discussão foi apresentada no cap. (III), e os mesmos fatores de correção aplicam-se ao caso presente.

Para este trabalho devemos ainda como no caso do método do campo próximo, utilizar duas extremidades de fibras bem preparadas.

São que, agora, a extremidade de entrada da fibra é que tem importância vital, enquanto a extremidade de saída pode ser de qualidade um pouco inferior, desde que toda a radiação propagada possa chegar ao detetor.

A leitura dos dados foi feita observando-se, em um voltímetro digital, o quociente entre o sinal do detetor e um sinal de referência. Tal sinal de referência, como no caso da refletividade, servia para eliminar as flutuações do laser. O sinal do detetor, antes de chegar ao divisor analógico, era amplificado no detetor de potência e novamente amplificado e integrado no amplificador "box-car".

O erro relativo devido às flutuações do laser e à eletrônica foi de 3,5%. Foi medido anotando-se as flutuações em um mesmo ponto, durante algum tempo. A discussão dos erros envolvidos com a injeção de luz na fibra foi feita com referência ao método anterior.

4. Resultados e discussão:-

A sensibilidade do método é a mesma do método do campo próximo. A resolução é que foi um pouco inferior pois ficou limitada pelo microposicionador utilizado, como já descrito anteriormente. Mas isto poderá ser melhorado, se utilizarmos um microposicionador com motor "stepping", como visto na modificação do método da refletividade.

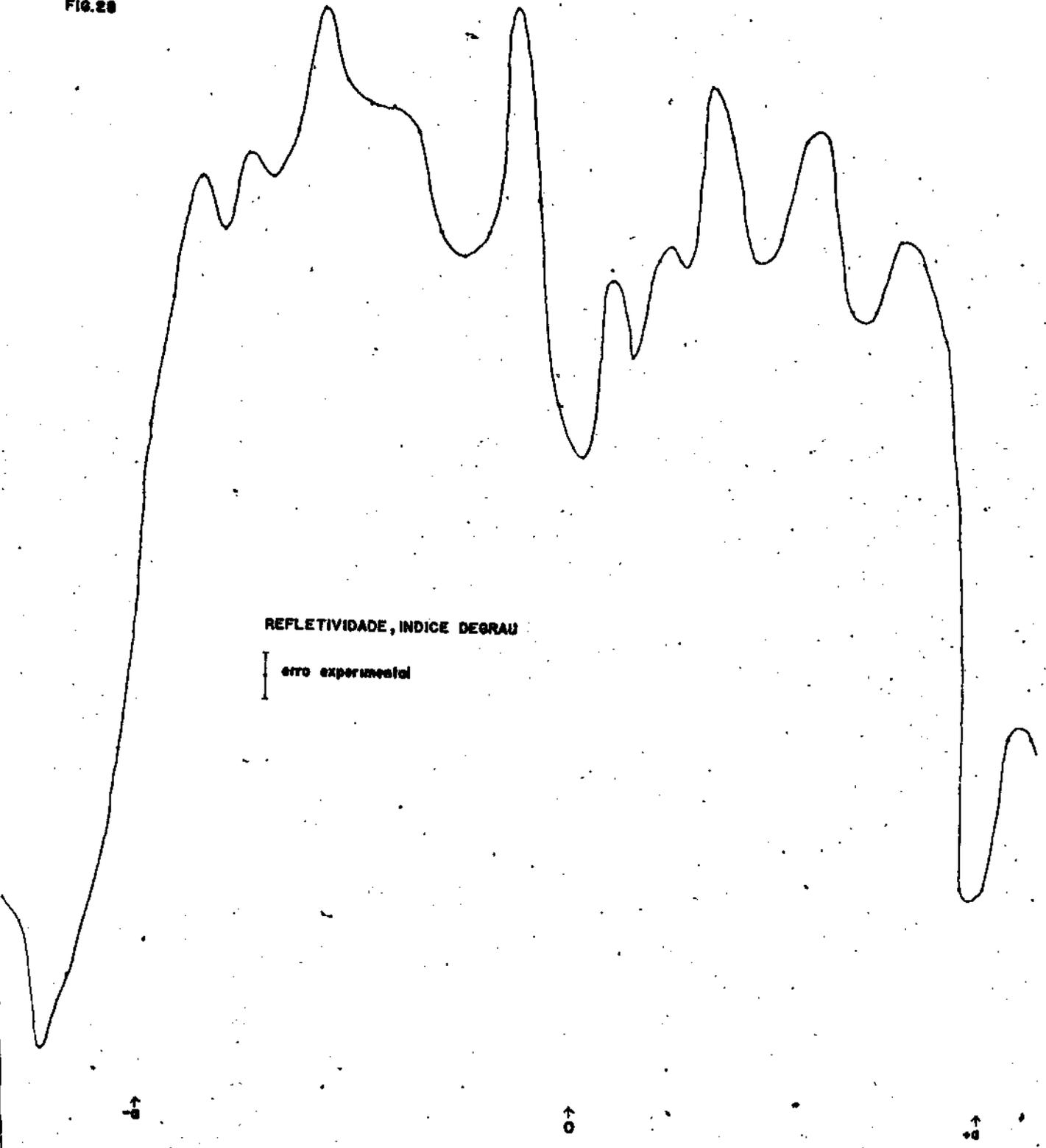
O maior problema que tivemos com este processo foi, como no caso da refletividade, a demora envolvida com cada varredura e a conseqüente dificuldade em se corrigir eventuais defeitos, tais como varredura descentrada, desfocalização, etc. O método em si não apresenta dificuldades experimentais como as encontradas nas medidas de refletividade. Sua sensibilidade é bem superior à da última e os cuidados não precisam ser tantos. Aliás, a montagem experimental utilizada pelos autores da ref. { 4 } envolve somente a colocação de um LED ou laser em lugar da ocular de um microscópio e a fixação da fibra a um suporte móvel que serve para deslocá-la sobre a objetiva do microscópio. No nosso caso, pelo nosso desejo de acoplarmos o método à refletividade, que naquele instante era nossa preocupação maior, utilizamos uma montagem um tanto mais sofisticada que o estritamente necessário. Como a parafernália eletrônica utilizada era bastante grande e nem sempre disponível e como o tempo para cada medida era um pouco longo, restringimos nossa investigação neste caso a uma caracterização da potencialidade do método face ao método do campo próximo, que estudamos mais aprofundadamente.

Um resultado típico obtido é o mostrado na fig. (32). Podemos notar claramente a semelhança com os resultados obtidos pelo método do campo próximo. Podemos ver também que a resolução espacial é um pouco inferior devido ao problema com o microposicionador. Deve ser lembrado que, neste caso o comprimento de onda utilizado foi 663nm, e portanto o valor V era 90. No entanto, se compararmos este resultado com aquele obtido na mesma varredura, mas através da refletividade, fig. (28), veremos que o resultado obtido é bem superior.

Os resultados apresentados utilizando-se esta técnica [4], [35], são bastante semelhantes aos obtidos nas mesmas fibras com o método do campo próximo. Em particular, na ref. [4] temos a ausência de raios vazantes em uma fibra de gradiente de índice. Isto concorda com o nosso resultado, usando o outro processo.

As mesmas considerações quanto à aplicabilidade do método devem ser feitas a esta técnica e ao campo próximo; ambos exigem simetria cilíndrica, ambos se aplicam apenas a fibras multimodo, nenhum fornece valores absolutos para o índice de refração.

FIG. 28



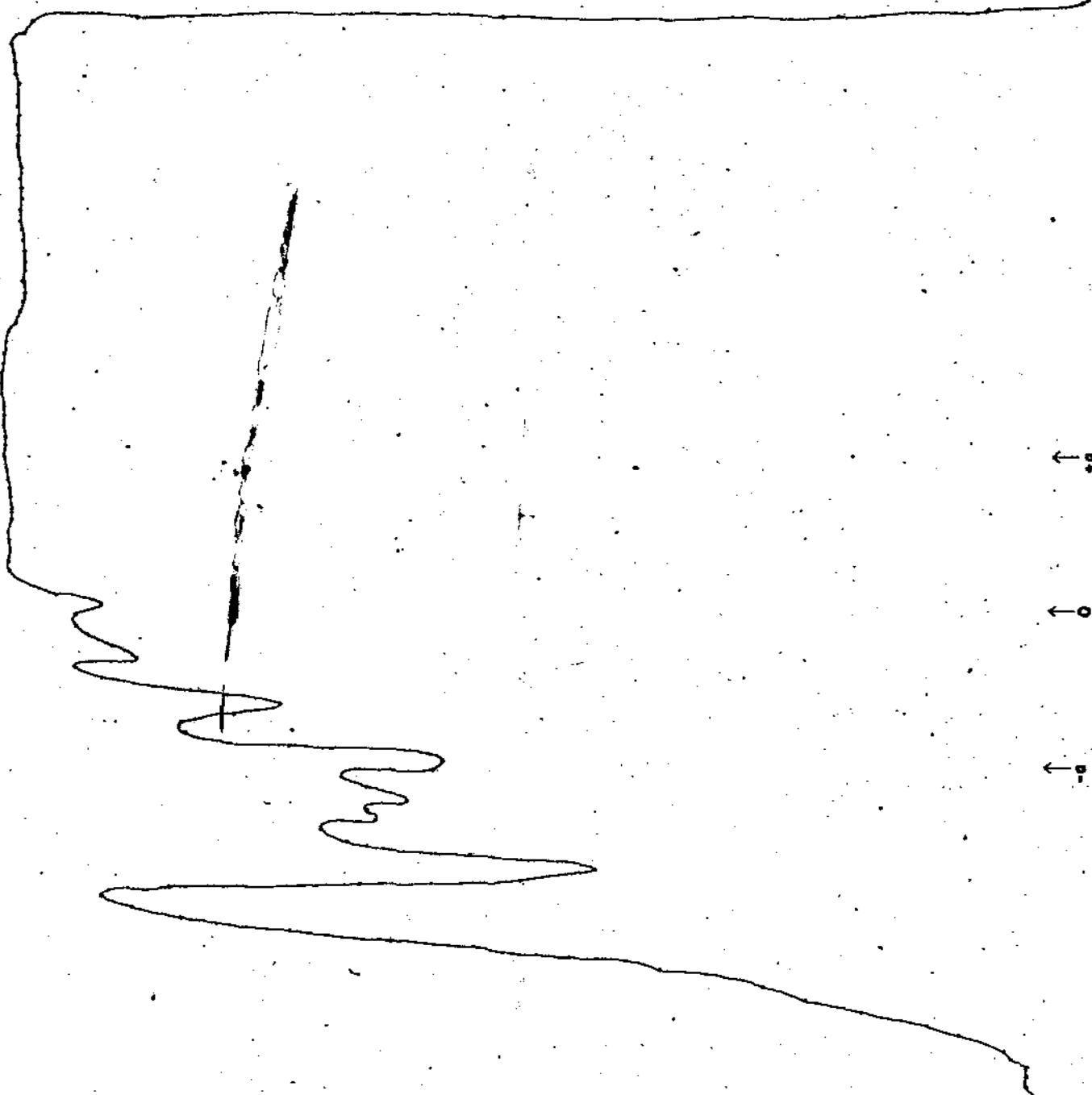


FIG. 29

REFLETIVIDADE
INDICE DEGRAU

erro experimental

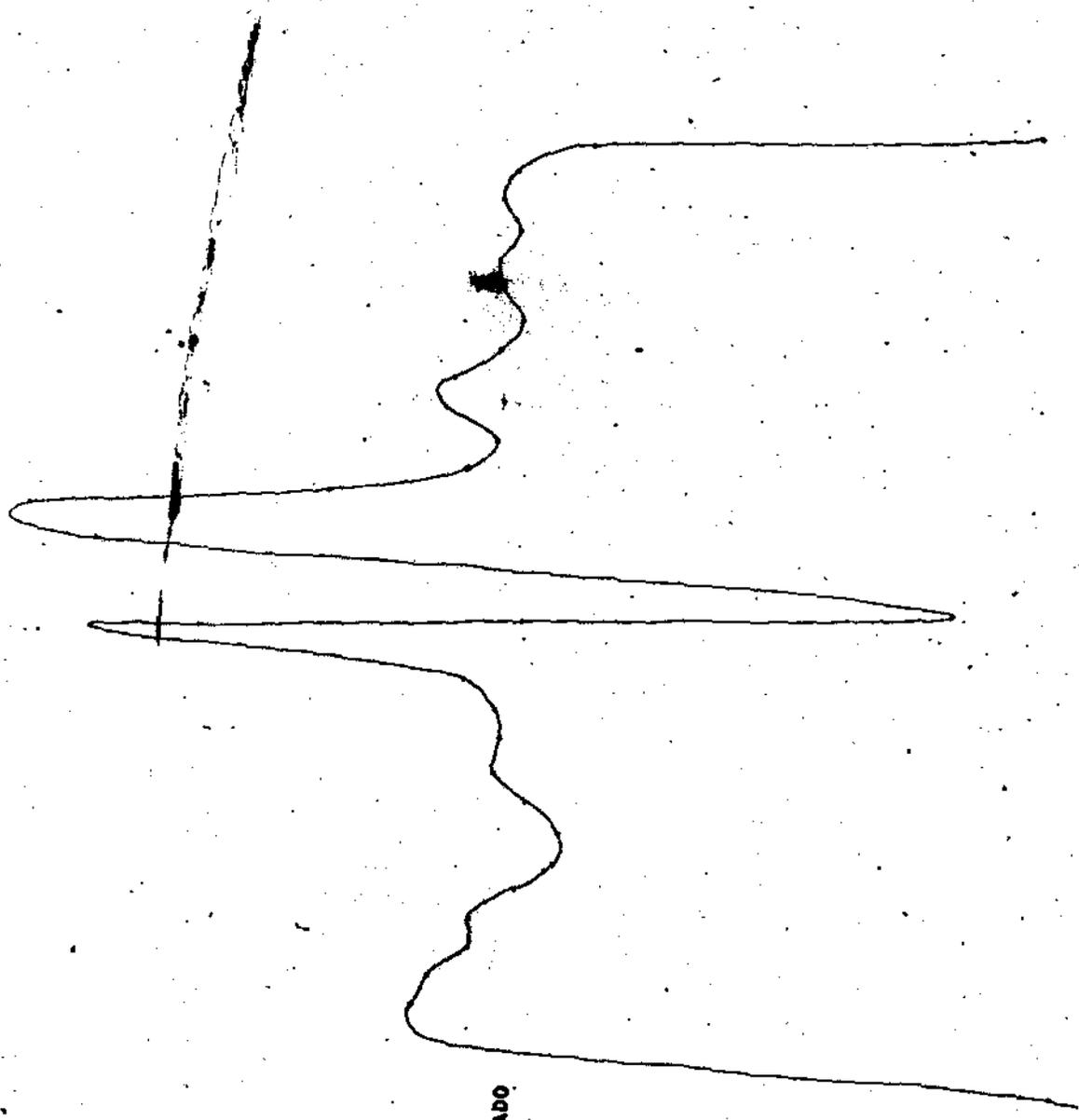
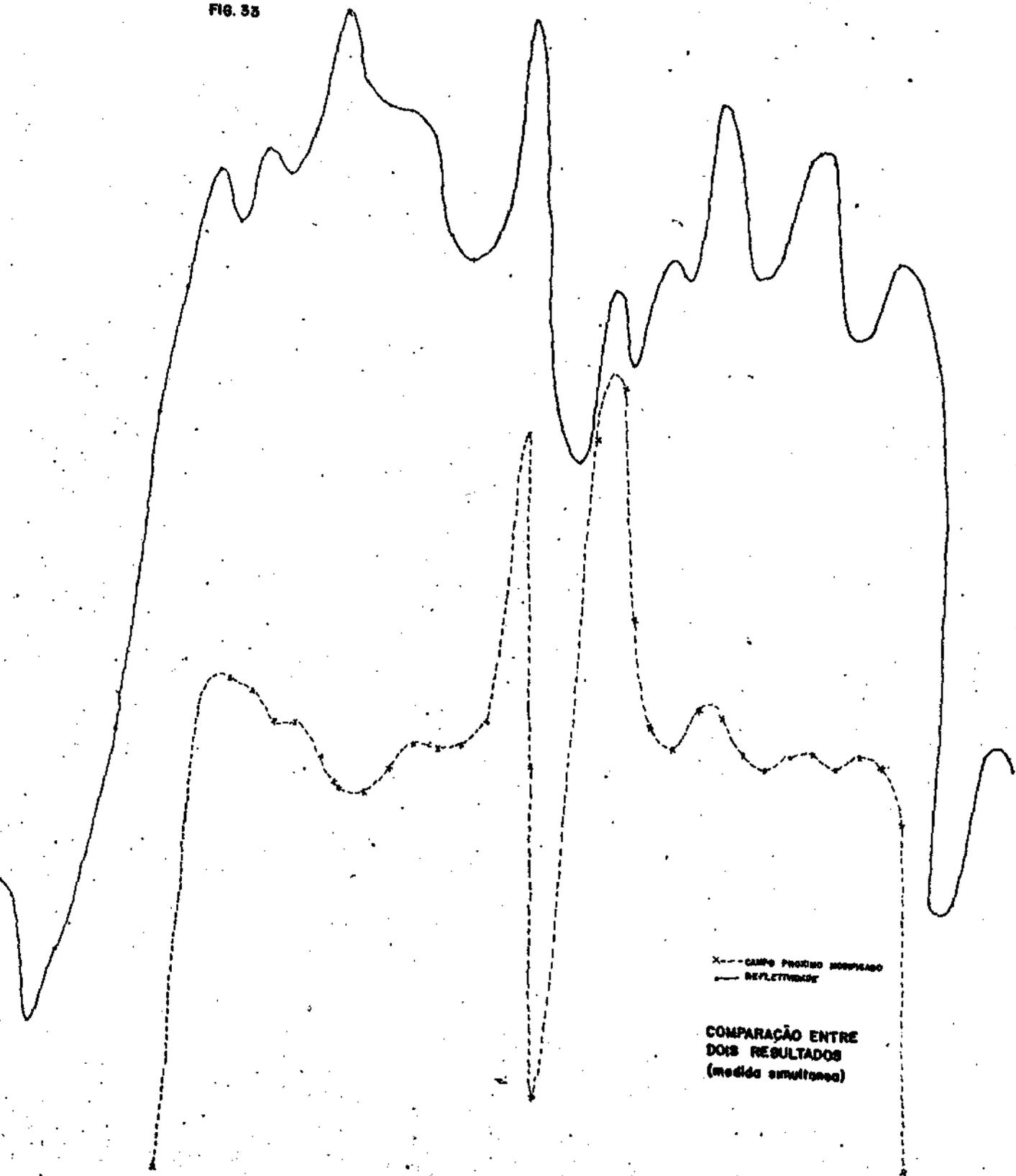


FIG. 26

CAMPO PROXIMO MODIFICADO
INDICE DE ERROU

erro experimental

FIG. 35



CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

1) Vantagens e desvantagens de cada processo:-

A) Interferometria:-*

Para esta medida é necessária a preparação de pequenos cilindros de cerca de 50-100 μm de espessura, com as faces bem paralelas e perfeitamente polidas, para que tenhamos bons resultados {7}. Observando a amostra contra um campo de franjas paralelas, podemos medir o índice de refração pelo deslocamento das franjas na forma tradicional [1]. Algumas conclusões podem ser apresentadas acerca de tal método:

- a) A preparação das amostras é bastante complexa, demandando muito tempo e cuidados especiais.
- b) Apenas umas poucas franjas cobrem o campo e detalhes dentro das franjas não são facilmente detectáveis.
- c) O método exige um microscópio de interferência bastante especializado, pois as amostras são relativamente grandes.
- d) O método oferece a vantagem de não depender das características de propagação na fibra, podendo ser utilizado em qualquer fibra.
- e) O método é capaz de fornecer valores absolutos.

B) Refletividade:-

Este processo, na forma que foi utilizada, deixa muito a desejar. Inicialmente sua sensibilidade era excessivamente baixa. Em segundo lugar, a eletrônica utilizada era bastante complexa e seu ajuste razoavelmente difícil. Além disto, medidas eram demoradas e o fator tempo influencia os resultados, como foi visto {34}. Tal montagem não pode ser considerada uma alternativa válida aos outros métodos, o que foi confirmado por outros autores {8} {29}.

Mas a modificação apresentada para a montagem parece promissora. Como vimos, a sensibilidade deverá ser grandemente aumentada e fatores relacionados com a exposição da face da fibra diminuídos.

As seguintes conclusões podem ser apresentadas acerca do método:

- a) As dificuldades experimentais de montagem e calibração são grandes.
- b) A preparação das fibras é simples, embora exija cuidados.

* O trabalho realizado neste método não foi incluído no texto. Aqui aparece apenas para efeito de comparação.

- c) Podemos analisar perfis de fibras monomodo e multimodo.
- d) Podemos acoplá-lo ao método do campo próximo modificado, mais sensível, e usá-lo como calibração.
- e) Podemos estudar preforma, antes do puxamento.

C) O Campo Próximo:-

Este foi o método mais exaustivamente investigado no curso de nosso trabalho. Sua sensibilidade, como foi visto, permite revelar detalhes muito pequenos no perfil do índice de refração. A resolução, dada pelo limite de difração da objetiva, é boa. Com a fonte potente a relação sinal-ruído é alta, permitindo a utilização de filtros de banda estreita.

Uma atenção especial foi dada à verificação da existência de raios vazantes e sua influência nos perfis obtidos. No caso das fibras de índice degrau, a concordância obtida entre os resultados e a teoria foi boa. A presença de tais raios influenciou marcadamente os perfis obtidos. (Fig. (21)). Podemos ver claramente a sua rápida atenuação em pequenos comprimentos de fibra.

Mas, no caso da fibra de gradiente de índice, não foi detectada a presença de tais raios. Este resultado, embora em desacordo com a teoria, confirma resultados anteriores de outros autores {4} {8} {26}. Em todos estes casos, o perfil obtido, mesmo para pequenos comprimentos, concorda quase exatamente com os perfis obtidos por técnicas que não utilizam propagação na fibra (Interferometria e Refletividade). Por outro lado, alguns autores {27} {33} utilizando o primeiro a técnica do campo próximo e o segundo uma técnica descrita na referência, mostram claramente a presença de tais raios. A coincidência que notamos foi que, no nosso caso como em todos os autores que não notaram os raios vazantes, a fibra exibia o "defeito" ("dip") central, característico do processo CVD, enquanto nas referências que registraram a presença de raios vazantes, as fibras foram fabricadas por outro processo e não exibiam tal defeito. Este fato será objeto de maiores investigações, para determinarmos melhor o efeito do processo de fabricação nas características das fibras de gradiente de índice.

As vantagens e desvantagens do método são as seguintes:

- a) A preparação das fibras para as medidas é bem simples.
- b) A sensibilidade do método é elevada, permitindo observar variações muito pequenas do perfil.
- c) Sua resolução é boa, sendo dada pelo limite de difração da objetiva.

- d) A implementação experimental é fácil, não exigindo ajustes mais complicados.
- e) A avaliação do efeito dos raios vazantes exige uma certa computação para a transformação do perfil de intensidade em perfil de índice.
- f) O método não fornece valores absolutos para o índice de refração.
- g) O método só pode ser utilizado com fibras de valores V altos (da ordem de 100, ou mais), caso contrário efeitos modais influenciarão o resultado [3].

D) O Campo Próximo Modificado:-

Tal método foi utilizado principalmente para isolarmos dificuldades com a medida de refletividade de problemas com a parafernália eletrônica. Na Fig. (33) podemos ver resultados obtidos simultaneamente com os dois métodos, o que mostra que o problema maior era a técnica de refletividade.

Da forma como usamos o método, pudemos chegar às seguintes conclusões:

- a) A preparação das fibras para as medidas é bem simples.
- b) A sensibilidade é alta, equivalente à do campo próximo.
- c) A resolução era inferior à do campo próximo, mas poderá ser melhorada, como foi sugerido.
- d) O problema da propagação dos raios vazantes exige uma certa computação para correção.
- e) O método pode ser combinado à técnica da refletividade.
- f) O método deve ser utilizado apenas para fibras multimodo.

2) Comparação entre os métodos:-

Apresentamos a seguir, um quadro comparativo entre os métodos utilizados.

METODO	PREPARO DAS FIBRAS	ILUMINAÇÃO	RESOLUÇÃO	SENSIBILIDADE	MONTAGEM EXPERIM.	TIPOS DE FIBRAS
Campo Próximo	Fácil (Quebra)	Incoerente Lambertiana	Limitada pela Difração ($< 1\mu\text{m}$)	Alta	Simples	Multimodo
Refletividade	Fácil (Quebra)	Laser	Limitada pela Montagem ($\sim 1,5\mu\text{m}$)	Muito Baixa	Difícil	Todas
Campo Próximo Modificado	Fácil (Quebra)	Incoerente ou Laser	Limitada pela Montagem ($\sim 1,5\mu\text{m}$)	Alta	Simples	Multimodo
Interferometria	Complexo (Polimento)	Coerente (do microscópio)	Baixa	Alta	Microscópio Interferométrico	Todas

3) Propostas para trabalhos futuros:-

Inicialmente deverá ser feita uma revisão da técnica da refletividade com a montagem modificada apresentada no texto. Esta se prestaria então a estudos em que não pudéssemos utilizar a técnica do campo próximo, mais simples.

Um outro trabalho que deverá ser feito é um estudo da dispersão do índice de refração com o comprimento de onda da radiação. Existem evidências sugestivas de seu papel na distorção do perfil de índice {4}. Nos métodos que envolvem transmissão pela fibra (Técnicas de Campo Próximo) tal estudo propiciará adicionalmente, informação sobre a variação dos resultados com o valor V , pois esta é função do comprimento de onda. Para valores de V na ordem de 50 ou menos, os efeitos modais se fazem sentir claramente no perfil obtido {3}.

Deverá ser efetuado também, um estudo mais aprofundado dos raios vazantes em fibras de gradiente de índice e da razão para não terem aparecido nas medidas realizadas.

BIBLIOGRAFIA

1. "Optical Communications" - Science, vol. 150, pp.149-155, (October 1965).
2. M.J.Adams, D.N.Payne, F.M.E.Sladen - "Leaky Rays on Optical Fibers of Arbitrary (Circularly Symmetric) Index Profiles", Electronics Letters, vol. 11, nº 11, pp. 238-240, (May 1975).
3. M.J.Adams, D.N.Payne, F.M.E.Sladen, A.Hartog - "Resolution Limit of the Near-Field Scanning Technique", Com. II-1, Third European Conference on Optical Communications, September 1977, Munich.
4. J.A.Arnaud, R.M.Derosier - "Novel Technique for Measuring the Index Profile of Optical Fibers", The Bell System Technical Journal, vol. 55, nº 10, pp. 1489-1508, (December 1976).
5. E.Bochove, W.Meyer, J.E.Moore - "Light Propagation Properties of Graded Index Fibers for Optical Communications", Revista Brasileira de Física, vol. 7, nº 3, pp.511-540, (Dezembro 1977).
6. M.Born, E.Wolf - "Principles of Optics", 5ª ed., Oxford, Pergamon Press, (1975).
7. C.A.Burrus, R.D.Standley - "Viewing Refractive - Index Profiles and Small Scale Inhomogeneities in Glass Optical Fibers: Some Techniques", Applied Optics, vol. 13, nº 10, pp. 2365-2369, (October 1974).
8. B.Costa, B.Sordo - "Mesures du Profil d'Indice dans les Fibres Optiques: Comparaison entre Diverses Techniques", Com. III-4, Second European Conference on Optical Fiber Communications, September 1976, Paris.
9. W.Eickhoff, E.Weidel - "Measuring Method for the Refractive Index Profile of Optical Glass Fibers", Optical and Quantum Electronics, vol. 7, pp. 109-113, (1975).

10. M.Françon - "Progress in Microscopy", Evanston, Row Peterson and Company, (1961).
11. M.Françon - "Optical Interferometry", New York, Academic Press, (1966).
12. D.Gloge - "Propagation Effects in Optical Fibers", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-23, n° 1, pp.106-120, (January 1975).
13. D.Gloge, E.A.J.Marcatili - "Multimode Theory of Graded Core Fibers", The Bell System Technical Journal, vol. 52, n° 9, pp. 1563-1578, (November 1973).
14. D.Gloge, P.W.Smith, D.L.Bisbee, E.L.Chinnock - "Optical Fiber End Preparation for Low-Loss Splices", The Bell System Technical Journal, vol. 52, n° 9, pp. 1579-1588, (November 1973).
15. A.A.Griffith - "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids", Transactions of the Royal Society, A221, pp.163-198, (1920).
16. M.Ikeda, M.Tateda, H.Yoshikiyo - "Refractive Index Profile of a Graded Index Fiber: Measurement by a Reflection Method", Applied Optics, vol. 14, n° 4, pp. 814-815, (April 1975).
17. L.Jacomme - "Effects of an Abrupt Central Dip in V.D Fabricated Fibers", Wave Electronics, n° 3, pp.169-176, (1977-1978).
18. J.W.Johnson, D.G.Holloway - "On the Shape and Size of the Fracture Zones on Glass Fracture Surfaces", Philosophical Magazine, vol. 14, pp. 731-743, (1966).
19. K.C.Kao, G.A.Hockham - "Dielectric Fiber Surface Waveguides for Optical Frequencies", IEE Proceedings, vol. 113, n° 7, pp.1151-1158, (July 1966).
20. N.S.Kapany - "Fiber Optics", New York, Academic Press, (1967).
21. W.C.Levengood - "Effects of Origin Flow Characteristics on Glass Strength", Journal of Applied Physics, vol. 29, n° 5, pp. 820-826, (May 1958).

22. D.Marcuse - "Cutoff Conditions of Optical Fibers", Journal of the Optical Society of America, vol. 63, n^o 11, pp.1369-1372, (November 1973).
23. D.Marcuse - "Light Transmission Optics", New York, Van Nostrand Reinhold Company, (1972).
24. H.Matsumura - "The Light Acceptance Angle of a Graded Index Fiber", Optical and Quantum Electronics, vol. 7, pp.81-86, (1975).
25. S.E.Miller, E.A.J.Marcatili, T.Li - "Research Toward Optical Fiber Transmission Systems", Proceedings of the IEEE, vol. 61, pp. 1703-1725, (December 1973).
26. R.Olshansky - "Leaky Modes in Graded Index Optical Fibers", Applied Optics, vol. 15, n^o 11, pp. 2773-2777, (November 1976).
27. D.N.Payne, F.M.E.Sladen, M.J.Adams - "Index Profile Determination in Graded Index Fibers", First European Conference on Optical Fiber Communication, London, 1975.
28. M.M.Ramsay, G.A.Hockham, K.C.Kao - "Propagation in Optical Fiber Waveguides", Electrical Communications, vol. 40, n^o 3, pp. 162-169, (1975).
29. F.M.E.Sladen, D.N.Payne, M.J.Adams - "Determination of Optical Fiber Refractive Index Profiles by a Near-Field Scanning Technique", Applied Physics Letters, vol. 28, n^o 9, pp.255-258,(March 1976).
30. A.W.Snyder - "Leaky Ray Theory of Optical Waveguides of Circular Cross-Section", Applied Physics, vol. 4, pp. 273-298, (1974).
31. A.W.Snyder, D.J.Mitchell, C.Pask - "Failure of Geometric Optics for Analysis of Circular Optical Fibers", Journal of the Optical Society of America, vol. 64, pp.608-614, (1974).
32. W.J.Stewart - "Leaky Modes in Graded Fibers", Electronics Letters, vol. 11, n^o 15, pp. 321-322, (July 1975).

33. W.J.Stewart - "A New Technique for Measuring the Refractive Index Profile of Optical Fibers", Com. C2-2, International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communications, Tokyo, July 1977.
34. J.Stone, H.E.Earl - "Surface Effects and Reflection Refractometry of Optical Fibers", Optical and Quantum Electronics, vol. 8, pp. 459-463, (1976).
35. G.T.Sumner - "A New Technique for Refractive Index Profile Measurements in Multimode Optical Fibers", Optical and Quantum Electronics, vol. 9, pp. 79-82, (1977).
36. P. di Vita, R.Vannucci - "Loss Mechanisms of Leaky Skew Rays in Optical Fibers", Optical and Quantum Electronics, vol. 9, pp. 177-188, (1977).