Campus de São Carlos

"Sensor de absorção por campo evanescente com fibra óptica"

Autora
Dulce Sugawara

Orientador
Prof. Dr. Amílcar Careli César

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

✓

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica

SENSOR DE ABSORÇÃO POR CAMPO EVANESCENTE COM FIBRA ÓPTICA

DULCE SUGAWARA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Amílcar Careli César

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036515

São Carlos, SP
26/04/97

Class.	TESE - EESC
Cutl.	5935
Tombo	T097/97

Área: Engenharia Elétrica

st 0747778

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

S947s Sugawara, Dulce
Sensor de absorção por campo evanescente com fibra
óptica / Dulce Sugawara. -- São Carlos, 1997.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.
Área: Engenharia Elétrica
Orientador: Prof. Dr. Amílcar Careli César

1. Sensor. 2. Sensor óptico. 3. Sensor químico.
4. Fibra óptica. 5. Absorção. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 26-2-1997
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor **AMILCAR CARELI CESAR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **MURILO ARAÚJO ROMERO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **LUIZ GONÇALVES NETO**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **GERALDO ROBERTO M. DA COSTA**
Coordenador da Área de Engenharia Elétrica

JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Amílcar pela orientação.

À CAPES pelos dois anos de bolsa de estudos.

Ao Eng. Rosolem e Dr. Celaschi do CPqD da TELEBRÁS pelas fibras ópticas e informações úteis.

Ao Prof. Fergus e à Dra. Carla do Grupo de Fotoquímica do Depto. de Físico-química da USP-SC pelos ensaios de espectrofotometria e pelas informações sobre corantes.

Ao Prof. Zílio e ao doutorando Lino do Grupo de Ótica do Depto. de Física e Ciência dos Materiais da USP-SC pelos ensaios de refratometria e espectroscopia.

Ao Prof. Purquério e ao Eng. Renato do Laboratório de Ultra-precisão do Depto. de Engenharia Mecânica da USP-SC pelas medidas dos perfis das fibras.

Ao técnico Rui Bertho do Depto. de Elétrica pelo auxílio nas montagens dos "set-ups" de teste.

Aos Profs. Beth Frolini do Grupo de Físico-química orgânica do Depto. de Físico-Química da USP-SC, Faria do Grupo de Eletretos do Depto. de Física e Ciência dos Materiais da USP-SC, Edson Ticianelli do Grupo de Eletroquímica do Depto. de Físico-química da USP-SC. Ao Eng. Mario Gongora do IPT pela atenção e ajuda dispensadas.

A todos os colegas e professores do Depto. de Elétrica pela convivência.

Dedico este trabalho ao meu pai e à minha falecida mãe que me forneceram as condições para que eu pudesse realizá-lo.

RESUMO

Este trabalho explora o uso de fibras ópticas e comprimentos de onda nanométricos para a realização de medições químicas. A fibra óptica é empregada como parte integrante do sensor óptico, e não apenas como um guia de ondas. Este sensor apresenta-se como opção mais sensível, rápida e precisa aos métodos de análise e medições convencionais.

Um sensor de concentração de corante que utiliza a técnica de absorção pelo campo evanescente de uma fibra óptica é analisado, construído e ensaiado. A região da fibra que constitui o sensor é formada por uma transição suave, obtida pelo método do tracionamento a quente. Este sensor opera em 633 nm para o corante violeta genciana com fibra monomodo.

A teoria utilizada para calcular a atenuação da potência óptica transmitida pela fibra integrante do sensor é apresentada. A comparação teórica entre os desempenhos do sensor utilizando fibra monomodo e multimodo iluminadas por fontes de luz diferentes e com várias dimensões de estrangulamento é realizada. O procedimento de fabricação do sensor e o de medição da potência óptica para algumas concentrações do corante são descritos.

Resultados experimentais da atenuação normalizada vs. concentração são apresentados e comparados aos valores teóricos. Os ensaios referentes a cada um dos estrangulamentos construídos foram realizados com 5 concentrações distintas do corante e com 4 repetições, no mínimo, para cada uma delas.

ABSTRACT

In this work optical fibers and nanometrical wavelenghts are used to perform chemical measurements. The optical fiber is part of the optical sensor, not only as a waveguide. This sensor emerges as a more sensible, precise and faster option when compared to conventional measurement and analysis methods.

A dye concentration sensor that uses the technique of the evanescent field absorption of an optical fiber is analised, built and essayed. The fiber portion, which constitutes the sensor, is a smooth transition taper, generated by the fiber stretching by heat. This sensor operates at 633 nm for the crystal violet dye with a singlemode optical fiber.

The theory used to calculate the power attenuation of the sensor fiber guided light is presented. A theoretical performance confrontation of the sensor using singlemode, multimode, iluminated by different light sources and different taper dimensions is realized. The sensor fabrication method is described as well as the light power measurement process for some dye concentrations.

The experimental results for attenuation vs. dye concentration are presented and compared to the theoretical values. The essays, which refer to each one of the built tapers, have been realized using 5 different dye concentrations and, at least, 4 repetitions for each one.

Conteúdo

1	Introdução	6
1.1	Vantagens e desvantagens dos sensores com fibra óptica	7
1.2	Técnicas utilizadas até o presente momento	9
1.3	Resumo do conteúdo	12
2	Teoria	15
2.1	Princípio de operação	15
2.2	Cálculo do coeficiente de absorção	17
2.2.1	Cálculo do coeficiente de absorção pelo campo evanescente por meio da óptica geométrica.	18
2.2.2	Cálculo do coeficiente de absorção pelo campo evanescente por meio da teoria de onda eletromagnética	20
2.3	Influência de fontes de luz colimada e difusa sobre o coeficiente de absorção efetivo	22
2.3.1	Influência de uma fonte de luz colimada sobre uma fibra sem casca	23
2.3.2	Influência de uma fonte de luz colimada sobre uma fibra estrangulada	23
2.3.3	Influência de uma fonte de luz difusa sobre uma fibra sem casca .	24
2.3.4	Influência de uma fonte de luz difusa sobre uma fibra estrangulada	24
2.4	Exemplos de atenuação calculados com dados simulados	25
2.4.1	Atenuação ($\frac{\gamma_{ef}L}{\alpha}$) para fibra iluminada por fonte de luz difusa . . .	26
2.4.2	Atenuação ($\frac{\gamma_{ef}L}{\alpha}$) para fibra iluminada por fonte de luz colimada .	28

2.4.3	Comportamento do sensor com a variação do raio do estrangulamento	31
2.4.4	Comportamento do sensor com a variação do comprimento utilizado do estrangulamento	32
2.4.5	Comportamento do sensor com a variação da inclinação da curva de absorção do material	33
2.5	Sensibilidade do sensor	34
2.5.1	Número de reflexões do raio de luz na interface	34
2.5.2	Uso de fibra multimodo ou monomodo na fabricação do sensor . .	34
2.5.3	Redução do diâmetro da casca	36
2.6	Perdas por estrangulamento	37
2.7	Otimização do sensor	39
3	Descrição do sensor construído	40
3.1	Técnicas de fabricação do estrangulamento e montagem do sensor	41
3.1.1	Estrangulamento da fibra	41
3.1.2	Clivagem da fibra	45
3.1.3	Acoplamento do laser na fibra	45
3.1.4	Imobilização da fibra	45
3.2	Montagem utilizada nas medidas	46
3.3	Dados experimentais sobre o material substituto da casca	46
3.3.1	Corante	47
3.3.2	Solvente	48
4	Resultados obtidos	51
4.1	Ensaaios	51
4.1.1	Medida de atenuação normalizada vs. concentração: ensaio (1) . .	53
4.1.2	Medida de atenuação normalizada vs. concentração: ensaio (2) . .	54
4.1.3	Medida de atenuação normalizada vs. concentração: ensaio (3) . .	55
4.1.4	Medida de atenuação normalizada vs. concentração: ensaio (4) . .	56

4.2	Comparação com os valores teóricos	57
4.2.1	Não-linearidade	57
4.2.2	Sensibilidade	57
4.2.3	Desvio dos valores medidos de atenuação	58
5	Conclusões	60
A	Equação característica da fibra	68
B	Dedução da equação de atenuação [33]	71
C	Conversão de parâmetros da teoria de onda eletromagnética para óptica geométrica	73
D	Espectrofotometria de absorção na região de luz visível	75
E	Programas usados para o cálculo da atenuação	78

Lista de Figuras

2-1	Campo evanescente e campo elétrico no núcleo. n_n é o índice de refração do núcleo e n_c é o índice de refração da casca.	15
2-2	Efeito de uma substância absorvente sobre o campo evanescente e o campo no núcleo. n_{cab} é o índice de refração da casca absorvente, n_n é o índice de refração do núcleo e n_c é o índice de refração da casca da fibra convencional. 16	
2-3	Gráfico de absorbância de íons H^+ de um medidor de pH [15].	17
2-4	Absorção convencional de luz por uma amostra de material e pelo campo evanescente em uma fibra óptica.	18
2-5	Ângulos relativos aos modos de alta ordem não radiados.	23
2-6	Estrangulamento linear de uma fibra óptica.	25
2-7	Atenuação em uma fibra multimodo iluminada por fonte difusa.	26
2-8	Atenuação para fibra monomodo iluminada por fonte difusa.	27
2-9	Atenuação em uma fibra multimodo iluminada por fonte colimada.	28
2-10	Atenuação em uma fibra monomodo iluminada por fonte colimada.	29
2-11	Atenuação para diâmetros diferentes de estrangulamento.	31
2-12	Atenuação para comprimentos diferentes de estrangulamento.	32
2-13	Atenuação para inclinações diferentes da curva de absorbância.	33
2-14	Desvio que a curva de atenuação sofre com relação a lei de Beer numa fibra multimodo [34]. A curva tracejada refere-se à lei de Beer enquanto que a curva em linha cheia representa o desvio.	37
2-15	Estrangulamento em uma fibra óptica, sub-dividido em seções discretas. .	38

3-1	Teste com a amostra referenciada.	41
3-2	Descrição do processo do segundo puxamento da fibra.	42
3-3	Alguns estrangulamentos realizados em fibras.	43
3-4	"Close-up "de uma amostra de estrangulamento	44
3-5	Montagem para a medição da potência óptica de saída da fibra.	46
3-6	Absorbância do corante violeta genciana medido por intermédio do espectrofotômetro Hitachi U-2000.	48
3-7	Absorbância do corante violeta genciana.	49
3-8	Absorbância para uma faixa ampla de concentrações.	50
4-1	Resultados de ensaios com um mesmo estrangulamento. Cada curva corresponde a um ensaio distinto.	52
4-2	Atenuação nomalizada vs. concentração obtida no ensaio (1) e atenuação calculada.	53
4-3	Atenuação normalizada va. concentração obtida no ensaio (2) e atenuação calculada.	54
4-4	Atenuação normalizada vs. concentração obtida no ensaio (3) e atenuação calculada.	55
4-5	Atenuação normalizada vs. concentração obtida no ensaio (4) e atenuação calculada.	56
4-6	Gráfico do erro relativo cometido no último valor de atenuação de cada estrangulamento.	58
D-1	Procedimento de um ensaio espectrofotométrico	76

Capítulo 1

Introdução

Desde os anos 70, quando a primeira fibra óptica com 20 dB/km de atenuação foi fabricada por Kapron, Keck e Maurer da Corning Glass Works, E.U.A., ela tem sido empregada como um meio de transmissão de informações cada vez mais importante devido às vantagens apresentadas sobre o fio de cobre. A imunidade ao ruído eletromagnético, a alta velocidade de transmissão, a alta capacidade de multiplexação de sinais, a ampla faixa espectral, a baixa atenuação de sinal e as dimensões reduzidas são alguns dos motivos que levaram à utilização crescente deste meio na área de telecomunicações.

A partir de 1977, contribuições mais significativas para a aplicação das fibras em sensores começaram a surgir, com a fibra servindo como meio de transmissão de informação ou como parte ativa dos mesmos. T. G. Giallorenzi et al. [1], G.D. Pitt et al. [2] e Culshaw [3] expõem um conjunto de possibilidades nesta área.

Um sensor com fibra óptica é dito extrínseco quando a fibra faz apenas o papel do meio de transmissão ou intrínseco quando a fibra é parte ativa do mesmo. Dentro de um sensor intrínseco todos os parâmetros da luz (intensidade, fase, comprimento de onda e polarização) confinada numa fibra óptica podem ser alterados pelo meio circundante. A construção do sensor determina o modo de funcionamento do mesmo. Sensores que usam efeitos tais como de absorção, luminescência e fluorescência podem ser fabricados para funcionar tanto da forma intrínseca como extrínseca.

A fibra óptica tem sido usada com sucesso na construção de sensores químicos. Scheggi & Baldini [4] expõem as técnicas em que se baseiam os sensores químicos com fibra óptica. Scheggi & Baldini [4] citam o sensor de concentração de amônia de David et al. [5], relatado em 1976, como sendo o primeiro nesta área. Sensores químicos têm aplicações em diversas áreas, como a biotecnologia, o controle do meio ambiente, a medicina, a espectroscopia, a indústria e a análise laboratorial.

Das várias formas possíveis de se variar os parâmetros da luz, a de concepção mais simples é aquela que emprega a modulação da intensidade da luz, resultando em sensores para a medição da concentração de diversas substâncias. Chan et al. [6], Tai et al. [7], Muhammad et al. [8] propõem a utilização da fibra óptica para medir a concentração de gás metano, e Giuliani et al. [9], a de vapor de amônia.

Andrade et al. [10], Eenick et al. [11], Bluestein [12] e Carome et al. [13] relatam exemplos de sensores para ensaios de reações imunológicas antígeno-anticorpo. Peterson et al. [14], Boide et al. [15], Wolthuis et al. [16] e Netto et al. [17] relatam exemplos de sensores para medida de pH. Muto et al. [18],[19] e Sadaoka et al. [20], [21] propõem sensores de umidade. Cavinato et al. [22] apresentam um sensor para monitoração de fermentação de etanol.

1.1 Vantagens e desvantagens dos sensores com fibra óptica

As vantagens apresentadas pelos sensores químicos com fibra óptica sobre os sensores convencionais são muitas e variam de acordo com a utilização. Uma das principais refere-se às dimensões físicas reduzidas da fibra óptica, permitindo que os sensores químicos intrínsecos sejam facilmente miniaturizados. As análises podem ser feitas quase que em tempo real devido à reduzida quantidade de reagentes necessária. Na medicina, medidas "in vivo" podem ser realizadas por sensor de pH [17] e por sensor de refluxo de bile [23]. Na maioria dos casos, o sensor com fibra óptica não consome o material de análise

em quantidade comparável a outros tipos de sensor, favorecendo a análise de volumes pequenos. As medidas podem ser feitas à distância, já que as perdas ópticas da fibra são pequenas, mesmo considerando longas distâncias. A possibilidade de se utilizar técnicas de telecomunicações, como multiplexação de sinais, permitiriam a realização de diversas medições por um único meio de transmissão. Com o uso da técnica de redes, vários sensores fariam parte da própria fibra que transporta a informação. O custo envolvido na manufatura do sensor é baixo em comparação com o de outras técnicas. Além disso, os sensores ópticos podem ser usados em ambientes normalmente agressivos a outros tipos de sensores como ambientes quentes, explosíveis ou úmidos.

Estes sensores apresentam também algumas desvantagens que devem ser consideradas e que podem permitir a geração de pesquisas. Por exemplo, estudos preliminares do comportamento das substâncias empregadas nos sensores, através da espectroscopia e análise de reações químicas, devem ser realizados para que a substância ou a reação química seja destacada e reconhecida com relação a outras substâncias ou reações. Uma substância da qual se deseja obter a concentração não pode ter o mesmo comportamento que outra no mesmo comprimento de onda de luz empregado, para que seja possível a sua individualização.

Por se tratar de um sensor que utiliza a modulação da intensidade da luz, outras causas, que não a que se deseja monitorar, podem provocar a alteração indesejada desta mesma intensidade como, por exemplo, as flutuações da fonte, encurvamento da fibra óptica, interferência da luz do meio ambiente, e vibrações mecânicas do conjunto, dentre outras. Estas interferências podem ser evitadas com o uso de um divisor de feixe colocado na saída da fonte e no sistema de recepção. A diferença entre o sinal proveniente da fibra sensora e da referência anula o efeito daquelas alterações. Ou, pode-se utilizar dois comprimentos de onda distintos, um que participa do efeito sensor e outro que não sofre qualquer influência, alimentando a parte sensora. A diferença da potência medida nos dois comprimentos de onda do sinal também resulta num valor independente daqueles fatores que alteram a intensidade da luz. Quanto ao encurvamento da fibra

óptica e vibrações mecânicas, recomenda-se fazer um acoplamento perfeito da fibra ao fotodetector e à fonte, minimizar o comprimento da fibra e garantir a imobilidade do sistema. Recomenda-se ainda isolar o sistema num ambiente de temperatura estável. A interferência da luz do meio ambiente pode ser facilmente eliminada com a pintura da casca com tinta preta.

Problemas mais específicos apresentados por sensores químicos com fibra óptica foram discutidos no trabalho de Spichiger [24], que aborda as potencialidades e limitações de sensores de concentração de íons sódio, potássio, cálcio e cloro úteis na medicina. Spichiger conclui que os sensores ópticos para esta finalidade não podem ainda ser usados diretamente no sangue, pois as medidas realizadas "in-vivo" ainda apresentam discrepâncias daquelas realizadas em meio laboratorial.

1.2 Técnicas utilizadas até o presente momento

Dentro da classe dos sensores químicos que utilizam técnicas de modulação de intensidade da luz (refratometria, absorção, campo evanescente, luminescência química, fluorescência, espalhamento Raman), algumas técnicas podem ser comuns a sensores que medem um mesmo parâmetro, por exemplo medidas de absorção utilizando a variação do campo evanescente, reflexão da luz na ponta da fibra ou espalhamento de luz no material. Ou podem apresentar semelhanças entre si como no caso de sensores de absorção, luminescência ou fluorescência que usam a variação do campo evanescente da fibra.

Segundo Lieberman [25], atualmente diversas técnicas de modulação da intensidade da luz concorrem paralelamente. Em [2], um detector intrínseco de óleo em água é descrito. O parâmetro da luz que sofre alteração é a intensidade da luz através da mudança do índice de refração do óleo. Neste trabalho, a fibra utilizada é do tipo multimodo, e a perda de potência é causada pela radiação de modos da fibra quando o óleo substitui a água no guia formado pelo núcleo da fibra e a água (casca). O mesmo princípio deste sensor (refratometria) é utilizado por Archenault [26] num refratômetro com fibra.

A técnica de absorção baseia-se na propriedade de absorção de energia da onda eletromagnética pelas substâncias, as quais podem ser identificadas pelas suas bandas de absorção particulares [4]. Esta absorção, para um dado comprimento de onda, varia com a concentração da substância proporcionando a possibilidade da sua medição direta, ou indireta, através de reações com outras substâncias que provocam alterações na sua banda de absorção. Como exemplo, há indicadores ácido-base que variam a sua absorção de acordo com a concentração de íons de hidrogênio presentes. A fibra óptica, neste caso, funciona como meio de transmissão da luz.

Os primeiros sensores de absorção com fibra [6] e [27] usavam uma célula contendo a substância a ser medida, onde dois segmentos de fibras eram instalados diametralmente, de modo que a luz era introduzida por um segmento e recolhida pelo outro após a sua passagem pela substância, constituindo assim um sensor extrínseco de absorção.

Nas montagens mais recentes, dois tipos de construção são usados para implementar sensores de absorção. Um dos tipos utiliza duas fibras lado a lado como meio de transmissão de luz. A parte sensora, constituída pelo material absorvente juntamente com uma superfície refletora, é fixada na extremidade das duas fibras, uma que levando a luz da fonte para o material absorvente e a outra trazendo a luz refletida para o fotodetector e sistema eletrônico de medida. A superfície refletora serve para retornar o sinal após a sua passagem pelo material absorvente. Uma variação deste tipo de sensor é a que utiliza apenas uma fibra que leva o sinal de ida e de volta, pois a fibra permite o guiamento bidirecional sem interferência dos sinais. Estas montagens caracterizam os optodos que são, em geral, sensores do tipo extrínseco. Eles têm a vantagem de serem compactos, podendo alcançar regiões de difícil acesso como, por exemplo, o sensor de pH do sangue proposto por Boide et al. [15], que é introduzido em um vaso sanguíneo através de uma agulha de injeção, e o sensor de refluxo de bile apresentado por Falciai et al. [23], que pode ser introduzido no estômago juntamente com um endoscópio.

O outro tipo de construção é baseado na técnica de campo evanescente, onde a fibra óptica funciona como o próprio elemento sensor, ao se escolher uma casca que varia o

seu índice de refração com a presença da substância que se quer medir. A técnica de absorção pelo campo evanescente de uma fibra óptica, [28], é baseada na já estabelecida técnica de espectroscopia de reflexão total atenuada (ATR). Um raio óptico se reflete totalmente quando o ângulo formado entre ele e a normal à interface entre dois meios de índices de refração diferentes é maior ou igual ao ângulo crítico. O campo evanescente originado de um raio totalmente refletido tem a sua penetração na casca diminuída se o material da casca for absorvente, o que constitui reflexão total atenuada. Sendo o material da casca absorvente no comprimento de onda aplicado, isto implica em perda que é representada pelo índice de refração complexo. Assim como no detector de óleo em água citado por Pitt et al. [2], é a variação do índice de refração da casca que proporciona a alteração na intensidade da luz. A absorção que o material substituto da casca provoca no comprimento de onda aplicado é a responsável pela variação da penetração do campo evanescente. Os sensores de Tai et al. [7], de Giuliani et al. [9], todos os sensores de ensaios imunológicos citados e os de umidade são baseados nesta técnica.

Lieberman [25] cita ainda duas outras técnicas concorrentes. Uma técnica usa a substituição da casca de uma fibra óptica por uma outra constituída de um material que reage na presença de uma substância específica provocando a absorção no comprimento de onda, o que seria uma extensão da técnica da absorção pelo campo evanescente. A substituição da casca pode ser usada também de outras formas, como para provocar fluorescência, ou em conjunto com um dobramento da região sensora, provocando variação na intensidade da luz por perda por curvatura (radiação de potência óptica para a casca). A outra técnica mencionada é a da substituição do núcleo da fibra por um material que provoca absorção, fluorescência ou qualquer efeito que modifique a intensidade da luz. Este método, tem a vantagem de provocar a variação sobre a região de maior concentração de luz na fibra que é o núcleo.

Como tendência atual e futura, ainda segundo Lieberman [25], os sensores químicos intrínsecos são os que mais têm sido estudados. Os sensores intrínsecos que usam um comprimento longo de fibra servem à confecção de sensores distribuídos, que possibilitam,

por exemplo, a medição da média da concentração de vastas áreas de um determinado produto químico sem a necessidade da instalação de diversos sensores extrínsecos. Os sensores intrínsecos que usam comprimento curto de fibra são potencialmente compatíveis com as técnicas de produção em larga escala. Os aspectos mais discutidos atualmente se referem a experimentos em novas aplicações e cálculos para a determinação de perdas e sensibilidade.

Algumas formas de construção de sensor de campo evanescente, que não se constituem em optodos, são sugeridas visando facilitar o acesso ao campo evanescente, aumentando assim a sensibilidade da região sensora. Archenault [26] recomenda o uso de uma mistura ácida para corroer controladamente a fibra até o diâmetro desejado. Hale et al. [29] sugere a construção de um estrangulamento através de um segundo puxamento da fibra utilizando calor e tração. Este tipo de transição é usado por Mackenzie et al. [30] para se conseguir uma extensão do campo evanescente, o que sugere que o seu uso em sensores proporciona aumento de sensibilidade. Stewart & Muhammad [8] sugerem o uso de uma fibra do tipo D, com apenas uma parte da casca reduzida por desgaste mecânico até expor a região de campo evanescente.

1.3 Resumo do conteúdo

O objetivo principal deste trabalho é construir um sensor que utiliza a técnica de absorção pelo campo evanescente de uma fibra óptica. A motivação para a realização deste trabalho é a reduzida quantidade de pesquisas nesta área no Brasil em comparação com outros países, e as vantagens que sensores ópticos proporcionam. A técnica de absorção pelo campo evanescente de uma fibra foi escolhida para a implementação do sensor devido, principalmente, à menor dificuldade técnica de sua implementação.

No Capítulo 2 deste trabalho é realizado um estudo teórico onde são consideradas duas possibilidades de análise da absorção por campo evanescente: uma usando o método do raio óptico [31] e [32] e outra usando a teoria modal [33]. A primeira análise permite

o cálculo da perda de potência numa fibra multimodo englobando o efeito de todos os modos de propagação através da consideração do ângulo de incidência dos mesmos. Embora o primeiro método de análise seja útil para facilitar os cálculos de perdas em fibras para um número muito grande de modos, não é fácil compará-los com resultados experimentais devido à dificuldade de selecionar e identificar os ângulos na prática. A teoria modal é adequada para o cálculo das perdas em fibra monomodo ou multimodo com poucos modos. É discutida a conveniência do uso de um ou outro tipo de fibra [29], [34] e [35].

Para cada um dos métodos, simulações são realizadas enfatizando o comportamento da fibra óptica no sensor de absorção por campo evanescente.

Alguns outros detalhes são levados em consideração nos cálculos teóricos, como o tipo de fonte usada (led ou laser), bem como a realização do estrangulamento através de esticamento da fibra ou de corrosão.

No Capítulo 3 o assunto abordado é o desenvolvimento experimental do protótipo do sensor. Discute-se o aumento da sensibilidade que se faz necessário num sensor com fibra monomodo devido à pequena penetração do campo evanescente do modo fundamental na casca. Este aumento de sensibilidade pode ser conseguido através de dois métodos: o da corrosão, apenas mencionado como alternativa possível, e o método do estrangulamento obtido através de um segundo puxamento da fibra. São discutidas as vantagens e desvantagens dos dois métodos, com a descrição detalhada do procedimento realizado. As alternativas para superar as dificuldades de acoplamento da fonte com a fibra, no uso de uma fibra monomodo são apresentadas, assim como a eliminação da flutuação da potência luminosa provocada pela fonte. É descrito o procedimento para a obtenção dos valores experimentais baseados na aplicação de corantes na região sensora, bem como as medidas das características do material absorvente.

No Capítulo 4, os resultados são discutidos e apresentados em forma de gráficos das medidas realizadas com os corantes e suas diluições, variando o tipo de fibra, esticamento, número de repetições de medidas com a mesma fibra e potência luminosa inicial acoplada

à fibra.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões sobre os testes realizados e sugestões para trabalhos futuros nesta área.

Capítulo 2

Teoria

2.1 Princípio de operação

O guiamento de luz dentro de uma fibra óptica é possível porque os índices de refração do núcleo e da casca são diferentes (o índice do núcleo é maior que o da casca). Na fibra óptica monomodo, num certo comprimento de onda, o campo elétrico do modo fundamental tem o perfil dado na Figura 2-1, onde a porção do campo que se estende após a interface do núcleo com a casca é chamado de campo evanescente. A amplitude do campo nesta região decai exponencialmente. A potência total transferida de uma extremidade a outra da fibra é praticamente igual.

Figura 2-1: Campo evanescente e campo elétrico no núcleo. n_n é o índice de refração do núcleo e n_c é o índice de refração da casca.

Mackenzie & Payne [30] realizaram um trabalho onde sugerem a utilização da fibra como sensor. Corantes, que absorvem potência luminosa em um determinado comprimento de onda, substituem a casca da fibra. Por causa da absorção, há um confinamento menor de potência luminosa no núcleo da fibra.

A Figura 2-2 mostra o campo elétrico no núcleo da fibra e a atenuação provocada pela presença do material absorvente.

A Figura 2-3 apresenta um gráfico de absorbância vs. comprimento de onda para algumas concentrações de íons H^+ de um medidor de pH para a faixa de 200 nm a 800 nm de comprimento de onda. Este exemplo mostra que no comprimento de onda de aproximadamente 620 nm existe uma faixa ampla de variação da absorbância que pode ser medida, enquanto que no comprimento de onda de 500 nm, por exemplo, não há variação relevante para aplicações práticas.

Figura 2-2: Efeito de uma substância absorvente sobre o campo evanescente e o campo no núcleo. n_{cab} é o índice de refração da casca absorvente, n_n é o índice de refração do núcleo e n_c é o índice de refração da casca da fibra convencional.

Os sensores baseados na absorção do campo evanescente, que usam a substituição de parte da casca pelo elemento sensor, obedecem a lei de Beer-Lambert (ver Apêndice D), usada na espectroscopia para a transmissão de luz através de um meio absorvente (2.1):

$$P = P_0 \exp(-\gamma \ell) \quad (2.1)$$

onde P_0 é a potência da luz que incide sobre a fibra, P é a potência da luz que sai da

Figura 2-3: Gráfico de absorbância de íons H^+ de um medidor de pH [15].

fibra, γ é o coeficiente de absorção, e ℓ é o comprimento da fibra que está submetida à variação do parâmetro a ser sensoriado.

A Figura 2-4 ilustra o efeito da absorção de luz que incide sobre um meio absorvente. Se o comprimento ℓ é fixo, a potência de saída depende unicamente do coeficiente de absorção do campo evanescente da fibra.

2.2 Cálculo do coeficiente de absorção

O coeficiente de absorção pelo campo evanescente é a perda de potência propriamente dita. Stewart et al. [33] apresentam uma análise da atenuação da potência utilizando a teoria de onda eletromagnética para calcular a perda que cada modo da fibra sofre devido à absorção, enquanto que Gupta et al. [31] e [32] e Ruddy et al. [28] utilizam a óptica geométrica para o mesmo cálculo.

Figura 2-4: Absorção convencional de luz por uma amostra de material e pelo campo evanescente em uma fibra óptica.

2.2.1 Cálculo do coeficiente de absorção pelo campo evanescente por meio da óptica geométrica.

Ruddy et al. [28] propõem dois modelos para o cálculo do coeficiente γ : um que considera a potência luminosa uniformemente distribuída entre todos os modos da fibra, e outro que considera apenas a potência distribuída nos modos de ordem mais alta. Os modos de ordem mais alta possuem um ângulo de incidência (ângulo que o raio óptico faz com a normal à interface entre os dois meios) menor, penetrando mais na casca, de modo que o campo evanescente destes modos é mais intenso. Devido ao fato do campo evanescente destes modos ser mais intenso que o dos modos de ordem mais baixa, torna-se interessante isolá-los dos modos de ordem mais baixa.

2.2.1.1. Potência luminosa uniformemente distribuída entre todos os modos

Neste modelo, Gloge [38] considera a fração de potência fora do núcleo de uma fibra multimodo como sendo:

$$\eta = \frac{4\sqrt{2}}{3}V \quad (2.2)$$

onde V é a frequência normalizada de uma fibra com raio do núcleo r_n e abertura numérica NA , dada por:

$$V = \frac{2\pi r_n}{\lambda_0} \sqrt{NA} \quad (2.3)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda no vácuo.

Deste modo, a expressão da potência de Beer-Lambert torna-se:

$$P = P_0 \exp(-\eta \gamma \ell) \quad (2.4)$$

onde γ é o coeficiente de absorção do material, diretamente proporcional à concentração da substância para um fluido que obedece esta lei.

Segundo Payne & Hale [34], esta expressão não representa o comportamento real da fibra já que o comportamento de cada modo da fibra é diferenciado (ver ítem 2.5.2).

2.2.1.2. Modos selecionados

É possível selecionar modos de ordem mais alta ou modos de ordem mais baixa através de filtros ou máscaras.

Para o caso em que alguns modos são selecionados, Ruddy et al. [28] propõem que o cálculo do coeficiente de absorção seja efetuado considerando-se o número de reflexões internas totais por unidade de comprimento na região ativa e o coeficiente de transmissão de Fresnel. O número de reflexões é dado por [28]:

$$N = \frac{\cot \theta}{2r_n} \quad (2.5)$$

onde θ é o ângulo que o raio óptico faz com a normal à interface entre os dois meios.

Segundo Snyder & Love [36], o coeficiente de absorção do campo evanescente pode ser descrito em termos de número de reflexões, N , dado por (2.6):

$$\gamma = NT \quad (2.6)$$

onde T é o coeficiente de transmissão de Fresnel da luz na interface entre um núcleo sem perdas e uma casca com perdas, e T pode ser calculado por [36]:

$$T = \frac{\alpha \lambda_0 n_{cab} \cos \theta}{\pi(n_n^2 - n_{cab}^2) \sqrt{(\sin^2 \theta - n_{cabn}^2)}} \quad (2.7)$$

onde α é o coeficiente de absorção do meio que envolve o núcleo, dado por [28]:

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda_0} \quad (2.8)$$

n_{cab} é o índice de refração da casca absorvente, $n_{cabn} = \frac{n_{cab}}{n_n}$; e κ é o coeficiente de extinção.

Em uma fibra que apresenta perdas, a constante de propagação é dada por $\gamma = \alpha' + j\beta$, onde α' é a constante de atenuação, relacionada com a absorção, e β é a constante de fase. Em uma fibra sem perdas, $\alpha' = 0$, e β pode ser entendida como a constante de propagação.

O índice de refração da casca pode ser representado por $n_{cab} - j\kappa$, onde a componente imaginária do índice de refração representa a absorção de potência luminosa no comprimento de onda considerado.

Substituindo as eqs. (2.5) e (2.7) em (2.6) obtém-se:

$$\gamma = \frac{\alpha \lambda_0 n_{cab} (\cos \theta)^2}{2\pi r_n (n_n^2 - n_{cab}^2) \sin \theta \sqrt{(\sin \theta)^2 - n_{cabn}^2}} \quad (2.9)$$

2.2.2 Cálculo do coeficiente de absorção pelo campo evanescente por meio da teoria de onda eletromagnética

Através da teoria de onda eletromagnética pode-se chegar aos mesmos resultados obtidos pela óptica geométrica. Nela, para cada modo é necessário resolver uma equação característica diferente. Para tanto é necessário conhecer os parâmetros modais, descritos a seguir.

Frequência e constante de propagação normalizadas

Para calcular as perdas pela teoria de onda eletromagnética utilizam-se os parâmetros modais da região da fibra que sofreu alteração de guiamento. Para tanto, definem-se parâmetros como frequência normalizada, V , e constante de propagação normalizada b .

A frequência normalizada é dada por [37] (eq.(2.3)):

$$V = \sqrt{(k_0 r_n)^2 (n_n^2 - n_c^2)} \quad (2.10)$$

onde k_0 é o número de onda no vácuo, dado por:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2.11)$$

V também pode ser escrita em função dos índices de refração n_n e n_{cab} :

$$V = \sqrt{(k_0 r_n)^2 (n_n^2 - n_{cab}^2)} \quad (2.12)$$

Dado o valor de V , pode-se determinar o valor de b através das curvas (b vs. V) de Gloge [38], ou calculá-lo utilizando-se a equação característica do modo desejado (ver o programa para cálculo no Apêndice E).

Obtido b , é possível calcular a constante de propagação do modo, β , pois b é definido como:

$$b = \frac{(\frac{\beta}{k_0})^2 - n_{cab}^2}{n_n^2 - n_{cab}^2} \quad (2.13)$$

Os valores de n_{cab} e κ , característicos para o material da nova casca, são determinados a partir de gráficos por meio de interpolação de valores obtidos experimentalmente (ver Capítulo 3).

A expressão para a determinação de γ , desenvolvida por Stewart et al. [33], pode ser estendida a todos os modos da fibra, de forma que o cálculo da perda total é obtido somando-se os efeitos de todos os modos calculados individualmente. Segundo este autor,

a perda proporcionada por um meio absorvente é dada por :

$$\gamma = \frac{2\kappa n_{cab} k_0 \int \int_A |\overline{E}|^2 dA}{n_{ef} \int \int_{\infty} |\overline{E}|^2 dA} \quad (2.14)$$

Para o modo HE_{11} , a expressão de γ é dada por (ver Apêndice A):

$$\gamma = \frac{\kappa n_{cab} (wr_n)^2 k_0 \pi e^{-\frac{2 \cdot w \cdot r_0}{a}}}{n_{ef} V^2 (wr_n)^2 K_1^2(wr_n)} \quad (2.15)$$

onde n_{ef} é o índice efetivo dado por $n_{ef} = \frac{\beta}{k_0}$; w e u são parâmetros modais relativos aos meios e a é a distância radial desde o eixo axial da fibra até onde se supõe que o campo evanescente praticamente se extinguiu (normalmente $2r_n$).

Para cada um dos modos de uma fibra multimodo, a equação da atenuação é única, já que as equações características dos modos são diferentes. Exemplos de equações características de modos e de equações para o cálculo da atenuação para outros modos são fornecidos no Apêndice A.

2.3 Influência de fontes de luz colimada e difusa sobre o coeficiente de absorção efetivo

Gupta et al. [31] e [32] utilizaram a expressão de Ruddy et al. [28] (eq. (2.9)) para calcular o coeficiente de absorção efetivo (γ_{ef}) da fibra para tipos diferentes de fonte de luz e também por configurações de fibras. O coeficiente de absorção efetivo é aquele considerado para um intervalo de ângulos de lançamento da luz na fibra, ângulos do raio óptico com a normal à interface do núcleo com a casca (de θ_1 a θ_2), envolvendo vários modos ao mesmo tempo, como ilustra a Figura 2-5. θ_1 é o ângulo crítico e θ_2 é 90° (quando se considera todos os modos até o ângulo crítico) ou diferente dele, porém maior que θ_1 quando se deseja apenas modos de ordem superior. São analisadas quatro situações: a) uma fonte colimada (laser, por exemplo) ilumina uma fibra cuja casca foi removida; b)

a mesma fonte ilumina uma fibra na qual é feito um estrangulamento (Figura 2-6); c) uma fonte difusa (LED, por exemplo) ilumina uma fibra cuja casca foi removida; e d) a mesma fonte ilumina uma fibra estrangulada. As diferentes situações são analisadas nas seções 2.3.1., 2.3.2., 2.3.3. e 2.3.4., respectivamente.

Figura 2-5: Ângulos relativos aos modos de alta ordem não radiados.

2.3.1 Influência de uma fonte de luz colimada sobre uma fibra sem casca

A atenuação que o campo evanescente produz na intensidade da luz transportada pela fibra, sem a influência do meio externo, quando a fonte é do tipo laser, é dada por [31]:

$$\frac{\gamma_{ef}}{\alpha} = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin \theta \cos \theta}{(1 - n_n^2 \cos^2 \theta)^2} \gamma(\theta) d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin \theta \cos \theta}{(1 - n_n^2 \cos^2 \theta)^2} d\theta} \quad (2.16)$$

2.3.2 Influência de uma fonte de luz colimada sobre uma fibra estrangulada

A atenuação que o campo evanescente produz na intensidade da luz transportada pela fibra, sem a influência do meio externo, caso esta luz seja proveniente de uma fonte do

tipo laser e a região sensora da fibra seja do tipo estrangulamento com variação linear do diâmetro, é dada por [31]:

$$\frac{\gamma_{ef}}{\alpha} = \frac{\int_0^L dz \int_{\phi_1(z)}^{\phi_2(z)} \frac{\sin\theta \cos\theta}{(1-n_n^2 \cos^2\theta)^2} \gamma(\theta, z) d\theta}{\int_0^L dz \int_{\phi_1(z)}^{\phi_2(z)} \frac{\sin\theta \cos\theta}{(1-n_n^2 \cos^2\theta)^2} d\theta} \quad (2.17)$$

onde $\phi_1(z) = \cos^{-1}\left[\frac{r_{ni} \cos\theta_1}{r(z)}\right] - \tan^{-1}\left(\frac{r_{ni}-r_{no}}{L}\right)$ e $\phi_2(z) = \cos^{-1}\left[\frac{r_{ni} \cos\theta_1}{r(z)}\right] - \tan^{-1}\left(\frac{r_{ni}-r_{no}}{L}\right)$.

O estrangulamento, considerado linear, possui raio $r(z) = r_{ni} - \frac{z}{L}(r_{ni} - r_{no})$.

2.3.3 Influência de uma fonte de luz difusa sobre uma fibra sem casca

A atenuação que o campo evanescente produz na intensidade da luz transportada pela fibra, sem a influência do meio externo, caso esta luz seja proveniente de uma fonte do tipo LED, é dada por [32]:

$$\frac{\gamma_{ef}}{\alpha} = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta \cos\theta \gamma(\theta) d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta \cos\theta d\theta} \quad (2.18)$$

2.3.4 Influência de uma fonte de luz difusa sobre uma fibra estrangulada

A atenuação que o campo evanescente produz na intensidade da luz transportada pela fibra, sem a influência do meio externo, caso esta luz seja proveniente de uma fonte do tipo LED e a região sensora da fibra seja do tipo estrangulamento com variação linear do diâmetro, é dada por:

$$\frac{\gamma_{ef}}{\alpha} = \frac{\int_0^L dz \int_{\phi_1(z)}^{\phi_2(z)} \sin\theta \cos\theta \gamma(\theta, z) d\theta}{\int_0^L dz \int_{\phi_1(z)}^{\phi_2(z)} \sin\theta \cos\theta d\theta} \quad (2.19)$$

A Figura 2-6 mostra a geometria considerada no estrangulamento. Os gráficos da influência do tipo de fonte sobre o desempenho da fibra, obtidos a partir das eqs. (2.16)

a (2.19) e de acordo com as sugestões dos autores, estão mostrados na Seção 2.4. deste Capítulo.

Figura 2-6: Estrangulamento linear de uma fibra óptica.

2.4 Exemplos de atenuação calculados com dados simulados

Os gráficos das Figuras 2-7, 2-8, 2-9 e 2-10 mostram a variação do coeficiente de absorção efetiva da fibra em função do índice de refração da casca. Todos os valores mostrados nos gráficos são de $\frac{\gamma_{ef}}{\alpha}$, diretamente proporcional à sensibilidade do sensor.

As constantes adotadas para o cálculo com fibra multimodo são dadas em [31] e [32]:

-índice de refração do núcleo da fibra: $n_n = 1,457$;

-índice de refração da casca da fibra: $n_c =$ de 1,335 a 1,385;

-comprimento de onda da fonte: $\lambda_0 = 664$ nm; e

-raio do núcleo: $r_n = 300$ μm ; para fibra com estrangulamento, r_n varia de 150 μm a 250 μm .

As constantes adotadas para o cálculo com fibra monomodo foram obtidas dos materiais utilizados em laboratório, junto aos fabricantes:

-índice de refração do núcleo da fibra: $n_n = 1,45931$;

-índice de refração da casca da fibra: $n_c =$ de 1,4 a 1,42;

-comprimento de onda da fonte: $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$;
 -raio do núcleo: $r_n = 2\mu\text{m}$; para fibra com estrangulamento r_n varia de $0,8 \mu\text{m}$ a $1,4 \mu\text{m}$.

2.4.1 Atenuação ($\frac{\gamma_{ef}}{\alpha}$) para fibra iluminada por fonte de luz difusa

Figura 2-7: Atenuação em uma fibra multimodo iluminada por fonte difusa.

A partir dos gráficos mostrados nas Figuras 2-7 e 2-8 pode-se concluir que um diâmetro menor de estrangulamento determina um efeito de absorção mais acentuado. A atenuação é maior para a fibra estrangulada do que para a fibra cuja casca foi substituída. Aumentando-se o índice de refração da casca a atenuação também aumenta.

Figura 2-8: Atenuação para fibra monomodo iluminada por fonte difusa.

2.4.2 Atenuação ($\frac{\gamma_{ef}}{\alpha}$) para fibra iluminada por fonte de luz colimada

Figura 2-9: Atenuação em uma fibra multimodo iluminada por fonte colimada.

Assim como para a fonte difusa, todas as características discutidas na Seção 2.4.1 foram mantidas para a fonte colimada. A variação da atenuação com relação ao índice de refração da casca é maior para a fonte difusa.

Alguns fatores dificultam a comparação dos valores calculados de perda com os valores obtidos nos testes. Os cálculos teóricos usam especificações de fibra monomodo fornecidas pelo fabricante e um comprimento de onda fixo para o qual foi medida a absorvância e o índice de refração. Os parâmetros inclinação do gráfico de absorvância, raio da região estrangulada, comprimento da região estrangulada e utilizada pelo ensaio, e índice de refração real do material que substitui a casca são variados um a um nas simulações para

Figura 2-10: Atenuação em uma fibra monomodo iluminada por fonte colimada.

se avaliar sua influência no comportamento deste tipo de sensor.

As curvas da absorbância e do índice de refração real do material substituto da casca são totalmente baseados em resultados de ensaios com o corante violeta genciana.

As constantes adotadas são:

-índice de refração do núcleo: $n_n = 1,45931$;

-índice de refração da casca: $n_c = 1,45709$; (valores obtidos junto ao fabricante da fibra)

-comprimento de onda de luz: $\lambda_0 = 632,28 \text{ nm}$;

-índice de refração real do material substituto da casca: $n_{cab} = 1,3315$; obtido por refratometria;

-curva de absorbância: $A = 0,00248 + 12989,319c$ (considerada para a violeta genciana em concentrações de $0,5 \times 10^{-4}$ moles/litro a $2,5 \times 10^{-4}$ moles/litro); obtida através da interpolação, no programa Microcal Origin¹, de dados colhidos num espectrofotômetro;

-raio do núcleo do estrangulamento: $r_n = 2 \mu\text{m}$ (para uma redução mais significativa, a fibra fica muito frágil); deduzido proporcionalmente ao raio externo do estrangulamento medido num projetor de perfil; e

-comprimento utilizado do estrangulamento: $L = 2 \text{ mm}$ (sugerindo as dimensões aproximadas de uma gota de um conta-gotas);

-inclinação da curva de absorbância: considerando a ranhura da cubeta de ensaio espectrofotométrico com $l = 1 \text{ cm}$.

Todos os cálculos dos exemplos foram efetuados pelo programa para microcomputador que se encontra no Apêndice E, com base na teoria de onda eletromagnética. Inicialmente, são calculados os parâmetros do modo na fibra, e depois estes são aplicados na equação da atenuação.

Todos os resultados dos cálculos teóricos são de atenuação normalizada, ou seja, a potência inicial é considerada igual para todas as medidas e os limites não se estendem além de $2,5 \times 10^{-4}$ moles/litro de concentração.

¹Microcal Software, Inc. - One Roundhouse Plaza - Northampton, MA 01060, USA

As variáveis se estendem a valores que podem ser obtidos na prática.

2.4.3 Comportamento do sensor com a variação do raio do estrangulamento

O diâmetro típico do núcleo de uma fibra monomodo é de aproximadamente $5\text{ }\mu\text{m}$ e o da casca é de $120\text{ }\mu\text{m}$. Após o estrangulamento, o diâmetro da casca fica reduzido a algumas dezenas de μm . Este diâmetro foi variado entre $2\text{ }\mu\text{m}$ e $20\text{ }\mu\text{m}$, obtendo-se o gráfico mostrado na Figura 2-11. Observa-se que, para diâmetros menores de estrangulamento, a inclinação da curva aumenta, significando que a sensibilidade é mais acentuada nestes casos.

Figura 2-11: Atenuação para diâmetros diferentes de estrangulamento.

2.4.4 Comportamento do sensor com a variação do comprimento utilizado do estrangulamento

O comprimento do estrangulamento pode variar numa faixa bastante ampla. Porém, para efeito de aproximação com valores práticos, foi introduzida uma variação na região modificada de 1 mm a 5 mm. Obteve-se o gráfico mostrado na Figura 2-12. Observa-se que, para comprimentos maiores de estrangulamento envolvidos pelo material absorvente, a inclinação da curva aumenta, significando que a sensibilidade aumenta correspondentemente.

Figura 2-12: Atenuação para comprimentos diferentes de estrangulamento.

2.4.5 Comportamento do sensor com a variação da inclinação da curva de absorção do material

Embora cada substância tenha uma característica de absorção no comprimento de onda de luz em função da concentração, variou-se a inclinação da curva obtida na prática para uma inclinação maior e para uma inclinação menor. O resultado é apresentado na Figura 2-13. A inclinação da curva segue inversamente a inclinação da função da absorbância em função da concentração, significando que a sensibilidade aumenta para substâncias que apresentam maior dependência da absorbância com relação à concentração.

Figura 2-13: Atenuação para inclinações diferentes da curva de absorbância.

2.5 Sensibilidade do sensor

Através da teoria do guiamento de luz numa fibra óptica e de alguns resultados extraídos dos gráficos da Seção 2.4, é possível concluir que os fatores descritos a seguir influenciam na sensibilidade do sensor.

2.5.1 Número de reflexões do raio de luz na interface

O coeficiente de absorção γ aumenta de acordo com o número de reflexões do raio óptico na interface entre o núcleo e o material que o envolve (eq. (2.6)) [36]. Aumentando o coeficiente de absorção, a sensibilidade, para um mesmo valor de concentração, aumenta também. Uma forma de se aumentar o número de reflexões na interface entre os dois meios é aumentar o comprimento da região sensível. Portanto, a sensibilidade do sensor varia com o comprimento da região sensível. Por outro lado, em uma fibra multimodo também pode haver um grande número de reflexões, com cada modo contribuindo de forma que, para um mesmo comprimento da região sensível, a fibra multimodo apresenta maior sensibilidade que uma fibra monomodo.

2.5.2 Uso de fibra multimodo ou monomodo na fabricação do sensor

A fibra multimodo pode ser usada para implementar sensores. A característica da atenuação que o campo evanescente da fibra impõe sobre a luz guiada pelo núcleo deve seguir a lei de Beer-Lambert, assim como em qualquer outra substância absorvente. Entretanto, Payne & Hale [34] mostram que a absorbância medida em experiências com fibra multimodo apresenta desvios com relação à lei de Beer, já que a distribuição da potência não é uniforme para todos os modos da fibra. Cada modo da distribuição uniforme da luz na fibra provoca um campo evanescente diferente e, assim, experimenta uma atenuação diferente no meio externo, conforme ilustra a Figura 2-14. Para se calcular a atenuação total sofrida pela potência que adentra a fibra é necessário calcular a

potência correspondente a cada modo, e depois somar os efeitos. O campo evanescente dos modos de ordem superior é muito mais sensível, pois o ângulo de incidência deles é menor. Quando vários modos são guiados por uma mesma fibra há tendência dos modos de mais alta ordem se acoplarem uns aos outros ao longo do estrangulamento. Também, fibras multimodo podem perder potência pela radiação dos modos para fora da casca além de perder pelo efeito de absorção na região de campo evanescente, o que resulta numa mistura dos efeitos mencionados. Para que o dispositivo se torne mais sensível e livre do efeito da radiação de modos, recomenda-se escolher os modos a serem excitados por intermédio de uma máscara que só deixa passar os modos de ordem superior cujos ângulos sejam maiores que o ângulo crítico e menores que 90° , como propõem [31] e [32]. [31] e [32] comparam resultados simulados com a fibra multimodo com todos os modos excitados uniformemente e com apenas os de alta ordem utilizando máscara.

De acordo com Hale & Payne [29] e Payne & Hale [34], os modos influem não só na sensibilidade do sensor, como também na confiabilidade do valor medido. Os modos de ordem mais alta, que têm um ângulo de incidência menor com relação a normal à interface entre os dois meios, provocam um campo evanescente mais intenso e portanto permitem que o sensor apresente uma sensibilidade maior. No entanto, numa fibra multimodo, caso todos os modos sejam igualmente excitados, cada modo contribuirá com a sua própria sensibilidade, que no cômputo geral dos efeitos não permitirá que o sensor obedeça a lei de Beer-Lambert. Esta diferença é demonstrada através da adoção de um coeficiente de absorção do material diferente para cada modo. Supondo que todos os modos da fibra são excitados igualmente, o coeficiente de absorção evanescente do conjunto dos modos é dado por [34]:

$$\gamma_{tot} = \gamma\eta \quad (2.20)$$

Onde η é a fração total da potência guiada contida nos campos evanescentes de todos os modos lançados, dado pela eq. (2.2). A potência de saída é dada pela eq.(2.4).

De acordo com Gloge [38], o número total de modos, N , suportado em uma fibra

supondo V elevado, é dado por [38]:

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (2.21)$$

A fração η_ν de potência do ν - ésimo modo é, aproximadamente, dada por [38]:

$$\eta_\nu = \frac{\nu}{N\sqrt{2N - 2\nu}} \quad (2.22)$$

Para integrar os efeitos de cada modo para a obtenção da atenuação total, $\frac{P}{P_0}$, deve-se considerar que [34]:

$$\frac{P}{P_0} = f(x) \quad (2.23)$$

onde $x = \sqrt{\frac{2}{N}}\gamma l = \frac{2\gamma l}{V}$, resultando em:

$$f(x) = \frac{1}{N} \int_0^N \exp\left[-\left(\frac{N}{2}\right)^{\frac{1}{2}} x \frac{\nu}{[N(2(N - \nu))^{\frac{1}{2}}]}\right] d\nu \quad (2.24)$$

A função $f(x)$ também pode ser obtida considerando-se que todos os modos têm o mesmo η [34]:

$$f(x) = \exp\left(-\frac{2}{3}x\right) \quad (2.25)$$

Comparando a eq. (2.24) com a eq. (2.25), obtém-se o gráfico da Figura 2-14[34]

O gráfico da Figura 2-14 mostra o desvio da lei de Beer que a atenuação sofre numa fibra multimodo por causa das diferentes quantidades de potência que cada modo transporta.

2.5.3 Redução do diâmetro da casca

A diminuição do raio da casca da fibra óptica utilizada na fabricação do sensor de campo evanescente proporciona um aumento na sensibilidade do sensor devido à aproximação

Figura 2-14: Desvio que a curva de atenuação sofre com relação a lei de Beer numa fibra multimodo [34]. A curva tracejada refere-se à lei de Beer enquanto que a curva em linha cheia representa o desvio.

do campo evanescente ao material absorvente. Numa fibra multimodo, devido à possibilidade da existência de modos de alta ordem, que atingem uma extensão maior, a necessidade desta redução no diâmetro da casca é menor do que numa fibra monomodo.

Os resultados analisados a seguir, com fibras de diferentes raios de núcleo, mostram que a sensibilidade aumenta para raios menores.

2.6 Perdas por estrangulamento

Segundo Snyder & Love [36], um estrangulamento efetuado de forma lenta não pode provocar perda da potência óptica. Portanto, uma fibra devidamente estrangulada não

apresenta perdas devido ao fato de estar fisicamente modificada. Para garantir que a variação seja suficientemente lenta, [36] propõe um modelo de aproximação por meio de diversas seções de fibra de dimensões diferentes, dispostas lado a lado, sendo que de uma para a outra seção haja máxima transferência de potência, conforme ilustra a Figura 2-15. Esta máxima transferência de potência é garantida por um critério que leva em conta a constante de propagação do modo fundamental e as constantes de propagação dos modos radiados para a casca.

Figura 2-15: Estrangulamento em uma fibra óptica, sub-dividido em seções discretas.

Em fibras multimodo, o limite é dado pelo ângulo crítico dos modos confinados, o que torna importante determinar corretamente as dimensões do estrangulamento para que não se perca potência óptica por radiação dos modos para a casca e fora dela.

Pela teoria da óptica geométrica, existe um comprimento mínimo para a transferência total de potência de uma seção para outra do estrangulamento. Considerando um estrangulamento parabólico, o comprimento mínimo é dado por [36]:

$$L_{mín} = \frac{(r_{n0} - r_n)^2}{(\theta_c r_n - \theta_0 r_{n0})} \quad (2.26)$$

onde r_n e r_{n0} estão mostrados na Figura 2-15.

Considerando um estrangulamento linear pode-se usar o seguinte comprimento mínimo [36]:

$$L_{\min} = \frac{r_{n0}^2 - r_n^2}{r_n \theta_c} \quad (2.27)$$

2.7 Otimização do sensor

O sensor com fibra óptica que usa a modulação de intensidade tem o inconveniente de não ser imune às interferências que podem advir de outras fontes de luz do meio externo, da flutuação do sinal da fonte, e de curvaturas e microcurvaturas na fibra. As outras fontes de luz provenientes do meio ambiente podem ser isoladas com a aplicação de uma pintura escura na jaqueta da fibra, em toda a sua extensão.

A perda de potência devido ao encurvamento da fibra depende do raio da curvatura e é tanto maior quanto menor for este raio. Segundo Keiser [37], diminuindo-se o raio, inicialmente a atenuação aumenta exponencialmente até um valor observável. A partir deste valor, um valor crítico de raio, a atenuação aumenta abruptamente.

As microcurvaturas são curvas de dimensões pequenas, que em telecomunicações ocorrem devido à acomodação da fibra óptica no cabo. Dificilmente ocorrerão num sensor, a menos que se use cabos de fibra como os usados nas telecomunicações.

A flutuação do sinal da fonte pode ser eliminada a partir do uso de um acoplador óptico na entrada de luz da fibra que transfere parte de seu sinal para um comparador na parte eletrônica do medidor. Assim, qualquer modificação na potência de saída da fibra não será mostrada antes da comparação com o nível da amostra do sinal de entrada da luz. Alternativamente, pode-se fazer uso de uma fonte de corrente comum para alimentar fontes de luz de comprimentos de onda diferentes. Os dois comprimentos de onda são lançados na fibra do sensor e depois é medida a potência de cada comprimento de onda. A diferença entre as duas potências é igual à atenuação do sensor.

Caso se queira multiplexar o sinal de um sensor com outros sensores, pode-se usar a técnica de multiplexação de auto-referência descrita por Spillman & Lord [39].

Capítulo 3

Descrição do sensor construído

A montagem experimental do sensor consta de:

- uma fonte de laser He-Ne no comprimento de onda de 632,8 nm, 5 mW;
- uma lente de objetiva com aumento de 50 vezes;
- posicionadores e elementos de fixação;
- 1m de fibra óptica monomodo para 1.300 μm com as seguintes características:
 - diâmetro externo de 80 μm ;
 - diâmetro interno de 4 μm ;
 - índice de refração do núcleo de 1,45709 (obtido junto ao fabricante);
 - índice de refração da casca de 1,45931 (obtido junto ao fabricante); e
- um medidor de potência óptica com cabeçote para medidas de luz entre 560 μm e 1150 μm .

A luz da fonte de laser é lançada na fibra com o auxílio da lente de objetiva e dos posicionadores. A outra extremidade da fibra óptica é acoplada ao fotodetector do medidor de potência óptica através de um acoplador do próprio medidor.

O sensor construído segue a idéia de um espectrofotômetro. Na espectrofotometria, uma amostra de referência é colocada, se for líquida, numa cubeta (recipiente transparente ao comprimento de onda aplicado). Um feixe de luz de uma certa potência é lançado sobre a cubeta. A potência da luz é medida após atravessar a cubeta. Em seguida, o

líquido que se deseja analisar é colocado no lugar do de referência e, novamente, a potência da luz é medida após atravessar o material. A absorção é dada em absorbância, definida por $\log(\frac{P}{P_0})$. A Figura 3-1 ilustra o procedimento para um espectrofotômetro.

Figura 3-1: Teste com a amostra referenciada.

3.1 Técnicas de fabricação do estrangulamento e montagem do sensor

O procedimento de montagem do sensor experimental pode ser dividido nas seguintes etapas.

3.1.1 Estrangulamento da fibra

Dentre os dois métodos mais difundidos para se obter a aproximação do campo evanescente do material absorvente, foi escolhido o método do estrangulamento, pela maior facilidade de execução com as condições oferecidas pelo ambiente de trabalho. O método da corrosão emprega um ácido forte e necessita de cuidados de um laboratório de química para realizá-lo.

A Figura 3-2 mostra a montagem para a realização do estrangulamento da fibra. Os dois elásticos tracionam a fibra de modo a produzir uma deformação prevista em torno de 5 mm. A fibra é previamente desencapada mecanicamente em cerca de 1 cm, na região

onde se pretende realizar o esticamento. A região da fibra, próxima à aplicação de calor é protegida, nos dois lados, com pedaços de cerâmica. O calor de uma chama de um maçarico de ourives é aplicado na região a ser esticada por cerca de 30 segundos, ou por tempo suficiente para que haja um esticamento visível da fibra. Na maioria das vezes, empregando o controle visual-manual, a chama foi aplicada intermitentemente de modo a tornar possível o acompanhamento do estrangulamento, evitando o rompimento da fibra.

Figura 3-2: Descrição do processo do segundo puxamento da fibra.

A desvantagem maior deste procedimento para expor o núcleo da fibra reside na impossibilidade de expor um comprimento maior do núcleo, o que a tornaria muito mais sensível e possibilitaria a comprovação do aumento da atenuação da luz com o aumento do comprimento de núcleo exposto. Além disso, o processo não elimina totalmente a casca e o núcleo não fica totalmente exposto. A fibra apenas tem as suas dimensões radiais diminuídas, como se pode observar na Figura 3-4.

Embora todo o procedimento de estrangulamento da fibra tenha tido apenas controle visual-manual, alguns estrangulamentos fabricados tiveram seu comprimento e diâmetro mínimo e máximo medidos, e valores médios foram utilizados nos cálculos.

Foram feitos diversos estrangulamentos, com fibras de diâmetro externo 80 μm e 120 μm . Todos os estrangulamentos foram ampliados num Projetor de Perfil Nikon, que fornece os valores de comprimento do estrangulamento e diâmetro externo mínimo e máximo. O diâmetro interno, o do núcleo, não pode ser medido neste aparelho, mas foi estimado proporcionalmente à diminuição do diâmetro externo. A Figura 3-3 mostra a foto de algumas amostras. A Figura 3-4 mostra um estrangulamento em "close-up".

Figura 3-3: Alguns estrangulamentos realizados em fibras.

Figura 3-4: "Close-up" de uma amostra de estrangulamento

3.1.2 Clivagem da fibra

Para se conseguir o melhor acoplamento de luz à fibra é necessário que seja feita uma boa clivagem, evitando superfície rugosa e rebarbas na região clivada. Desencapando-se previamente uma das extremidades da fibra, a clivagem foi realizada com a aplicação de um esforço num pequeno pedaço de uma liga de cobre cuja aresta encostava na fibra. Com o auxílio de um ligeiro deslocamento na fibra, consegue-se uma clivagem que, ao se observar num microscópio de aumento de 20 vezes, se mostrou satisfatória, pelo menos perpendicularmente ao eixo axial da fibra.

3.1.3 Acoplamento do laser na fibra

No intuito de conseguir a máxima potência possível no medidor de potência óptica, para que a variação do sinal não pudesse ser confundido com qualquer interferência, o acoplamento foi cuidadosamente realizado iniciando-se com uma boa clivagem da fibra e ajustando-se o foco da lente de objetiva. Um suporte rígido com apenas uma direção de ajuste se mostrou mais conveniente para manter o posicionamento da ponta da fibra no ponto desejado.

O acoplamento da fibra no detector do medidor de potência óptica não apresentou grandes problemas embora possa apresentar variações para fibras muito finas. Foi considerado um bom acoplamento quando a potência de luz de saída da fibra modificada fosse da ordem de dezenas de μW , estando aí incluídas as perdas no ar, de acoplamento e do estrangulamento da fibra.

Devido à dificuldade de repetição das mesmas condições iniciais para cada teste, não foi possível correlacionar valores de concentração com potência em uma só tabela.

3.1.4 Imobilização da fibra

Algumas montagens se mostraram muito sensíveis ao movimento do ar do meio ambiente, e para reduzir este efeito, toda sobra de fibra foi apoiada de forma a evitar trepidações.

3.2 Montagem utilizada nas medidas

As diversas diluições do corante foram aplicadas sobre a região estrangulada da fibra com o auxílio de um conta-gotas que proporciona um envolvimento de 4 mm de comprimento na fibra por tensão superficial do líquido. A Figura 3-5 mostra a montagem utilizada nas medidas.

Figura 3-5: Montagem para a medição da potência óptica de saída da fibra.

3.3 Dados experimentais sobre o material substituto da casca

Para tornar possível a comparação de valores obtidos na prática com o modelo teórico, e para simular situações próximas às práticas, foi escolhido um corante, o "crystal violet

”, ou violeta genciana, que tem uma variação considerável no comportamento referente à absorção no comprimento de onda da fonte disponível.

A influência do material está no índice de refração que varia com a concentração e é representado por duas partes distintas: a real e a imaginária. É possível medir cada uma delas separadamente.

O índice de refração real foi medido para concentrações diferentes do produto num refratômetro de Pulfrich. O resultado das medidas mostraram uma variação que pode ser considerada inexpressiva de uma medida para a outra dentro dos valores de concentração usados no experimento.

O índice de refração imaginário foi calculado para os valores de concentração com base em medições de absorbância obtidas em um espectrofotômetro Hitachi U-2000. O espectrofotômetro traça uma curva de absorbância por comprimento de onda cuja faixa pode ser limitada para as proximidades do comprimento de onda desejado. A partir das curvas foi possível interpolar os dados das medidas para outros valores de concentração.

3.3.1 Corante

O corante violeta genciana ($C_{25}H_{30}ClN_3$) é um pó verde escuro, de partículas brilhantes com lustro metálico. É solúvel em água ou clorofórmio e praticamente insolúvel em éter (Merck Index). Apresenta cor violeta em solução aquosa e apresenta um pico de absorção no comprimento de onda de 590 nm. A característica de absorbância vs. comprimento de onda de diversas concentrações é mostrada na Figura 3-6.

Existe uma faixa de concentrações dentro da qual o corante obedece a lei de Beer-Lambert, ou seja, a absorbância varia linearmente com relação à concentração do corante. A Figura 3-7 mostra a curva de absorbância vs. concentração no comprimento de onda de 630 nm. A faixa para a qual o corante tem variação linear da absorbância com a concentração depende da sua estrutura molecular. Para o violeta genciana o comportamento após a faixa de resposta linear é aquele mostrado na Figura 3-8. O que ocorre após aproximadamente $2,5 \times 10^{-4}$ moles/litro é a formação de agregados de moléculas

Figura 3-6: Absorvância do corante violeta genciana medido por intermédio do espectrofotômetro Hitachi U-2000.

do corante entre si. Quanto maior a concentração do corante, maior a quantidade e tamanho dos agregados, formando polímeros (dímeros, trímeros, etc) provocando um desvio do pico de absorvância e diminuindo o pico inicial. Portanto, faz-se necessário limitar a faixa de concentração de trabalho do corante para o sensor, sem o que a resposta pode ser falsa, já que a curva, após este limite, apresenta a mesma absorvância que em outro comprimento de onda. Então, para este comprimento de onda (590 nm) e para este corante, a faixa útil de concentrações é de 0 a $2,5 \times 10^{-4}$ moles/litro.

3.3.2 Solvente

A adsorção é um fenômeno de aderência de átomos, íons ou moléculas de um gás ou líquido na superfície de outra substância.

Figura 3-7: Absorvância do corante violeta genciana.

O corante adsorve no vidro. O metanol se mostrou o melhor solvente para diminuir o efeito da adsorção. No entanto, para manter as diluições as mais estáveis possíveis com o uso e com o tempo, e para evitar a evaporação do solvente, o corante foi diluído em água destilada, de modo que o metanol ou álcool comum foram empregados apenas para a limpeza de superfícies de vidro (conta-gotas, fibra e recipientes).

Foram realizadas cinco amostras diluídas dentro da faixa linear de absorvância, de 0.5×10^{-4} a 2.5×10^{-4} moles/litro, para os ensaios de refratometria e de medições na fibra.

Figura 3-8: Absorbância para uma faixa ampla de concentrações.

Capítulo 4

Resultados obtidos

Foram realizados alguns ensaios e os resultados de 4 deles são discutidos a seguir.

Cada ensaio corresponde a um estrangulamento diferente. Foram tomadas, no mínimo, 4 medidas de 5 concentrações do corante diluído para cada fibra.

Inicialmente, mediu-se a potência (em watts) da luz que saía da fibra modificada. Na Figura 4-1 se encontra uma amostra dos resultados obtidos em um ensaio.

A diferença de nível de potência de uma curva para a outra é devida à instabilidade mecânica do sistema de alinhamento fonte/fibra.

Para eliminar o problema de variações de potência de luz ocorridas antes da região modificada, todas as medidas subseqüentes foram divididas pela primeira, normalizando-se assim os ensaios. Em seguida foi aplicada uma média aritmética para cada ponto obtido e sobre a curva resultante foi realizada uma interpolação.

4.1 Ensaios

Os resultados obtidos para cada um dos 4 ensaios e os resultados calculados com os valores disponíveis são apresentados a seguir.

Figura 4-1: Resultados de ensaios com um mesmo estrangulamento. Cada curva corresponde a um ensaio distinto.

4.1.1 Medida de atenuação normalizada vs. concentração: ensaio (1)

Para este ensaio foi utilizada uma fibra com um estrangulamento de diâmetro aproximado de $29\ \mu\text{m}$ e 6 mm de comprimento. A Figura 4-2 ilustra os valores obtidos experimentalmente em comparação aos valores calculados com uma barra de erro de $\pm 5\%$.

Figura 4-2: Atenuação normalizada vs. concentração obtida no ensaio (1) e atenuação calculada.

4.1.2 Medida de atenuação normalizada vs. concentração: ensaio (2)

Para este ensaio foi utilizada uma fibra com um estrangulamento de diâmetro aproximado de $24\ \mu\text{m}$ e 5 mm de comprimento. A Figura 4-3 ilustra os valores obtidos experimentalmente em comparação aos valores calculados com uma barra de erro de $\pm 5\%$.

Figura 4-3: Atenuação normalizada vs. concentração obtida no ensaio (2) e atenuação calculada.

4.1.3 Medida de atenuação normalizada vs. concentração: ensaio (3)

Para este ensaio foi utilizada uma fibra com um estrangulamento de diâmetro aproximado de $16\text{ }\mu\text{m}$ e 4 mm de comprimento. A Figura 4-4 ilustra os valores obtidos experimentalmente em comparação aos valores calculados com uma barra de erro de $\pm 10\%$.

Figura 4-4: Atenuação normalizada vs. concentração obtida no ensaio (3) e atenuação calculada.

4.1.4 Medida de atenuação normalizada vs. concentração: ensaio (4)

Para este ensaio foi utilizada uma fibra com um estrangulamento de diâmetro aproximado de $11\text{ }\mu\text{m}$ e $5,6\text{ mm}$ de comprimento. A Figura 4-5 ilustra os valores obtidos experimentalmente em comparação aos valores calculados com uma barra de erro de $\pm 10\%$.

Figura 4-5: Atenuação normalizada vs. concentração obtida no ensaio (4) e atenuação calculada.

4.2 Comparação com os valores teóricos

Todos os cálculos teóricos foram realizados utilizando o modelo de Stewart[33]. Este modelo para fibra óptica considera uma região de casca inteiramente substituída pela substância. Portanto, o raio considerado para o cálculo das perdas é sempre o mesmo. Para adaptar a fórmula de Stewart para um estrangulamento, o raio considerado no cálculo das perdas foi o mínimo raio que o núcleo atinge, do centro do estrangulamento, desprezando a casca ainda existente e considerando a solução como sendo a nova casca.

4.2.1 Não-linearidade

Em quase todos os gráficos pode-se notar que as curvas obtidas não apresentam tendência de linearidade, como esperado pela teoria. Esta constatação é explicada por Ruddy[28] como sendo causada pela adsorção do corante na fibra óptica. Esta adsorção indesejável pode ser diminuída, ainda segundo Ruddy et al.[28], aplicando-se à fibra uma substância hidrofóbica ou usando solventes não-polares para diluir o corante.

4.2.2 Sensibilidade

Através dos 4 gráficos (Figura 4-2, 4-3, 4-4 e 4-5) é possível concluir que quanto menor o diâmetro do estrangulamento, maior é a sensibilidade do sensor, como sugerido pelos cálculos teóricos da Seção 2.4. Para o estrangulamento de $29\text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro obteve-se a faixa de intensidade relativa de potência óptica de 0,945 a 1 e para o de estrangulamento de $11\text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro obteve-se a faixa de 0,915 a 1 que, embora menor que a obtida na teoria, ainda é maior que a do estrangulamento de $16\text{ }\mu\text{m}$ e $24\text{ }\mu\text{m}$.

Devido à impossibilidade de se conseguir realizar um estrangulamento maior que 6 mm, a dependência da sensibilidade com o comprimento da região modificada não pode ser verificada.

4.2.3 Desvio dos valores medidos de atenuação

Dos 4 ensaios realizados, o que mais próximo ficou do valor calculado foi aquele realizado com o estrangulamento de diâmetro maior. Os outros, cujos estrangulamentos usados eram menores, desviaram progressivamente dos resultados teóricos. O erro relativo é mostrado na Figura 4-6, que relaciona o erro com o diâmetro do estrangulamento conseguido.

Figura 4-6: Gráfico do erro relativo cometido no último valor de atenuação de cada estrangulamento.

Algumas causas das discrepâncias entre os valores obtidos e os calculados com a diminuição do diâmetro da fibra podem ser apontadas. A impossibilidade de se conhecer com exatidão o valor do diâmetro do núcleo e a aplicação de um valor proporcional à diminuição da casca para o mesmo nos cálculos pode ser uma fonte de erro. O modelo adotado para o cálculo da atenuação não representa a situação real da região modificada

pois o modelo considera a existência de apenas dois meios (o núcleo da fibra e a casca absorvente) enquanto que a fibra estrangulada, na realidade, apresenta núcleo, casca e casca absorvente. O ideal para diminuir este erro seria a implementação de um modelo de um guia de três camadas cilíndrico.

Capítulo 5

Conclusões

Um sensor químico de concentração de corante com fibra óptica foi analisado, construído e ensaiado. O sensor baseia-se na relação da concentração da substância com a absorção de potência óptica em um dado comprimento de onda, utilizando a região de campo evanescente da fibra para efetuar a detecção desta absorção. A comprovação do efeito de absorção sobre a fibra óptica foi realizada.

Os resultados obtidos indicam que é possível empregar uma fibra óptica monomodo para detectar a concentração de um corante. Eliminando-se o inconveniente da adsorção do material que compõe a fibra, a lei de Beer-Lambert é obedecida numa fibra monomodo.

É possível alcançar o campo evanescente de uma fibra realizando um esticamento na região sensora. Este esticamento, mesmo realizado com controle visual-manual, se mostrou eficiente e capaz de provocar modificações significativas na potência da luz na fibra. Aplicando-se o corante sobre a fibra sem o estrangulamento, esta não apresenta sensibilidade, pois a intensidade do campo evanescente diminui rapidamente, apresentando valor não significativo na interface casca/corante. Com o estrangulamento, a casca se reduz e um valor significativo de intensidade do campo evanescente se faz presente no material absorvente, podendo este ter alguma de suas propriedades variada.

Um sensor que tenha um corante do mesmo tipo usado neste trabalho (dito catiônico) como parte ativa, deve trabalhar com concentrações baixas do mesmo devido à formação

dos agregados.

O sucesso do sensor realizado para detectar concentrações de soluções do corante violeta genciana permite a exploração deste efeito e a técnica para a construção de sensores de outras substâncias. A industrialização da região sensora seria possível se houvesse o controle do processo do puxamento a quente da fibra com a finalidade de obtenção de estrangulamentos com as dimensões desejadas, se a superfície do estrangulamento fosse tratada quimicamente para evitar fenômenos como os da adsorção e fosse criada uma forma de acoplamento das suas duas extremidades à fonte e ao fotodetector garantindo estabilidade mecânica. E a industrialização de um sensor para uma substância específica dependeria de um estudo espectrofotométrico preliminar desta substância para a adequação de faixas de trabalho e comprimento de onda a ser usado.

Uma grande parte da literatura envolvendo o assunto sensor de absorção pelo campo evanescente apresenta resultados experimentais. Existem poucos trabalhos que apresentam uma simulação, modelamento ou teoria envolvendo algum aspecto deste tipo de sensor. Portanto, para trabalhos futuros dentro desta área pode-se sugerir:

a) O desenvolvimento de um programa para computador que calcule automaticamente a perda de potência óptica considerando os parâmetros de comprimento de onda, índice de refração real e imaginário na fibra, dimensões físicas da região modificada, e que opere sem as restrições de guiamento fraco, já que a região sensível depende do índice de refração do material aplicado, que pode ser muito diferente do índice do núcleo da fibra. Deve também calcular a faixa de valores de parâmetros tais como índice de refração, absorbância e outros, da substância coadjuvante na fibra, para os quais o sensor responde adequadamente. Na literatura atual não há cálculos que quantifiquem a perda de potência na região de transição de diâmetro da fibra.

b) A montagem de um sistema de teste mais preciso que possibilite a correspondência de concentrações de uma substância com potências luminosas definidas, limitando as influências do meio externo, oscilações da fonte, acoplamentos instáveis e deficientes.

c) O aperfeiçoamento do sensor construído visando a medição de uma grandeza dire-

tamente relacionada com a concentração do material aplicado à fibra, usando variações da técnica exposta e construção da interface eletrônica, constituindo o conjunto um protótipo utilizável. Como exemplo, pode-se citar um sensor de pH que usa a técnica de absorção pelo campo evanescente na extremidade de uma fibra óptica, sendo a própria fibra o meio de retorno do sinal modulado e refletido por um espelho depositado nesta extremidade.

d) O modelamento de sensor com fibras de tipos diferentes da usada, como fibra multimodo, plástica, excêntrica (tipo D) e outros.

e) A técnica de modificação da potência de luz inicial pelo campo evanescente pode também ser aplicada, sem grandes variações conceituais, à fluorescência. É desejável, então, desenvolver a teoria relativa ao sensor de fluorescência pelo campo evanescente.

Referências

- [1] Giallorenzi, T. G.; Bucaro, A.; Dandridge, A.; Sigel, G. H.; Cole, J. H., Rashleigh, S. C. e Priest, R. G. (1982). Optical fiber sensor technology. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-18, N.4, p. 626-665.
- [2] Pitt, G. D.; Extance P.; Neat, R. C.; Batchelder, D. N.; Jones, R. E.; Barnett, J. A. e Pratt, R. H. (1985). Optical fibre sensors. *IEE Proceedings*. vol. 132, n.4, p. 214-248.
- [3] Culshaw, B. e Dakin, J. (1988). Optical fiber sensors, vol. 1 e vol. 2, Boston, Artech House.
- [4] Scheggi, A. M. e Baldini, F. (1993). Chemical sensing with optical fibres. *Journal of Optoelectronics*, vol.8, p. 133-156.
- [5] David, D. J.; Willson, M. C. e Ruffin, D. S. (1976). Direct measurement of ammonia in ambient air. *Analytic Letters*, vol.9, p.389.
- [6] Chan, K.; Ito, H. e Inaba, H. (1983). Optical remote monitoring of CH₄ gas using low-loss optical fiber link and InGaAsP light emitting diode in 1.33 μ m region. *Applied Physics Letters*, vol.43, p. 634-636.
- [7] Tai, H.; Tanaka, H. e Yoshino, T. (1987). Fiber-optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392- μ m line of a He-Ne laser, *Optics Letters*, vol. 12, p. 437-439.

- [8] Muhammad, F. A.; Stewart, G. e Jin, W. (1993). Sensitivity enhancement of D-fibre methane gas sensor using high-index overlay, *IEE Proceedings-J*, vol.140, p.115-118.
- [9] Giuliani, J. F.; Wohltjen, H. e Jarvis, N. L. (1983). Reversible optical waveguide sensor for ammonia vapors, *Optics Letters*, vol.8, p.54-56.
- [10] Andrade, J. D.; Vanwagenen, R. A.; Gregonis, D. E.; Newby, K. e Lin J. N. (1985). Remote fiber-optic biosensors based on evanescent-excited fluoro-immunoassay: concept and progress. *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-32, p. 1175-1179.
- [11] Eenick, R. G.; de Bruijn, H. E.; Kooyman, R. P. H. e Greve J. (1990). Fibre-fluorescence immunosensor based on evanescent wave detection. *Analytica Chimica Acta*, Vol. 238, p. 317-321.
- [12] Bluestein, B.I. (1990). Trends Biotechnology. vol.8, p.161-168.
- [13] Carome, E.F.; Coghlan, G.A.; Sukenik, C.N. eZull, J.E. (1993). Fiberoptic evanescent wave sensing of antigen-antibody binding. *Sensors and Actuators B*, vol. 13-14, p. 732-733.
- [14] Peterson, J. I.; Goldstein, S. R. e Fitzgerald, R. V. (1980). Fiber optic pH probe for physiological use. *Analytical Chemistry*, vol.52, p. 864-869.
- [15] Boide, G.; Blanc, F. e Machuron-Mandard (1991). pH measurements with dyes co-immobilization on optodes: principles and associated instrumentation. *International Journal of Optoelectronics*, vol.6, p. 407-423.
- [16] Wolthuis, R., McCrae, D; Saaski, E., Hartl, J. e Mitchell, G. (1992). Development of a medical fiber-optic pH sensor based on optical absorption. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol.39, p. 531-537.
- [17] Netto, E. J.; Peterson, J. I.; McShane, M. e Hampshire V. (1995). A fiber-optic broad-range pH sensor system for gastric measurements. *Sensors and Actuators B*, vol.29, p.157-163.

- [18] Muto, S.; Fukusawa, A.; Kamimura, M.; Shinmura, F. e Ito, H. (1989). Fiber humidity sensor using fluorescent dye-doped plastics, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.28, p. L 1065-L 1066.
- [19] Muto S.; Fukusawa, A.; Ogawa, T.; Morisawa, M. e Ito, H. (1990). Optical detection of moisture in air and in soil using dye-doped plastic fibers, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.29, p. L 1023-L 1025.
- [20] Sadaoka, Y.; Matsuguchi, M. e Sakai, Y. (1991). Optical fiber humidity sensor using Nafion-tri-phenylcarbinol composite. *Journal of Electrochemical Society*, vol.138, p. 614-615.
- [21] Sadaoka, Y.; Matsuguchi, M.; Sakai, Y. e Murata, Y. (1992). Optical humidity sensing characteristics of Nafion-dyes composite thin films. *Sensors and Actuators B*, vol.7, p.443-446.
- [22] Cavinato, A. G.; Mayes, D. M.; Ge, Z. e Callis, J. B. (1990). Noninvasive method for monitoring ethanol in fermentation processes using fiber-optic near infrared spectroscopy. *Analytical Chemistry*, vol.62, p. 1977-1982.
- [23] Falciai, R.; Baldini, F., Bechi, P. e Cusi, F. (1991). "In vivo " entero-gastric reflux detection by optical fibres. *International Journal of Optoelectronics*, vol.6, p. 443-450.
- [24] Spichiger, U. E.; Freiner, D., Bakker, E.; Rosatzin, T. e Simon, W. (1993). Optodes in clinical chemistry: potencial and limitations. *Sensors and Actuators B*, vol.11, p.263-271.
- [25] Lieberman, R. A. (1993). Recent progress in intrinsic fiber-optic chemical sensing II, *Sensors and Actuators B*, vol.11, p.43-55.
- [26] Archenault, M.; Gagnaire, H. e Goure, J. P. (1991). A simple intrinsic optical fibre refractometer. *Sensors and Actuators B*, vol.5, p. 173-179.

- [27] Kobayasi, T.; HIRAMA, M. e Inaba, H. (1981). Remote monitoring of NO₂ molecules by differential absorption using optical fibers. *Applied Optics*, vol.20, p.3279.
- [28] Ruddy, V.; MacCraith, D. e Murphy, J. A. (1990). Evanescent wave absorption spectroscopy using multimode fibers. *Journal of Applied Physics*, vol.67, p. 6070-6074.
- [29] Hale, Z. M.; e Payne, F. P. (1994). Fluorescent sensors based on tapered single-mode optical fibres. *Sensors and Actuators B*, vol.17, p. 233-240.
- [30] Mackenzie, H. S. e Payne, F. P. (1990). Evanescent field amplification in a tapered single-mode optical fibre. *Electronics Letters*, vol.26, p.130-132.
- [31] Gupta, B. D.; Sharma, A. e Singh, C. D. (1993). Evanescent wave absorption sensors based on uniform and tapered fibres. A comparative study of their sensitivities. *International Journal of Optoelectronics*, vol.8, p.409-418.
- [32] Gupta, B. D.; e Singh, C. D. (1994). Evanescent-absorption coefficient for diffuse source illumination: uniform- and tapered-fiber sensors. *Applied Optics*, vol.33, p. 2737-2742.
- [33] Stewart, G.; Norris, J.; Clark, D. F. e Culshaw, B. (1991). Evanescent-wave chemical sensors - a theoretical evaluation. *International Journal of Optoelectronics*, vol.6, p. 227-238.
- [34] Payne, F. P. e Hale, Z. M. (1993). Deviation from Beer's law in multimode optical fibre evanescent field sensors. *International Journal of Optoelectronics*, vol.8, p. 743-748.
- [35] Hale, Z. M. e Payne, F. P. (1994). Demonstration of an optimised evanescent field optical fibre sensor. *Analytica Chimica Acta*, vol.293, p. 49-54.
- [36] Snyder, A. W. e Love J. D. (1995). *Optical Waveguide Theory*. London, Chapman & Hall.

- [37] Keiser, G. (1983). Optical Fiber Communications. New York, McGraw-Hill Book Company.
- [38] Gloge D. (1971). Weakly Guiding Fibers. Applied Optics, vol.10, p.2252-2258.
- [39] Spillman, W. B. e Lord J. R. (1987). Self-referencing multiplexing technique for fiber-optic intensity sensors. *Journal of Lightwave Technology*, vol. LT-5, p. 865-869.

Apêndice A

Equação característica da fibra

Dados:

n_n - índice de refração do núcleo;

n_c - índice de refração da casca;

r_n - raio do núcleo; e

λ_0 - comprimento de onda no vácuo;

Os parâmetros modais normalizados usados nos equacionamentos de problemas que envolvem fibra óptica são:

-constante de fase transversal normalizado para a região do núcleo:

$$ur_n = k_0^2 n_n^2 - \beta^2 \quad (\text{A.1})$$

-constante de atenuação transversal normalizado para a região da casca:

$$wr_n = \beta^2 - k_0^2 n_c^2 \quad (\text{A.2})$$

-frequência normalizada:

$$V = \sqrt{(ur_n)^2 + (wr_n)^2} \quad (\text{A.3})$$

que, em termos dos dados da fibra pode ser dada por:

$$V = \frac{2\pi r_n}{\lambda} \sqrt{n_n^2 - n_c^2} \quad (\text{A.4})$$

-constante de propagação normalizada:

$$b = \frac{r_n^2 w^2}{V^2} \quad (\text{A.5})$$

que, em termos das características da fibra pode ser representada por:

$$b = \frac{(\frac{\beta}{k_0})^2 - n_c^2}{n_n^2 - n_c^2} \quad (\text{A.6})$$

onde β é a componente do vetor propagação na direção longitudinal da fibra, ou constante de propagação (no caso de fibras sem perdas).

Segundo Okoshi¹, a equação característica para todos os modos em uma fibra óptica é dada por:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{J'_\nu(ur_n)}{ur_n J_\nu(ur_n)} + \frac{K'_\nu(wr_n)}{wr_n K_\nu(wr_n)} \right] \left[\frac{n_n}{n_c} \frac{J'_\nu(ur_n)}{J_\nu(ur_n)} + \frac{K'_\nu(wr_n)}{wr_n K_\nu(wr_n)} \right] \\ &= \nu^2 \left[\frac{1}{(ur_n)^2} + \frac{1}{(wr_n)^2} \right] \left[\frac{n_n}{n_c} \frac{1}{(ur_n)^2} + \frac{1}{(wr_n)^2} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

onde, pelas relações de recorrência das funções de Bessel,

$$J'_\nu(ur_n) = \frac{J_{\nu-1}(ur_n) - J_{\nu+1}(ur_n)}{2} \quad (\text{A.8})$$

$$K'_\nu(wr_n) = -\frac{K_{\nu-1}(wr_n) + K_{\nu+1}(wr_n)}{2} \quad (\text{A.9})$$

¹Okoshi, T. (1982). *Optical Fibers*, Ed. Academic Press, p.48-81.

Substituindo o valor de ν pode-se obter a equação característica para o modo correspondente. Assim, para $\nu = 0$ obtém-se a equação característica do modo TE ou TM, respectivamente:

$$\frac{J_1(ur_n)}{uJ_0(ur_n)} + \frac{K_1(wr_n)}{wK_0(wr_n)} = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{k_1^2 J_1(ur_n)}{uJ_0(ur_n)} + \frac{k_2^2 K_1(wr_n)}{K_0(wr_n)} = 0 \quad (\text{A.11})$$

Para $\nu = 1$, obtém-se a equação característica dos modos HE_{1n} e EH_{1n} :

$$\begin{aligned} & \left(\frac{J_0(ur_n)J_2(ur_n)}{2ur_n J_1(ur_n)} - \frac{K_0(wr_n)K_2(wr_n)}{2wr_n K_1(wr_n)} \right) \left(\frac{J_0(ur_n)J_2(ur_n)}{2ur_n J_1(ur_n)} - \frac{(1-\Delta)^2 K_0(wr_n)K_2(wr_n)}{2wr_n K_1(wr_n)} \right) \\ &= \frac{Vwr_n}{(ur_n)^4(wr_n)^4} + \frac{(1-\Delta)^2(wr_n)^2V^2}{(ur_n)^4(wr_n)^4} + \frac{(1-\Delta)^2V^4}{(ur_n)^4(wr_n)^4} \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Para $\nu = 2$, obtém-se a equação característica dos modos HE_{2n} e EH_{2n} :

$$\begin{aligned} & \left(\frac{J_1(ur_n)J_3(ur_n)}{2ur_n J_2(ur_n)} - \frac{K_1(wr_n)K_3(wr_n)}{2wr_n K_2(wr_n)} \right) \left(\frac{J_1(ur_n)J_3(ur_n)}{2ur_n J_2(ur_n)} - \frac{(1-\Delta)^2 K_1(wr_n)K_3(wr_n)}{2wr_n K_2(wr_n)} \right) \\ &= 4 \left(\frac{Vwr_n}{(ur_n)^4(wr_n)^4} + \frac{(1-\Delta)^2(wr_n)^2V^2}{(ur_n)^4(wr_n)^4} + \frac{(1-\Delta)^2V^4}{(ur_n)^4(wr_n)^4} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

Para $\nu = 3$, obtém-se a equação característica dos modos HE_{3n} e EH_{3n} :

$$\begin{aligned} & \left(\frac{J_2(ur_n)J_4(ur_n)}{2ur_n J_3(ur_n)} - \frac{K_2(wr_n)K_4(wr_n)}{2wr_n K_3(wr_n)} \right) \left(\frac{J_2(ur_n)J_4(ur_n)}{2ur_n J_3(ur_n)} - \frac{(1-\Delta)^2 K_2(wr_n)K_4(wr_n)}{2wr_n K_3(wr_n)} \right) \\ &= 9 \left(\frac{Vwr_n}{(ur_n)^4(wr_n)^4} + \frac{(1-\Delta)^2(wr_n)^2V^2}{(ur_n)^4(wr_n)^4} + \frac{(1-\Delta)^2V^4}{(ur_n)^4(wr_n)^4} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

onde n é a n -ésima raiz da equação característica.

Apêndice B

Dedução da equação de atenuação [33]

Segundo Snyder & Love [36], utilizando o método da perturbação, pode-se escrever a constante de propagação da luz numa fibra perturbada como sendo:

$$\beta_n^2 - \beta_0^2 = \frac{k_0^2 \int \int_A \Delta \varepsilon |E|^2 dA}{\int \int_\infty |E|^2 dA} \quad (\text{B.1})$$

onde

$$\Delta \varepsilon = (n_n - jk)^2 - n_n^2 = n_n^2 - 2jkn_n - k^2 - n_n^2 \quad (\text{B.2})$$

Considerando-se k^2 muito pequeno, $\Delta \varepsilon \cong -2jkn_r$, tem-se que

$$\beta_n^2 - \beta_0^2 = (\beta_0 - j\alpha_a)^2 - \beta_0^2 = \beta_0^2 - 2j\alpha_a\beta_0 - \alpha_a^2 - \beta_0^2 \quad (\text{B.3})$$

Considerando-se α_a^2 muito pequeno, $\beta_n^2 - \beta_0^2 \cong -2j\alpha_a\beta_0$ e $2\alpha_a = \alpha'(1)$, tem-se que

$$-\alpha' j \beta_0 = \frac{k_0^2 (-2jkn_r) \int \int_A |E|^2 dA}{\int \int_\infty |E|^2 dA} \quad (\text{B.4})$$

¹O coeficiente de atenuação da fibra foi chamado de α' enquanto que o coeficiente de atenuação do material absorvente foi chamado de α .

e

$$\alpha' = \frac{2k_0kn_r \int \int_A |E|^2 dA}{n_{ef} \int \int_{\infty} |E|^2 dA} \quad (\text{B.5})$$

O campo elétrico na casca da fibra é representado por:

$$E_y = E_0 \left(\frac{K_0\left(\frac{wr_n r}{r_n}\right)}{K_0(wr_n)} \right) = \frac{E_0}{K_0(wr_n)} \left[\left(\frac{\pi r_n}{2(wr_n)r} \right)^{\frac{1}{2}} e^{\left(-\frac{wr_n}{r_n}r\right)} \right] \quad (\text{B.6})$$

Logo, a integral dupla do numerador da eq.(B.5) é:

$$\int \int_A |E|^2 dA = \frac{E_0^2}{K_0^2(wr_n)} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^{\infty} \frac{\pi r_n}{2(wr_n)r} e^{\left(-\frac{2(wr_n)r}{r_n}\right)} r dr \quad (\text{B.7})$$

e

$$\int \int_A |E|^2 dA = \frac{1}{2} \frac{E_0^2 \pi^2 r_n^2}{(wr_n)^2 K_0^2(wr_n)} e^{\left(-\frac{2(wr_n)r_n}{r_n}\right)} \quad (\text{B.8})$$

A potência óptica total pode ser dada, segundo Arnaud², por:

$$P_t = \int \int_{\infty} |E|^2 dA \quad (\text{B.9})$$

Então, a integral dupla do denominador da eq.(B.5) torna-se:

$$\int \int_{\infty} |E|^2 dA = \pi r_n^2 E_0^2 \frac{V^2 K_1^2(wr_n)}{(wr_n)^2 K_0^2(wr_n)} \quad (\text{B.10})$$

Substituindo-se as eqs. (B.8) e (B.10) na eq. (B.5), obtém-se ⁽³⁾:

$$\alpha' = \frac{k_0kn_r}{n_{ef}} \frac{\pi(wr_n)^2}{(wr_n)^2 V^2 K_1^2(wr_n)} e^{\left(-\frac{2(wr_n)r_n}{r_n}\right)} \quad (\text{B.11})$$

²Arnaud, J.A. (1976). *Beam and Fiber Optics*, Ed. Academic Press, p. 362.

³Como a atenuação de potência (γ) de uma fibra por absorção pelo campo evanescente é devido a α' apenas ($\gamma = \alpha' + j\beta$), nos cálculos da atenuação a eq. (B.11) foi utilizada designada por γ .

Apêndice C

Conversão de parâmetros da teoria de onda eletromagnética para óptica geométrica

No cálculo da atenuação em uma fibra multimodo usando o método da óptica geométrica, a atenuação é função do ângulo que o raio de luz faz com a normal à interface entre os dois meios. Como existe dificuldade em se obter o ângulo correspondente a cada modo na prática, é possível calcular a equivalência do ângulo com o modo. Segundo Cherin¹, a correspondência é feita através de:

$$U = \frac{M \cdot \pi}{2} \quad (\text{C.1})$$

onde M é o número do modo. Este número, M , é designado para representar um único modo e se baseia em:

$$M = o + 2m \quad (\text{C.2})$$

onde o é a ordem da função de Bessel utilizada na equação característica para deter-

¹Cherin, A.H. (1983). *An Introduction to Optical Fibers*, Ed. McGraw-Hill Book Company, p.108-112.

minado modo LP_{om} , e m é o número de raízes da função de Bessel.

Usando a equivalência da componente transversal do vetor de propagação da onda dentro da fibra e fora dela é possível relacionar o ângulo que o raio de luz faz com o eixo axial e o número de modo M . Assim,

$$\theta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{M\lambda_0}{4r_n n_n}\right) \quad (\text{C.3})$$

onde n_n é o índice de refração do núcleo.

Apêndice D

Espectrofotometria de absorção na região de luz visível

A capacidade que algumas substâncias possuem de absorver luz pode ser usada para auxiliar na sua identificação, pois cada substância apresenta um espectro de absorção diferente para a mesma faixa de comprimento de onda. O método de análise desta característica é a espectroscopia.

”Os espectros de absorção no ultra-violeta e no visível constituem um instrumento valioso na identificação de compostos orgânicos insaturados e na elucidação de suas estruturas.”¹

O espectrofotômetro fornece informações de absorbância por comprimento de onda. A absorbância é definida por Ewing:

$$A = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) \frac{1}{l} \quad (\text{D.1})$$

A Figura D-1 mostra o procedimento de um ensaio espectrofotométrico.

A lei de Beer-Lambert relaciona a concentração da substância com a capacidade que ela tem de absorver potência luminosa num certo comprimento de onda, e é dada por

¹Ewing, G. W. *Métodos Instrumentais de Análise Química*, vol.1, Ed. Edgard Blücher, p. 44-45.

Figura D-1: Procedimento de um ensaio espectrofotométrico

$$P = P_0 e^{-\alpha l} \quad (D.2)$$

onde l é o caminho óptico e α é o coeficiente de absorção da substância que depende da concentração da mesma, e é dado por:

$$\alpha = \alpha_m C \quad (D.3)$$

onde C é a concentração da substância e α_m é o coeficiente de absorção molar da substância.

Pode-se relacionar a absorbância com o coeficiente de absorção por intermédio da eq. (D.2),

$$\frac{P}{P_0} = e^{-\alpha l} \Rightarrow \frac{P_0}{P} = e^{\alpha l} \quad (D.4)$$

substituindo a eq. (D.4) na eq. (D.1) tem-se:

$$A = \log(e^{\alpha l}) \frac{1}{l} \quad (D.5)$$

Mudando-se a base do logarítmo decimal para o natural, resulta em:

$$A = \frac{\ln(e^{\alpha l})}{\ln(10)} \frac{1}{l} \quad (\text{D.6})$$

$$\ln(e^{\alpha l}) = A \ln(10) l \quad (\text{D.7})$$

Finalmente,

$$\alpha = 2,303 A l \quad (\text{D.8})$$

Apêndice E

Programas usados para o cálculo da atenuação

A seguir, estão listados os programas usados nos cálculos da atenuação, com exemplo numérico de um deles.

1. Este programa calcula a atenuação, segundo Stewart, para um único valor de concentração do material absorvente. É para ser usado no cálculo das perdas de vários valores de concentração de forma a se conseguir o gráfico das perdas.

$nn := 1.45931$ índice de refração do núcleo

$nc := 1.45709$ índice de refração da casca

$ncab := 1.3315$ índice de refração, parte real da casca absorvente (obtido na refratometria)

$\lambda := 632.8 \cdot 10^{-9}$ comprimento de onda (m)

$m := .4 \cdot 10^{-6}$ raio do núcleo da fibra (m)

$k0 := 2 \cdot \frac{\pi}{\lambda}$ número de onda (1/m)

$c := 2.5 \cdot 10^{-4}$ concentração do corante (moles/litro)

$A := .00248 + 20000 \cdot c$ absorbância do corante em função da concentração para λ dado (obtido na espectrofotometria), (1/cm)

$l := .01$ ranhura da cubeta de ensaio de espectrofotometria (m)

$V := \sqrt{(k0 \cdot m)^2 \cdot (nn^2 - ncab^2)}$ $V = 2.372$ frequência normalizada

$\Delta := \frac{nn^2 - ncab^2}{2 \cdot nn^2}$ $\Delta = 0.084$ diferença de índices

$y := 2.36$ valor arbitrário designado à variável para resolver a equação característica

$x(y) := \sqrt{V^2 - y^2}$ $x(y) = 0.239$

Equação característica do modo fundamental:

$$L(y) := \left(\frac{J_0(x(y)) - J_n(2, x(y))}{2 \cdot x(y) \cdot J_1(x(y))} - \frac{K_0(y) + K_n(2, y)}{2 \cdot y \cdot K_1(y)} \right) \cdot \left[\frac{J_0(x(y)) - J_n(2, x(y))}{2 \cdot x(y) \cdot J_1(x(y))} - (1 - \Delta)^2 \cdot \frac{K_0(y) + K_n(2, y)}{2 \cdot y \cdot K_1(y)} \right]$$

$$M(y) := \left[\frac{V^2 \cdot y^2}{x(y)^4 \cdot y^4} - \frac{(1 - \Delta)^2 \cdot y^2 \cdot V^2}{x(y)^4 \cdot y^4} + \frac{(1 - \Delta)^2 \cdot V^4}{x(y)^4 \cdot y^4} \right]$$

$$f(y) := L(y) - M(y)$$

$$z := \text{root}(f(y), y)$$

$$z = 1.681313$$

raiz encontrada pelo programa

parâmetros de guiamento:

$$b := \frac{z^2}{V^2} \quad b = 0.502$$

$$W := \sqrt{b \cdot V^2} \quad W = 1.681$$

$$U := \sqrt{V^2 - W^2} \quad U = 1.673$$

$$\beta := \sqrt{\frac{W^2 + (k_0 \cdot n_{cab})^2 \cdot m^2}{m^2}} \quad \beta = 1.387 \cdot 10^7 \quad \text{constante de propagação}$$

$$n_{ef} := \frac{\beta}{k_0} \quad n_{ef} = 1.39717 \quad \text{índice efetivo}$$

Transformação da absorbância em coeficiente de absorção:

$$\alpha := A \cdot \frac{1}{l} \cdot \ln(10) \quad \alpha = 1.152 \cdot 10^3$$

para se calcular o índice de refração imaginário k é necessário saber o valor do coeficiente de absorção do material.

$$k := \frac{\lambda \cdot \alpha}{4 \cdot \pi} \quad k = 5.8 \cdot 10^{-5}$$

$$\gamma := \frac{k \cdot n_{cab} \cdot \pi \cdot k_0 \cdot U^2 \cdot \exp((-2 \cdot W))}{n_{ef} \cdot W^2 \cdot V^2 \cdot K_1(W)^2}$$

$$\gamma = 227.82617$$

2. Este programa simula um sensor de absorção que é alimentado por uma fonte de luz colimada.

dados:

θ_1 - ângulo mínimo	r_i - raio inicial do núcleo (m)
θ_2 - ângulo máximo	r_o - raio final do núcleo (m)
m - raio do núcleo (m)	l - comprimento da primeira transição do estrangulamento
nn - índice de refração do núcleo	
nc - índice de refração da casca	
λ - comprimento de onda (m)	
θ_c - ângulo crítico (rad)	
α - coeficiente de absorção do material	

2.1. Cálculo da atenuação para fibra multimodo com diâmetro uniforme iluminada com fonte colimada.

$$\theta_1 := 82 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \theta_2 := \frac{\pi}{180} \cdot 84 \quad m := 300 \cdot 10^{-6} \quad nn := 1.457 \quad \lambda := 664 \cdot 10^{-9}$$

$$y := 0, 1 \dots 10 \quad nc(y) := 1.335 + \left(\frac{1.385 - 1.335}{10} \right) \cdot y \quad nc_n(y) := \frac{nc(y)}{nn} \quad nnc(y) := \frac{nn}{nc(y)}$$

$$i := 0 \dots 3 \quad \theta_c(y) := \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{nc(y)}{nn}\right)$$

$$\gamma(\theta) := \frac{\lambda \cdot nc(y) \cdot \cos(\theta) \cdot \cot(\theta)}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot nn^2 \cdot (\cos(\theta_c(y)))^2 \cdot [(\sin(\theta))^2 - (\sin(\theta_c(y)))^2]^5} \quad \text{Obs: } \gamma = \gamma / \alpha$$

$$\gamma_l(\theta) := \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \gamma(\theta)}{[1 - nn^2 \cdot (\cos(\theta))^2]^2} d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\theta)}{[1 - nn^2 \cdot (\cos(\theta))^2]^2} d\theta}$$

Obs: $\gamma_l = \gamma_{ef} / \alpha$
onde γ_{ef} é a atenuação efetiva

2.2. Cálculo da atenuação para uma fibra multimodo com diâmetro variante(estrangulamento) iluminada por uma fonte colimada.

$$\theta_1 := 82 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$\theta_2 := \frac{\pi}{180} \cdot 84$$

$$ro(i) := 150 \cdot 10^{-6} + \left(\frac{300 \cdot 10^{-6} - 150 \cdot 10^{-6}}{3} \right) \cdot i$$

$$ri := 300 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda := 664 \cdot 10^{-9}$$

$$nnc(y) := \frac{nn}{nc(y)}$$

$$l := .05$$

$$r(z, l, i) := ri - \frac{z}{l} \cdot (ri - ro(i))$$

$$\Omega(l, i) := \text{atan}\left(\frac{ri - ro(i)}{l}\right)$$

$$\phi_1(z, l, i) := \text{acos}\left(\frac{ri \cdot \cos(\theta_1)}{r(z, l, i)}\right) - \Omega(l, i)$$

$$\phi_2(z, l, i) := \text{acos}\left(\frac{ri \cdot \cos(\theta_2)}{r(z, l, i)}\right) - \Omega(l, i)$$

$$\gamma(i, y, \theta, z) := \frac{\lambda \cdot nc(y) \cdot \cos(\theta) \cdot \cot(\theta)}{2 \cdot \pi \cdot r(z, l, i) \cdot nn^2 \cdot (\cos(\theta c(y)))^2 \cdot \left[(\sin(\theta))^2 - (\sin(\theta c(y)))^2 \right]}$$

Obs: $\gamma = \gamma / \alpha$

$$\gamma_t(i, y) := \frac{\int_0^1 \int_{\phi_1(z, l, i)}^{\phi_2(z, l, i)} \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \gamma(i, y, \theta, z)}{(1 - nn^2 \cdot \cos(\theta)^2)^2} d\theta dz}{\int_0^1 \int_{\phi_1(z, l, i)}^{\phi_2(z, l, i)} \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\theta)}{(1 - nn^2 \cdot \cos(\theta)^2)^2} d\theta dz}$$

Obs: $\gamma_t = \gamma_{ef} / \alpha$

onde γ_{ef} é a atenuação efetiva

2.3. Cálculo da atenuação para uma fibra monomodo com diâmetro uniforme iluminada por fonte colimada.

$$\theta_1 := \frac{\pi}{2} - .07693 \quad \theta_2 := \frac{\pi}{2} \quad m := 2 \cdot 10^{-6} \quad nn := 1.45931 \quad \lambda := 632.8 \cdot 10^{-9}$$

$$y := 0, 1 \dots 20 \quad nc(y) := 1.35 + \left(\frac{1.44 - 1.35}{20} \right) \cdot y \quad ncn(y) := \frac{nc(y)}{nn} \quad nnc(y) := \frac{nn}{nc(y)}$$

$$i := 0 \dots 3 \quad \theta c(y) := \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{nc(y)}{nn}\right)$$

$$\gamma(\theta) := \frac{\lambda \cdot nc(y) \cdot \cos(\theta) \cdot \cot(\theta)}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot nn^2 \cdot (\cos(\theta c(y)))^2 \cdot \left[(\sin(\theta))^2 - (\sin(\theta c(y)))^2 \right]^{.5}}$$

Obs: $\gamma = \gamma/\alpha$

$$\gamma l(\theta) := \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \gamma(\theta)}{\left[1 - nn^2 \cdot (\cos(\theta))^2 \right]^2} d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\theta)}{\left[1 - nn^2 \cdot (\cos(\theta))^2 \right]^2} d\theta}$$

Obs: $\gamma l = \gamma_{ef}/\alpha$
onde γ_{ef} é a atenuação efetiva

2.4. Cálculo da atenuação para uma fibra monomodo com diâmetro variante(estrangulamento) iluminada por fonte colimada.

$$\theta 1 := \frac{\pi}{2} - .07693$$

$$\theta 2 := \frac{\pi}{2}$$

$$ro(i) := .2 \cdot 10^{-6} + \left(\frac{2 \cdot 10^{-6} - .2 \cdot 10^{-6}}{3} \right) \cdot i$$

$$ri := 2 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda := 632.8 \cdot 10^{-9}$$

$$nnc(y) := \frac{nn}{nc(y)}$$

$$l := .005$$

$$r(z, l, i) := ri - \frac{z}{l} \cdot (ri - ro(i))$$

$$\Omega(l, i) := \text{atan} \left(\frac{ri - ro(i)}{l} \right)$$

$$\phi 1(z, l, i) := \text{acos} \left(\frac{ri \cdot \cos(\theta 1)}{r(z, l, i)} \right) - \Omega(l, i)$$

$$\phi 2(z, l, i) := \text{acos} \left(\frac{ri \cdot \cos(\theta 2)}{r(z, l, i)} \right) - \Omega(l, i)$$

$$\gamma(i, y, \theta, z) := \frac{\lambda \cdot n_c(y) \cdot \cos(\theta) \cdot \cot(\theta)}{2 \cdot \pi \cdot r(z, l, i) \cdot n^2 \cdot (\cos(\theta c(y)))^2 \cdot [(\sin(\theta))^2 - (\sin(\theta c(y)))^2]}$$

Obs: $\gamma = \gamma / \alpha$

$$\gamma_l(i, y) := \frac{\int_0^{.005} \int_{\phi_1(z, l, i)}^{\phi_2(z, l, i)} \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \gamma(i, y, \theta, z)}{(1 - n^2 \cdot \cos(\theta)^2)^2} d\theta dz}{\int_0^{.005} \int_{\phi_1(z, l, i)}^{\phi_2(z, l, i)} \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\theta)}{(1 - n^2 \cdot \cos(\theta)^2)^2} d\theta dz}$$

Obs: $\gamma_t = \gamma_{ef} / \alpha$
onde γ_{ef} é a atenuação efetiva

3. Este programa simula um sensor de absorção que é alimentado por uma fonte de luz difusa.

dados:

θ_1 - ângulo mínimo	r_i - raio inicial do núcleo (m)
θ_2 - ângulo máximo	r_o - raio final do núcleo (m)
m - raio do núcleo (m)	l - comprimento da primeira transição do estrangulamento
n_n - índice de refração do núcleo	
n_c - índice de refração da casca	
λ - comprimento de onda (m)	
θ_c - ângulo crítico (rad)	
α - coeficiente de absorção do material	

3.1. Cálculo da atenuação para uma fibra multimodo com diâmetro uniforme iluminada por fonte difusa.

$$\theta_1 := 82 \cdot \frac{\pi}{180} \quad m := 300 \cdot 10^{-6}$$

$$\theta_2 := \frac{\pi}{2} \quad \lambda := 664 \cdot 10^{-9} \quad y := 0, 1 \dots 10 \quad n_c(y) := 1.335 + \left(\frac{1.385 - 1.335}{10} \right) \cdot y$$

$$n_n := 1.457 \quad n_{cn}(y) := \frac{n_c(y)}{n_n}$$

$$\gamma(\theta) := \frac{\lambda \cdot n_c(y) \cdot (\cos(\theta))^2}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot [(n_n)^2 - (n_c(y))^2] \cdot \sin(\theta) \cdot [(\sin(\theta))^2 - (n_{cn}(y))^2]^{0.5}} \quad \text{Obs: } \gamma = \gamma / \alpha$$

$$\gamma_l(\theta) := \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \gamma(\theta) \, d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \, d\theta}$$

Obs: $\gamma_l = \gamma_{ef} / \alpha$
onde γ_{ef} é a atenuação efetiva

3.2. Cálculo da atenuação para uma fibra multimodo com diâmetro variante (estrangulamento).

$$\theta 1 := 82 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \theta 2 := \frac{\pi}{2} \quad i := 0..3$$

$$ro(i) := 150 \cdot 10^{-6} + \left(\frac{300 \cdot 10^{-6} - 150 \cdot 10^{-6}}{3} \right) \cdot i$$

$$ri := 300 \cdot 10^{-6} \quad \lambda := 664 \cdot 10^{-9}$$

$$nc(y) := 1.335 + \left(\frac{1.385 - 1.335}{10} \right) \cdot y$$

$$l := .05$$

$$ncn(y) := \frac{nc(y)}{nn}$$

$$r(z, l, i) := ri - \frac{z}{l} \cdot (ri - ro(i))$$

$$\Omega(l, i) := \text{atan} \left(\frac{ri - ro(i)}{l} \right)$$

$$\phi 1(z, l, i) := \text{acos} \left(\frac{ri \cdot \cos(\theta 1)}{r(z, l, i)} \right) - \Omega(l, i)$$

$$\phi 2(z, l, i) := \text{acos} \left(\frac{ri \cdot \cos(\theta 2)}{r(z, l, i)} \right) - \Omega(l, i)$$

$$\gamma(i, y, \theta, z) := \frac{\lambda \cdot nc(y) \cdot (\cos(\theta))^2}{2 \cdot \pi \cdot r(z, l, i) \cdot \left[(nn)^2 - (nc(y))^2 \right] \cdot \sin(\theta) \cdot \left[(\sin(\theta))^2 - (ncn(y))^2 \right]^{.5}}$$

Obs: $\gamma = \gamma / \alpha$

$$\gamma t(i, y) := \frac{\int_0^1 \int_{\phi 1(z, l, i)}^{\phi 2(z, l, i)} \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \gamma(i, y, \theta, z) \, d\theta \, dz}{\int_0^1 \int_{\phi 1(z, l, i)}^{\phi 2(z, l, i)} \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \, d\theta \, dz}$$

Obs: $\gamma t = \gamma_{ef} / \alpha$

onde γ_{ef} é a atenuação efetiva

3.3. Cálculo da atenuação para fibra monomodo com diâmetro uniforme iluminada por fonte difusa.

$$\theta_1 := \frac{\pi}{2} - .07693 \quad \theta_2 := \frac{\pi}{2}$$

$$m := 2 \cdot 10^{-6} \quad \lambda := 632 \cdot 10^{-9}$$

$$y := 0, 1 \dots 20 \quad nc(y) := 1.35 + \left(\frac{1.44 - 1.35}{20} \right) \cdot y$$

$$nn := 1.45931 \quad ncn(y) := \frac{nc(y)}{nn}$$

$$\gamma(\theta) := \frac{\lambda \cdot nc(y) \cdot (\cos(\theta))^2}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot [(nn)^2 - (nc(y))^2] \cdot \sin(\theta) \cdot [(\sin(\theta))^2 - (ncn(y))^2]^{.5}}$$

Obs: $\gamma = \gamma / \alpha$

$$\gamma_l(\theta) := \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \gamma(\theta) \, d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \, d\theta}$$

Obs: $\gamma_l = \gamma_{ef} / \alpha$
onde γ_{ef} é a atenuação efetiva

3.4. Cálculo da atenuação para uma fibra monomodo com diâmetro variante (estrangulamento) iluminada por fonte difusa.

$$\theta_1 := \frac{\pi}{2} - .07693 \quad \theta_2 := \frac{\pi}{2} \quad i := 0..5 \quad ro(i) := .16 \cdot 10^{-6} + \left(\frac{2 \cdot 10^{-6} - .16 \cdot 10^{-6}}{5} \right) \cdot i$$

$$ri := 2 \cdot 10^{-6} \quad \lambda := 632.8 \cdot 10^{-9} \quad nc(y) := 1.35 + \left(\frac{1.44 - 1.35}{20} \right) \cdot y$$

$$l := .005 \quad ncn(y) := \frac{nc(y)}{nn}$$

$$r(z, l, i) := ri - \frac{z}{l} \cdot (ri - ro(i)) \quad \Omega(l, i) := \text{atan} \left(\frac{ri - ro(i)}{l} \right)$$

$$\phi_1(z, l, i) := \text{acos} \left(\frac{ri \cdot \cos(\theta_1)}{r(z, l, i)} \right) - \Omega(l, i)$$

$$\phi_2(z, l, i) := \text{acos} \left(\frac{ri \cdot \cos(\theta_2)}{r(z, l, i)} \right) - \Omega(l, i)$$

$$\gamma(i, y, \theta, z) := \frac{\lambda \cdot nc(y) \cdot (\cos(\theta))^2}{2 \cdot \pi \cdot r(z, l, i) \cdot [(nn)^2 - (nc(y))^2] \cdot \sin(\theta) \cdot [(\sin(\theta))^2 - (ncn(y))^2]^{.5}}$$

Obs: $\gamma = \gamma/\alpha$

$$\gamma_t(i, y) := \frac{\int_0^{.005} \int_{\phi_1(z, l, i)}^{\phi_2(z, l, i)} \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \gamma(i, y, \theta, z) d\theta dz}{\int_0^{.005} \int_{\phi_1(z, l, i)}^{\phi_2(z, l, i)} \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) d\theta dz}$$

Obs: $\gamma_t = \gamma_{ef} / \alpha$
onde γ_{ef} é a atenuação efetiva