

Geovana Oliveira de Araujo

Sensor de Diâmetro de Fibra Óptica de Baixo Custo

Alegrete, RS

07 de Dezembro de 2018

Geovana Oliveira de Araujo

Sensor de Diâmetro de Fibra Óptica de Baixo Custo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações, Área de Concentração em Radiofrequência, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia de Telecomunicações**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa
Curso de Engenharia de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes
Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Bof de Oliveira

Alegrete, RS
07 de Dezembro de 2018

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

A663s Araujo, Geovana Oliveira de
Sensor de Diâmetro de Fibra Óptica de Baixo Custo / Geovana
Oliveira de Araujo.
67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES, 2018.
"Orientação: Jacson Weber de Menezes".

1. fibra óptica. 2. controle de diâmetro. 3. matlab. 4.
baixo custo. I. Título.

GEOVANA OLIVEIRA DE ARAUJO

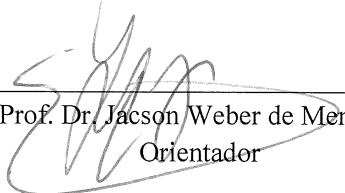
SENSOR DE DIÂMETRO DE FIBRA ÓPTICA DE BAIXO CUSTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.


Área de Concentração: Radiofrequência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 7 de Dezembro de 2018.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes
Orientador



Prof. Me. Eliezer Soares Flores
UNIPAMPA



Prof. Dr. Luis Enrique Gomez Armas
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço a família maravilhosa que tenho, em especial, minha mãe Eliane e meu irmão Guilherme. Gostaria de agradecer por todo apoio que me deram incondicionalmente durante toda a minha vida e durante todos esses anos de graduação. Nada disso seria possível se não fosse por vocês.

Agradeço ao meu namorado Maurício pelas palavras de carinho e apoio. Obrigada por me aguentar nos dias de tensão e nervosismo.

Agradeço meu orientador Prof. Jacson Weber de Menezes pela oportunidade em poder realizar este trabalho. Muito obrigada pela sua orientação, conhecimento transmitido e compreensão não só durante este trabalho, mas durante todos estes anos sendo sua aluna.

Também agradeço ao meu co-orientador Prof. Alessandro Bof de Oliveira. Obrigada por aceitar me ajudar durante a execução deste trabalho. Foi um prazer conhecê-lo no finalzinho da minha jornada na Unipampa.

Agradeço a oportunidade de conhecer e construir grandes amizades em Alegrete. Foram muitas pessoas que em algum momento me fizeram muito feliz, mas em especial gostaria de agradecer a Susy, Darielle e Alana por terem dividido o mesmo teto que o meu. Aos membros do grupo PET-CTC, o qual fiz parte por quase 4 anos. Aos meus amigos do curso de Engenharia de Telecomunicações, em especial ao Juner e Wellington, que estiveram por perto em diversos momentos desse período.

Meu muito obrigada à todas as pessoas, que de uma forma ou outra, perto ou longe, sempre me apoiaram, torceram e me ajudaram durante o período de graduação.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”
(Simone de Beauvoir)

RESUMO

A fibra óptica apresenta características que favorecem a propagação de sinais eletromagnéticos de um ponto a outro, quando comparada a outros guias de onda. Além disso, pode ser empregada para comunicações de pequena, média e grandes distâncias. Para cada tipo de situação, diferentes tipos de fibras podem ser utilizadas. Em termos de fabricação, o controle do diâmetro absoluto da fibra nas suas duas etapas de fabricação (obtenção da pré-forma e puxamento) é de suma importância para garantir os padrões e a capacidade de transmissão em um sistema de comunicações ópticas. Para esse controle, os métodos ópticos estão entre os mais utilizados, entre os quais destaca-se o método por difração. Esse processo consiste na identificação dos mínimos ou máximos do padrão de difração quando luz interage transversalmente com a fibra. Neste sentido, parâmetros geométricos tais como a distância entre a fibra e o anteparo de observação (detector), a quantidade de máximos/mínimos de luz e o comprimento de onda da fonte de luz laser, devem ser otimizados a fim de aumentar a sensibilidade às mudanças do diâmetro da fibra fabricada. Alguns métodos usuais na etapa do puxamento para a captação e registro do padrão utilizam uma matriz de fotodiodos ou CCD (charge-coupled device). Além disso, o processamento dos dados é realizado através de blocos de circuitos eletrônicos ou então através de um algoritmo para o cálculo da FFT (Fast Fourier Transform), que inserem custos e capacidade de processamento aos métodos. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo para a otimização dos parâmetros geométricos supracitados, utilizando padrões de difração e processamento de imagens. Os padrões de difração foram coletados para o caso de uma fibra estacionária utilizando uma câmera digital e o processamento de imagens foi realizado em MATLAB, de forma a verificar a sensibilidade desse sistema de baixo custo.

Palavras-chave: Fibra Óptica. Controle de Diâmetro. Matlab. Baixo Custo.

ABSTRACT

The optical fiber has characteristics that favor the propagation of electromagnetic signals from one point to another, when compared to other waveguides. In addition, it can be used for small, medium and long distance communications. For each type of situation, different types of fibers may be used. In terms of manufacturing, control of the absolute diameter of the fiber in its two manufacturing steps (obtaining preform and pulling) is of paramount importance to ensure the standards and the transmission capacity in an optical communications system. For this control, the optical methods are among the most used, among which the diffraction method stands out. This process consists in identifying the minimum or maximum diffraction pattern when light interacts transversely with the fiber. In this sense, geometric parameters such as the distance between the fiber and the observation screen (detector), the amount of light maxima / minima and the wavelength of the laser light source, must be optimized in order to increase sensitivity to fiber diameter changes. Some usual methods in the pull step for the recording and recording of the pattern use a matrix of photodiodes or CCD (charge-coupled device). In addition, the data processing is performed through electronic circuit blocks or through an algorithm for the calculation of FFT (Fast Fourier Transform), which insert costs and processing capacity to the methods. In this context, this work presents a study for the optimization of the aforementioned geometric parameters, using diffraction patterns and image processing. The diffraction patterns were collected for the case of a stationary fiber using a digital camera and the image processing was performed in MATLAB, in order to verify the sensitivity of this low cost system.

Key-words: Optical fiber. Control diameter. MATLAB. Low-cost.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Estrutura de um fibra óptica tradicional. | 21 |
| Figura 2 – Feixe de luz incidente em uma interface entre dois materiais com índices de refração distintos onde $n_1 > n_2$ | 22 |
| Figura 3 – Processo de fabricação MCVD da pré-forma | 23 |
| Figura 4 – Processo de fabricação VAD da pré-forma. | 24 |
| Figura 5 – Diagrama de controle do processo VAD. | 26 |
| Figura 6 – Diagrama do sistema óptico de medição de diâmetro da fibra óptica. | 28 |
| Figura 7 – Diagrama do sistema eletrônico de medição de diâmetro de fibra. | 29 |
| Figura 8 – Representação esquemática do controlador MRC. | 31 |
| Figura 9 – Representação esquemática do controlador QNC. | 31 |
| Figura 10 – Propagação de uma plana no vácuo, de acordo com o princípio de Huygens. | 33 |
| Figura 11 – Caminhos de raios de luz que encontram uma fenda. | 33 |
| Figura 12 – Convenção dos eixos para representação de imagens digitais. | 35 |
| Figura 13 – Arranjo geométrico de difração em uma franja. | 37 |
| Figura 14 – Gráfico teórico $\Delta Y \times D$ | 39 |
| Figura 15 – Gráfico teórico $\Delta Y \times \lambda$ | 39 |
| Figura 16 – Gráfico teórico $\Delta Y \times m$ | 40 |
| Figura 17 – Gráfico teórico $\Delta Y \times a$ | 40 |
| Figura 18 – Suporte para fibra. | 42 |
| Figura 19 – Disposição da fibra e do laser. | 42 |
| Figura 20 – Imagem da fibra com a capa protetora com diâmetro real de $243,5\mu\text{m}$ | 43 |
| Figura 21 – Imagem da fibra desbastada diâmetro real de $127,4\mu\text{m}$ | 44 |
| Figura 22 – Gráfico teórico e experimental $\Delta Y \times D$ - diâmetro nominal de $125\mu\text{m}$ | 45 |
| Figura 23 – Imagem original - fibra + capa. | 46 |
| Figura 24 – Imagem em níveis de cinza - fibra + capa. | 47 |
| Figura 25 – Imagem binária (limiarizada) - fibra + capa. | 47 |
| Figura 26 – Contornos detectados pelo filtro de Sobel - fibra + capa. | 48 |
| Figura 27 – Imagem dos centroides da imagem - fibra + capa. | 48 |
| Figura 28 – Imagem dos centroides identificados e enumerados - fibra + capa. | 49 |
| Figura 29 – Imagem original - somente fibra. | 50 |
| Figura 30 – Imagem em níveis de cinza - somente fibra. | 51 |
| Figura 31 – Imagem binária (limiarizada) - somente fibra. | 51 |
| Figura 32 – Contornos detectados pelo filtro de Sobel - somente fibra. | 52 |
| Figura 33 – Imagem com níveis de cinza acima de 220 com fechamento morfológico - somente fibra. | 52 |
| Figura 34 – Imagem dos centroides da imagem - somente fibra. | 52 |

Figura 35 – Imagem dos centroides identificados e enumerados - somente fibra. . . . 53

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Prós e contras dos métodos de controle da pré-forma | 27 |
| Tabela 2 – Prós e contras dos métodos de controle de variações do diâmetro | 32 |
| Tabela 3 – Localização do máximo central e secundários de luz - fibra + capa. . . | 49 |
| Tabela 4 – Distância entre Δm em pixels - Fibra + Capa. | 49 |
| Tabela 5 – Localização do máximo central e secundários de luz - somente fibra. . . | 53 |
| Tabela 6 – Distância entre Δm em pixels - fibra | 53 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 | Objetivos | 20 |
| 1.2 | Estrutura do documento | 20 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 2.1 | Conceitos básicos sobre a fibra óptica | 21 |
| 2.2 | Fabricação de fibra óptica | 23 |
| 2.2.1 | Obtenção da pré-forma no processo MCVD | 23 |
| 2.2.2 | Obtenção da pré-forma no processo OVD | 24 |
| 2.2.3 | Obtenção da pré-forma no processo VAD | 24 |
| 2.2.4 | Puxamento | 25 |
| 2.3 | Técnicas para controle do diâmetro da pré-forma | 26 |
| 2.3.1 | Controle do diâmetro da pré-forma no processo VAD | 26 |
| 2.3.2 | Controle do diâmetro da pré-forma no processo MCVD | 27 |
| 2.4 | Controle do diâmetro absoluto | 27 |
| 2.4.1 | Medição do diâmetro da fibra óptica usando a transformada rápida de fourier | 27 |
| 2.5 | Controle de variações de diâmetro | 28 |
| 2.5.1 | Sistema de medição de variação de diâmetro através de uso de lentes e fotodiodos | 28 |
| 2.5.2 | Controle não linear de variações de diâmetro de fibra óptica | 30 |
| 2.6 | Fundamentação teórica de difração | 32 |
| 2.6.1 | Difração por uma fenda: determinação da posição dos mínimos | 32 |
| 2.7 | Aspectos gerais sobre processamento de imagens | 34 |
| 2.7.1 | Representação de imagens digitais | 34 |
| 2.7.2 | Conceitos de processamento de imagens | 35 |
| 2.7.3 | Conceito de morfologia matemática | 36 |
| 2.7.4 | MATLAB | 36 |
| 3 | ANÁLISE DA EQUAÇÃO BÁSICA DE DIFRAÇÃO | 37 |
| 4 | METODOLOGIA | 41 |
| 5 | DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 43 |
| 5.1 | Análise do desenvolvimento prático | 43 |
| 5.2 | Processamento de imagens | 45 |
| 5.2.1 | Fibra com capa protetora - diâmetro nominal de $250\mu\text{m}$ | 46 |
| 5.2.2 | Fibra sem capa protetora - diâmetro nominal de $125\mu\text{m}$ | 50 |
| 5.3 | Análise dos resultados | 54 |
| 5.3.1 | Cálculo da sensibilidade do método | 54 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.4 | Comparação da variação dos métodos - pré-forma e puxamento | 54 |
| 6 | CONCLUSÃO | 57 |
| | Referências | 59 |
| | Apêndices | 61 |
| | APÊNDICE A Rotinas Executadas no MATLAB | 63 |

1 INTRODUÇÃO

Em um dos artigos publicados por Charles Kao, considerado o pai das comunicações ópticas, intitulado de “*Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies*” (KAO; HOCKHAM, 1986), umas das ponderações explícitas nesse documento é sobre umas das etapas do processo de fabricação de fibra óptica, o puxamento. Em meados da década de 60, a simetria da fibra óptica fabricada era garantida somente pela alta tensão superficial envolvida na tração do vidro fundido no processo de puxamento.

Desde então, inúmeros avanços ocorreram e novas técnicas foram implementadas para a fabricação da fibra óptica, desde métodos para fabricação de fibras que possuam variações do índice de refração do material do núcleo até em relação a quantidade de modos que podem se propagar em uma única fibra.

Outro fator que evoluiu foi o controle do diâmetro da fibra, que foi cada vez ficando mais preciso e robusto. Atualmente, há monitoramento na etapa de obtenção da pré-forma do diâmetro absoluto e de variações ao longo da fibra durante a etapa de puxamento.

Em (ABUSHAGUR; GEORGE, 1980), é apresentado um sistema de sensoriamento do diâmetro absoluto da fibra. Nele, o padrão de difração, quando a fibra é iluminada, é detectado em uma matriz de fotodiodos e as informações são processadas através de uma transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*).

Já em (FEJER; BYER, 1985), é apresentado um sistema de controle de variações de diâmetro ao longo da fibra. Nesse método de controle, o padrão de espalhamento formado quando a fibra é iluminada, em um ângulo θ , institui a posição do centro de uma única ordem de difração. Nesse método, o padrão formado é focalizado em uma matriz de fotodiodos através de uma lente e esses dados captados são analisados por um bloco de circuito eletrônico.

Em ambos os casos, o método de difração foi utilizado. Porém, o processamento das informações são distintos e necessitam de ferramentas computacionais ou circuitos eletrônicos robustos, e conseqüentemente, agregam mais custo a esses sistemas de controle.

Baseando-se nessas considerações, este documento apresenta um estudo sobre os parâmetros geométricos do padrão de difração formados devido a interação transversal da luz emitida por um laser com uma fibra estacionária. Os padrões de difração formados foram captados por uma câmera digital. Além disso, o método de processamento dos dados realizado através do *software* MATLAB, através de seu pacote para processamento de imagens.

1.1 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Otimizar e estudar o comportamento dos parâmetros do padrão de difração tais como: a distância entre a fibra e o anteparo de observação (detector); a quantidade de máximos/mínimos de luz e; o comprimento de onda da fonte de luz laser. A partir disso encontrar o cenário ideal para o controle de diâmetro na fabricação de fibras ópticas;
- Verificar a sensibilidade de um sistema proposto que utiliza uma câmera digital para captar os padrões formados por uma fibra estática em um anteparo;
- Verificar a sensibilidade do processamento das imagens obtidas nos ensaios através do *software* MATLAB;
- Comparar os resultados com técnicas utilizadas comercialmente.

1.2 Estrutura do documento

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre métodos utilizados para controle do diâmetro absoluto e variações na fibra em ambas as etapas de fabricação. Além de ser exposta uma revisão sobre a fibra óptica e seus métodos de fabricação, são discutidas também a teoria básica de difração e os princípios básicos sobre processamento de imagens. No terceiro capítulo, é apresentada uma análise teórica da influência dos parâmetros geométricos para uma boa sensibilidade, utilizando a teoria escalar da difração. No quarto capítulo, é explicada a metodologia experimental utilizada neste trabalho. No quinto capítulo, são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento experimental e no processamento de imagens realizados. Finalmente, no último capítulo, são expostas as conclusões obtidas neste trabalho, bem como propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o desenvolvimento das diversas técnicas de controle do diâmetro da fibra óptica em ambas etapas (pré-forma e puxamento) e os aspectos gerais sobre processamento de imagens. Além disso, apresenta os conceitos teóricos nos quais estão embasados este trabalho.

2.1 Conceitos básicos sobre a fibra óptica

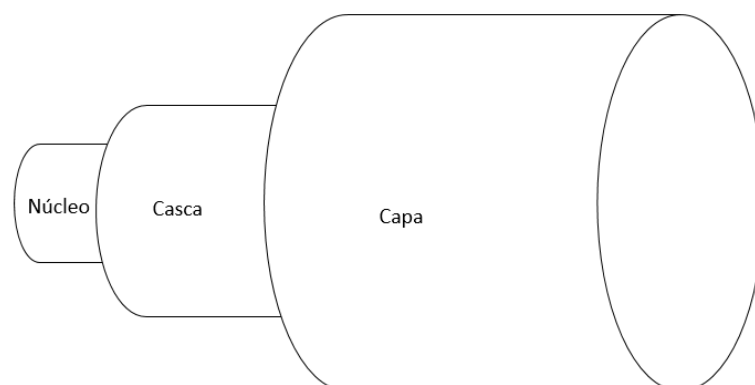
No espaço livre a luz propaga-se com uma velocidade de $c = 3 \times 10^8$ m/s. Em um meio diferente desse há uma redução da sua velocidade que é ditada pelo tipo de material contido no meio. O parâmetro que relaciona a velocidade de propagação da luz no espaço livre (c) e em um material (v) é chamado de índice de refração (n).

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)} \quad (2.1)$$

Onde n é o índice de refração do material que é dependente do comprimento de onda λ (KEISER, 2014).

A fibra óptica tradicional é um guia de ondas dielétrico que apresenta normalmente um formato cilíndrico. A estrutura básica é composta por um núcleo e uma casca, com índices de refração n_1 e n_2 , respectivamente.

Figura 1 – Estrutura de um fibra óptica tradicional.



Fonte: Adaptado de (KEISER, 2014).

Para que os modos guiados sejam confinados no interior do núcleo da fibra, o índice de refração da casca deve ser menor que o índice de refração do núcleo. A refração do

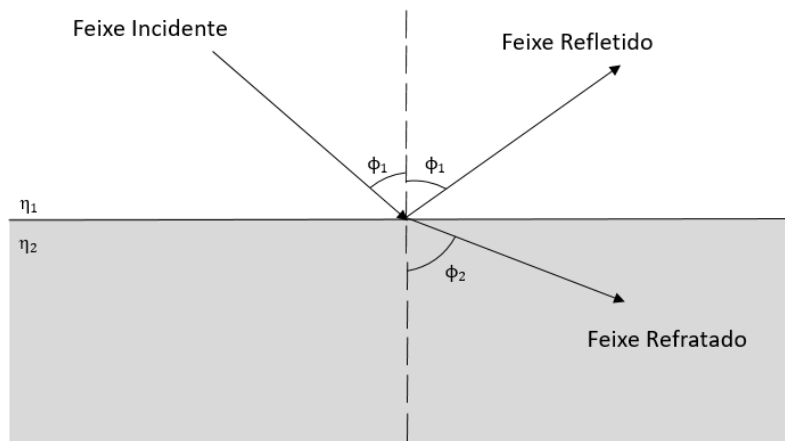
raio de luz é resultado da diferença de velocidade da luz nos dois materiais. Essa relação é conhecida como lei de Snell, mostrada na Eq.2.2

$$n_1 \text{sen} \phi_1 = n_2 \text{sen} \phi_2, \quad (2.2)$$

Sendo que ϕ_1 e ϕ_2 são os ângulos incidente e refratado, medidos em relação a normal à superfície de separação entre os dois meios (KEISER, 2014).

De acordo com a lei de reflexão o ângulo do raio incidente normal à superfície é igual ao ângulo do raio refletido na mesma interface, conforme exemplificado na Figura 2.

Figura 2 – Feixe de luz incidente em uma interface entre dois materiais com índices de refração distintos onde $n_1 > n_2$.



Fonte: Adaptado de (KEISER, 2014).

A condição da reflexão interna total é satisfeita quando o ângulo de incidência é maior que o ângulo crítico, de acordo com a Eq.2.3:

$$\text{sen} \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

A luz confinada em uma fibra óptica propaga-se como uma composição de várias ondas eletromagnéticas, denominada de modos de propagação. Quando somente um modo é permitido, chama-se tal fibra de fibra monomodo. Quando mais de um modo é permitido dá-se o nome de fibra multimodo. Nesse caso, o diâmetro do núcleo que dita a diferença entre esses dois tipos (KEISER, 2014).

As fibras ópticas podem ser fabricadas com variações no índice de refração e diâmetro do núcleo. Uma fibra com o núcleo uniforme é chamada de fibra de índice degrau. Com as variações nas dopagens do núcleo da fibra é alterado o índice de refração do material em função da distância e essa fibra é conhecida como fibra de índice gradual. Essas duas fibras podem ter variantes em relação a quantidade de modos de propagação.

2.2 Fabricação de fibra óptica

De uma maneira geral, a fabricação de uma fibra óptica consiste em duas etapas (RIBEIRO, 2011)

- Obtenção da pré-forma;
- Puxamento.

Para a fabricação de fibras com boa qualidade, na etapa de obtenção da pré-forma, utilizam-se as seguintes técnicas de deposição por vapor químico.

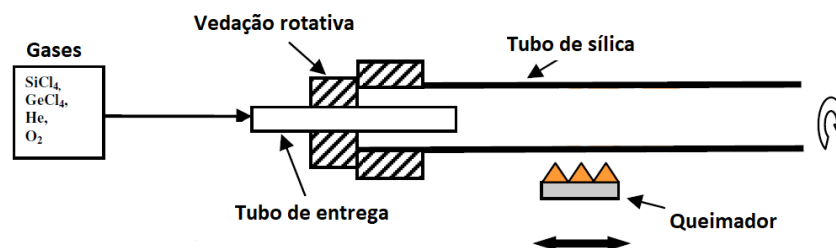
- *Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD)*;
- *Outside Vapor Deposition (OVD)*;
- *Vapor-phase Axial Deposition (VAD)*;

A seguir será feita uma rápida descrição destes processos.

2.2.1 Obtenção da pré-forma no processo MCVD

O processo MCVD inicia-se com um tubo de substrato de sílica pura, que gira lentamente em torno do seu próprio eixo, o qual é aquecido por um queimador de oxigênio-hidrogênio. Então, é estabelecido o processo que deposita, no interior da sílica pura, uma sequência de gases, tais como $SiCl_4$, $GeCl_4$, BCl_3 e O_2 . Esse processo é mostrado na Fig.3

Figura 3 – Processo de fabricação MCVD da pré-forma



Fonte: Adaptado de (SAHA; SEN, 2012).

É nesse processo que pode-se fabricar fibras com índice de refração gradual, pois cada camada pode ter um índice de refração diferente, devido a proporção de cada dopante depositado (NACCACHE, 1989).

Quando a deposição é concluída, a temperatura do queimador é aumentada para colapsar o tubo em uma pré-forma sólida (WATKINS, 1981).

Neste processo, a sílica dopada forma o núcleo da fibra, enquanto o tubo de sílica pura fará o papel de casca da fibra.

2.2.2 Obtenção da pré-forma no processo OVD

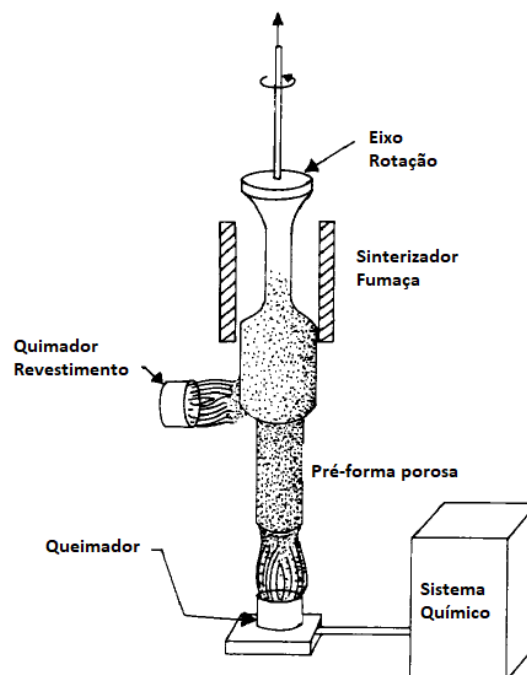
Nesse processo partículas são geradas através do aquecimento de gases como $SiCl_4$, $GeCl_4$ e O_2 através do queimador de oxigênio-hidrogênio. Então, essa nuvem química produzida é depositada sobre uma barra refratária em rotação e não no interior de um tubo de sílica. As partículas são depositadas nessa barra, formando sucessivas camadas de material, de forma a gerar uma pré-forma porosa (BLANKENSHIP; DENEKA, 1982).

Em seguida, essa pré-forma é aquecida (1700 a 2000 K) a fim de dilatar os materiais e assim retirar a barra refratária. O espaço vazio deixado pela barra e a porosidade é preenchido com o material depositado, formando assim uma pré-forma homogênea que fica pronta para o processo de puxamento (NACCACHE, 1989).

2.2.3 Obtenção da pré-forma no processo VAD

Nesse processo gases como $SiCl_4$, $GeCl_4$ e O_2 são levadas para o fundo da chama do queimador de oxigênio-hidrogênio. Os óxidos sintetizados produzem partículas de vidro que são depositadas axialmente sobre uma haste em rotação que é constantemente puxada para cima, a fim de manter a deposição de monocristais na forma cilíndrica, formando assim uma pré-forma porosa (SEKIYA, 2001). Esse processo é mostrado na Fig.4

Figura 4 – Processo de fabricação VAD da pré-forma.



A pré-forma final é então puxada para uma fibra da maneira usual. Este processo é preferido para a produção em massa, pois permite a fabricação de pré-formas de grande dimensões.

2.2.4 Puxamento

Após a obtenção da pré-forma cilíndrica resultante da primeira etapa, esse material é fixado a um alimentador que o introduz num forno, com uma velocidade constante e apropriada. A extremidade da pré-forma é amolecida até o ponto em que possa ser puxada formando um filamento muito fino, que se torna a fibra óptica.

A velocidade de entrada no forno da pré-forma e a velocidade de puxamento da fibra são o que irão determinar o diâmetro final da fibra e estão relacionados pela Eq.2.4 (NACCACHE, 1989).

$$d_f = \sqrt{\frac{v_p d_p^2}{v_f}} \quad (2.4)$$

Onde:

- d_f diâmetro da fibra;
- d_p diâmetro da pré-forma;
- v_p velocidade de entrada da pré-forma;
- v_f velocidade do puxamento da fibra.

Além das taxas de velocidade, os efeitos de distúrbios externos devido a taxas de alimentação pré-formadas instáveis, flutuações de temperatura no forno e vibrações do enrolador são considerados tão importantes quanto o efeito das variações da velocidade do enrolador, pois essas perturbações podem gerar variações de diâmetro ao longo do processo (MYERS, 1989).

Outro fator que deve ser levado em conta é que grandes velocidades de puxamento induzem uma instabilidade hidrodinâmica chamada de ressonância de tração no fluxo da fibra. Essa instabilidade causa variações periódicas no diâmetro da fibra, ao longo de seu comprimento, que degradam o desempenho do produto e podem até mesmo causar a quebra da fibra (SCHULT ABDELFATTAH ZEBIB; LEE, 1989).

Na maioria das instalações comerciais, a velocidade do enrolador é regulada de tal modo que o início da ressonância de tração é evitado. Isto é realizado operando em velocidades baixas do enrolador para assegurar que o processo esteja operando numa região linearmente estável. (MULPUR; THOMPSON, 1996)

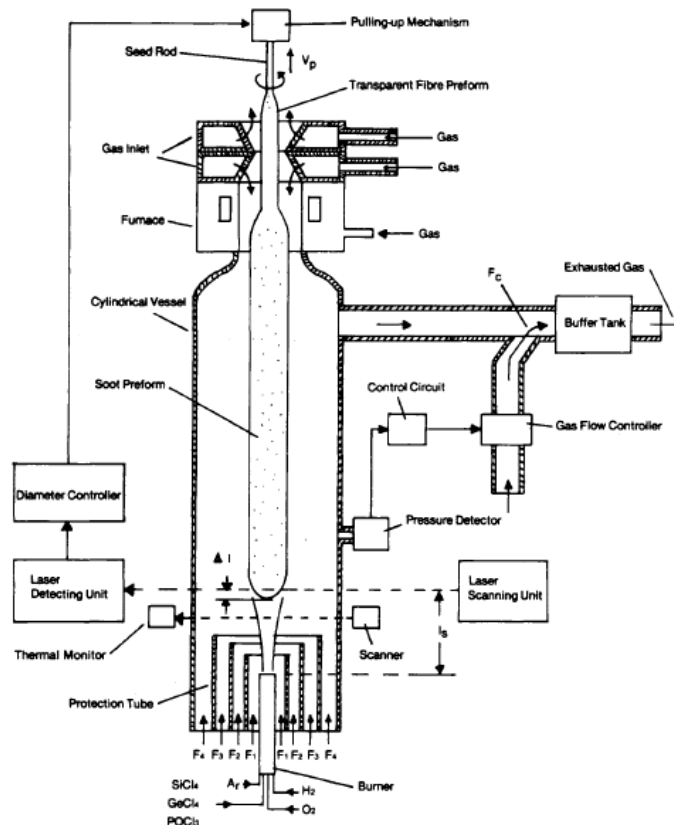
2.3 Técnicas para controle do diâmetro da pré-forma

Existem mecanismos de medição e controle da pré-forma para garantir a homogeneidade do diâmetro. Essa medida também é utilizada para ajustar a velocidade de entrada da pré-forma no puxamento.

2.3.1 Controle do diâmetro da pré-forma no processo VAD

A técnica de medição consiste na varredura da pré-forma através de um feixe de laser a uma velocidade conhecida através da pré-forma. Um detector do outro lado detecta o feixe transmitido. A pré-forma porosa é essencialmente opaca e, assim, o tempo que o feixe é bloqueado fornece um sinal de alto contraste para medir o diâmetro da pré-forma (WATKINS, 1981). A Figura 5 mostra o arranjo para medir o diâmetro da pré-forma.

Figura 5 – Diagrama de controle do processo VAD.



Fonte: Adaptado de (WATKINS, 1981).

Observando a figura, é possível localizar o sistema de medição (laser e detector). O sistema fica a uma distância Δl acima da região de deposição das partículas. Essa distância é empírica, mas ainda assim, os dispositivos de medição do diâmetro ficam próximos ao queimador, tornando esse ambiente hostil devido a proximidade dos equipamentos do sistema de medição ao queimador, que possui alta temperatura.

A variação do diâmetro da fibra utilizando essa técnica é de 0,04% a 0,1%.

2.3.2 Controle do diâmetro da pré-forma no processo MCVD

Essa técnica consiste na incidência de um feixe colimado de um laser He-Ne no tubo de sílica perpendicularmente ao seu eixo e desloca-se lateralmente, de modo que os reflexos das superfícies interna e externa são obtidos a aproximadamente 45° da direção de incidência.

Como resultado, obtém-se dois feixes refletidos: da parede interna e externa do tubo, respectivamente. Esses feixes são coletados por uma lente e são convergidos para um foco no plano da imagem.

A imagem dos feixes refletidos ficam dispostos a uma certa distância, que é uma função da espessura da parede do núcleo da fibra. Posteriormente, esses feixes são detectados por um arranjo de diodos e analisados eletronicamente para obter a espessura (WATKINS, 1981).

Esse esquema de monitoramento é montado próximo ao torno que gira o tubo de sílica, e conseqüentemente fica próximo ao queimador de hidrogênio-oxigênio, tornando o ambiente hostil. Com isso, o processamento eletrônico dos feixes deve rejeitar todo nível de ruído presente no ambiente de medição. Ainda assim, o sistema possui uma variação de diâmetro de 2 μ m a 5 μ m.

Na Tabela 1 os dois métodos de controle do diâmetro da pré-forma apresentados anteriormente são comparados através de seus prós e contras.

Tabela 1 – Prós e contras dos métodos de controle da pré-forma

| <i>Método</i> | <i>Variação de Diâmetro</i> | <i>Vantagem</i> | <i>Desvantagem</i> |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Controle VAD | 0,04% a 0,1% | Sistema de controle simples | Ambiente Hostil |
| Controle MCDV | 0,03% a 0,06% | Para pré-formas não porosas | Ambiente Hostil; Processamento robusto; Maior custo |

Fonte: Autoria própria.

2.4 Controle do diâmetro absoluto

2.4.1 Medição do diâmetro da fibra óptica usando a transformada rápida de fourier

Inicialmente, nesse processo de medição, um ângulo de sensoriamento remoto é estabelecido e a fibra óptica é iluminada com uma onda plana monocromática, fazendo com que a energia seja espalhada por toda a fibra. Assim, a intensidade de espalhamento que exhibe o padrão de franja é detectada em uma matriz de fotodiodos de 1024 elementos.

As informações são processadas através de uma transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*) que analisa eficientemente o diâmetro da fibra e minimiza o efeito do ruído aleatório da matriz de diodos através de um filtro passa-banda.

Como a intensidade detectada está em campo distante, o campo disperso é aproximadamente a transformada de Fourier do campo na fibra. Assim, com o uso da FFT normalizada pode-se analisar e medir a distância entre os pontos da frequência fundamental da intensidade do espalhamento. Com o ângulo de incidência do laser conhecido, é possível determinar o diâmetro da fibra.

Através desse método é possível calcular o diâmetro da fibra em um tempo de 23ms com uma sensibilidade de medição de 0,6%, porém, é possível com sistemas independentes e dedicados a essa finalidade obter uma FFT em ordens de tempo de 5ms (ABUSHAGUR; GEORGE, 1980).

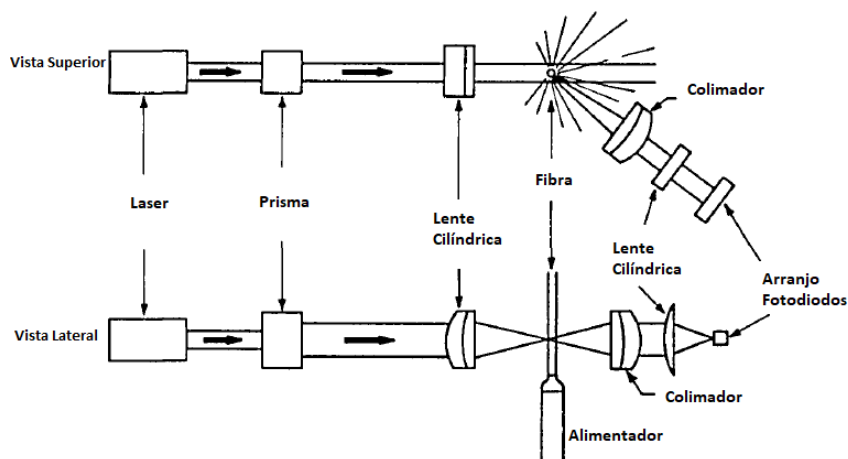
2.5 Controle de variações de diâmetro

Alguns sistemas foram desenvolvidos especialmente para a medição e controle de variação de diâmetro ao longo da fibra. Alguns desses processos encontrados na literatura serão descritos a seguir.

2.5.1 Sistema de medição de variação de diâmetro através de uso de lentes e fotodiodos

No esquema mostrado na Figura 6, uma onda plana de determinado comprimento de onda ilumina a fibra. O arranjo para iluminar a fibra consiste em um prisma para expandir o feixe do laser e uma lente cilíndrica para fornecer o foco transversal necessário.

Figura 6 – Diagrama do sistema óptico de medição de diâmetro da fibra óptica.



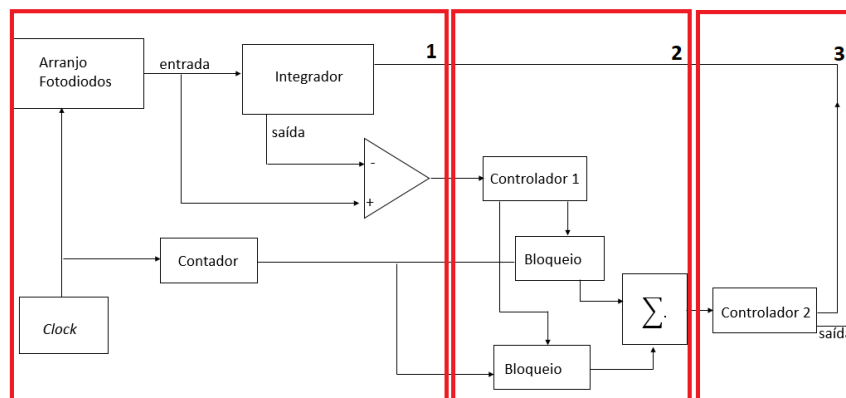
Fonte: Adaptado de (FEJER; BYER, 1985).

O padrão de espalhamento formado, em um ângulo θ , institui com precisão a posição do centro de uma única ordem de difração. Nesse método não é necessário obter-se um grande número de ordens.

Posteriormente esse padrão é focalizado em uma matriz de fotodiodos através de uma lente e esses dados captados são analisados por um bloco de circuito eletrônico. A resolução desse sistema é dado através da mudança de ângulo.

Os blocos de controle eletrônico, ilustrados na Figura 7, funcionam da seguinte maneira:

Figura 7 – Diagrama do sistema eletrônico de medição de diâmetro de fibra.



Fonte: Adaptado de (FEJER; BYER, 1985).

Bloco 1: Comparador

- Rastreia o padrão de difração fornecido pela matriz de diodos;
- Realiza uma comparação entre a ordem mais próxima do centro do conjunto de diodos e um sinal padrão (janela de comparação);
- A saída do comparador é o valor médio desses dois sinais.

Assim, a saída do comparador, portanto, muda de estado nas porções de mudança acentuada do sinal de franja.

Bloco 2: Controle

- Bloqueia a saída do contador nos limites de subida e descida da saída que ocorrem durante o intervalo da janela de comparação;
- Realiza uma soma da saída de bloqueio e de entrada, que representam duas vezes o valor do centro da franja.

Bloco 3: Controle

- Realiza uma comparação com o valor do centro da franja e a soma realizada pelo bloco de controle 2. Se a diferença for muito grande, presume-se que houve um erro na medição óptico ou eletrônico e a saída não é atualizada;
- Caso o novo ponto for válido a medição da posição da franja atual é transferida para a saída e a posição da janela é alterada pelo mesmo incremento.

O ciclo de controle repete a cada varredura da matriz de diodos, isto é, aproximadamente uma vez por milissegundo, assim a cada 10ms é possível percorrer uma janela de medição de alguns milímetros. A precisão típica desse método é de 0,02%.

É possível utilizar esse sistema para obter, adicionalmente, informações de diâmetro absoluto, sendo necessário um outro bloco para processamento de sinal adicional. Nesse caso, a precisão da medição do diâmetro seria determinada pela precisão da técnica de medição absoluta, enquanto a velocidade e resolução seriam determinado pelo sistema de rastreamento de franja. (FEJER; BYER, 1985)

2.5.2 Controle não linear de variações de diâmetro de fibra óptica

Neste processo de controle, algoritmos baseados em *MRC* (*model reference control*) e *QNC* (*quasi-nonlinear control*) são desenvolvidos. O foco do desenvolvimento do algoritmo de controle está na formulação de procedimentos de controle. Modelos matemáticos simples, porém precisos são desenvolvidos a fim de manter o processo o mais fiel possível.

As variáveis obrigatórias dos algoritmos são:

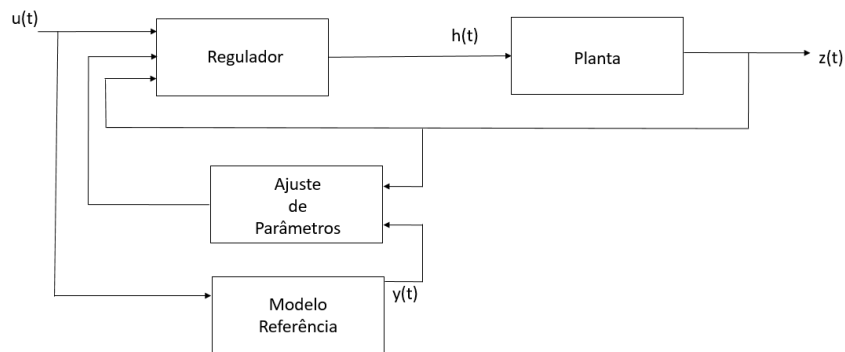
- As coordenadas radial e axial ao longo da pré-forma;
- A velocidade média da partícula axial sobre a seção transversal;
- O início da borda da pré-forma e do enrolador;
- Raio e área da seção transversal da pré-forma.

O método do controlador MRC é mostrado na Fig.8

O controlador é composto por um regulador, um mecanismo de ajuste de parâmetros e o modelo de referência do algoritmo. A saída do controlador $h(t)$ é a entrada da planta manipulada. A saída da planta $z(t)$ é realimentada ao regulador e ao mecanismo de ajuste de parâmetros. O modelo de referência de entrada $u(t)$ deve ser determinado resolvendo o problema de controle ótimo apropriado sujeito à minimização de um índice de desempenho de modelo. (MULPUR; THOMPSON, 1996)

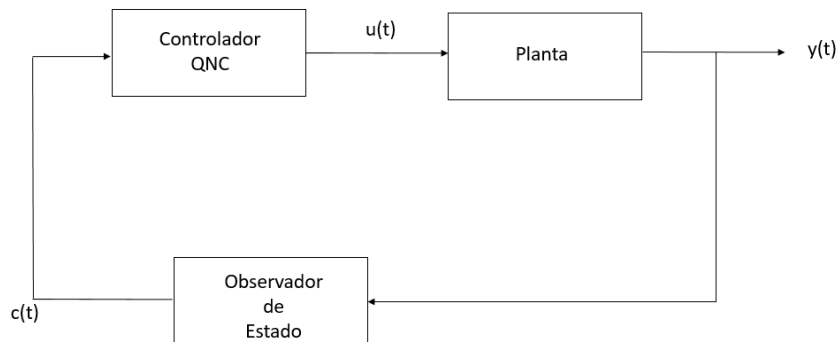
Uma representação esquemática do QNC é mostrada na Fig.9

Figura 8 – Representação esquemática do controlador MRC.



Fonte: Adaptado de (MULPUR; THOMPSON, 1996).

Figura 9 – Representação esquemática do controlador QNC.



Fonte: Adaptado de (MULPUR; THOMPSON, 1996).

O controlador utiliza o vetor de estimativa de estado $c(t)$ fornecido pelo observador de estado para calcular o controle ótimo $u(t)$. Na formulação QNC, o conjunto completo de equações não-lineares é substituído por sua aproximação linear em cada etapa de tempo.

O método QNC permite examinar a estabilidade do sistema na presença de dinâmica não modelada e perturbações externas, pois ao invés de utilizar métodos analíticos no algoritmo, esse método utiliza experimentos numéricos. Esse grau de robustez do esquema pode incluir efeitos como incertezas do modelo devido a mudanças nos parâmetros do sistema, imperfeições no modelo, ou outros fatores como envelhecimento da planta de fabricação e perturbações externas resultantes de ruído imprevisível de pequena amplitude como vibrações do enrolador (MULPUR; THOMPSON, 1996).

O modelo de controle QNC é computacionalmente mais simples e mais barato quando comparado ao modelo MRC. Porém, quanto maior a seção transversal da fibra analisada, maior o erro de medição, podendo chegar até 20% em relação aos dados de referência do algoritmo.

A Tabela 2 compara os métodos de controle de variações de diâmetro da fibra

apresentados anteriormente.

Tabela 2 – Prós e contras dos métodos de controle de variações do diâmetro

| <i>Método</i> | <i>Variação de Diâmetro</i> | <i>Vantagem</i> | <i>Desvantagem</i> |
|------------------|-----------------------------|--|--|
| Fotodiodo+Lentes | 0,02% | Expansível para medição de diâmetro absoluto | Processamento eletrônico robusto e com maior custo |
| MRC | 0,06% | Boa precisão | Computacionalmente robusto, ou seja, maior custo |
| QNC | 0,26% | Computacionalmente simples, ou seja, menor custo | Grande erro de medição |

Fonte: Autoria própria.

2.6 Fundamentação teórica de difração

Quando luz monocromática encontra uma fenda estreita que possui uma abertura da mesma ordem de grandeza ou maior que o comprimento de onda, a parte da onda que passa pela abertura é alargada (difrata) na região que fica do outro lado do obstáculo. Este alargamento ocorre de acordo com o princípio de Huygens. (HALLIDAY; RESNICK, 2009)

O princípio de Huygens diz que “A frente de onda pode ser pensada como infinitas fontes pontuais secundárias. A soma de todas estas fontes pontuais resulta na frente de onda que se propaga no espaço”. Esse princípio é ilustrado na Fig.10

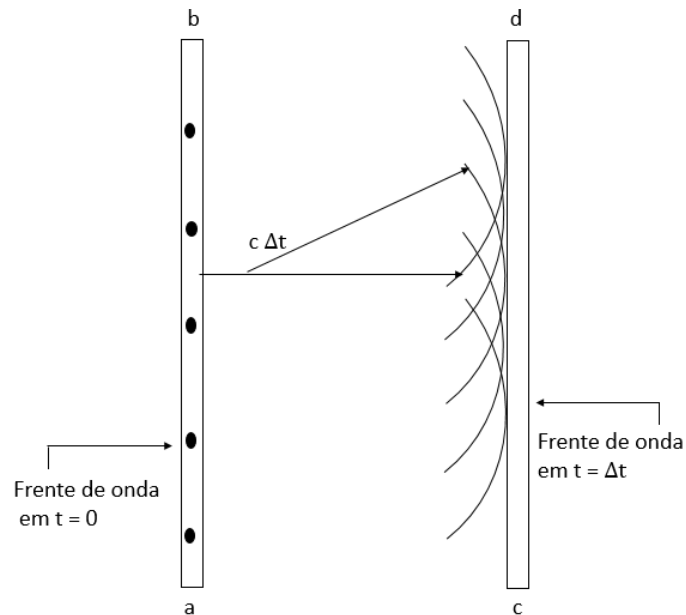
Ao chegar em um anteparo de observação, a luz difratada forma uma figura de interferência. Essa figura é formada por um máximo central e uma série de máximos secundários que são separados por mínimos de luz. (HALLIDAY; RESNICK, 2009)

2.6.1 Difração por uma fenda: determinação da posição dos mínimos

Para analisar o padrão de difração produzido por ondas luminosas de comprimento de onda λ ao serem difratadas por um anteparo com uma fenda estreita de largura a , é conveniente dividir a fenda em duas partes iguais para verificar as condições para que ondas secundárias associadas aos raios de cada par se cancelem mutuamente, conforme mostrado na Figura 11 (SERWAY; JEWETT, 2004).

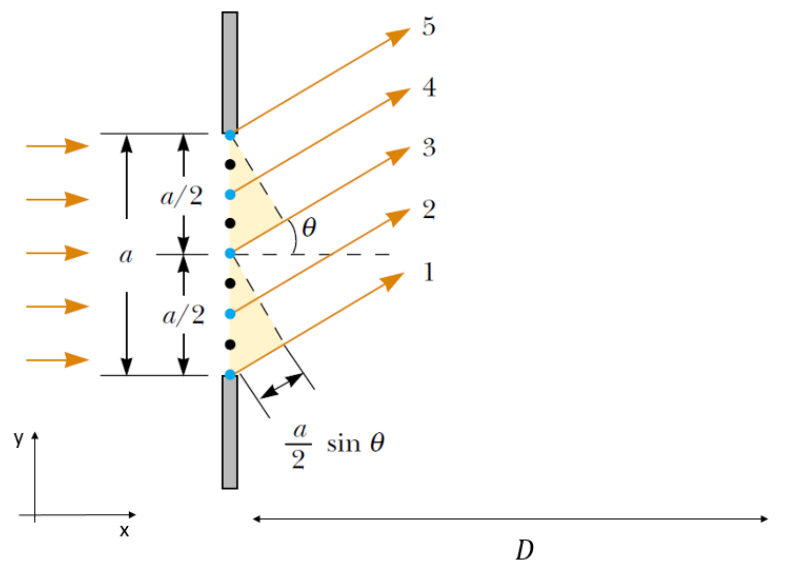
Observando a Figura 11 é possível ver que os raios 1 e 3 da frente de onda, que estão em fase ao saírem da fenda, viajam em direção ao anteparo de observação, que está

Figura 10 – Propagação de uma plana no vácuo, de acordo com o princípio de Huygens.



Fonte: Adaptado de (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

Figura 11 – Caminhos de raios de luz que encontram uma fenda.



Fonte: Adaptado de (SERWAY; JEWETT, 2004).

a uma distância D da fenda. O raio 1 percorre um caminho maior que o raio 3 em uma quantidade equivalente a uma diferença de caminho igual a $(a/2) \sin \theta$.

Se essa diferença de caminho for exatamente metade de um comprimento de onda (correspondente a uma diferença de fase de 180 graus), as duas ondas se anulam e o resultado é de interferência destrutiva. As análises dos raios 1 e 3 podem ser consideradas para os raios 2 e 4; 3 e 5, varrendo assim toda a largura da fenda “a”.

Portanto, de acordo com a Figura 11, as ondas da metade superior da fenda interferem destrutivamente com as ondas da metade inferior quando:

$$\frac{a}{2} \text{sen}\theta = \pm \frac{\lambda}{2} \quad (2.5)$$

Assim, a condição geral para interferência destrutiva é:

$$a \text{sen}\theta = m\lambda \quad (2.6)$$

Onde m representa a ordem de difração e θ é medido a partir do plano xy .

Os máximos secundários de luz ficam aproximadamente a meio caminho entre seus mínimos adjacentes, assim os máximos de luz podem ser definidos de acordo com a Eq.2.7

$$a \text{sen}\theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (2.7)$$

Através dessas equações básicas sobre difração é possível realizar inúmeras análises, que serão mostradas no Capítulo 3.

2.7 Aspectos gerais sobre processamento de imagens

2.7.1 Representação de imagens digitais

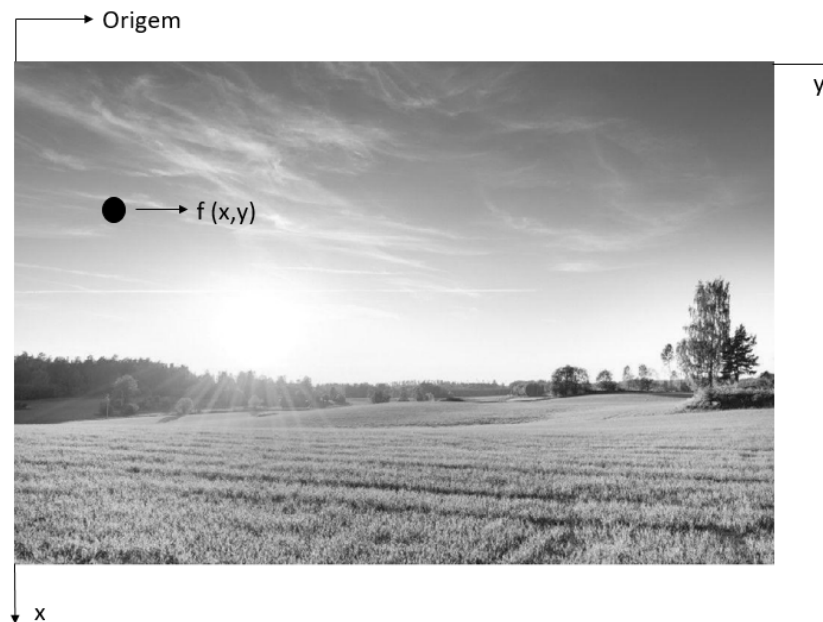
Uma imagem pode ser descrita matematicamente como uma função bidimensional de intensidade de luz $f(x,y)$, na qual x e y são as coordenadas espaciais e o valor de f é proporcional ao nível de cinza da imagem em um determinado ponto analisado (GONZALES; WOODS, 2000).

Uma imagem digital é uma imagem discretizada $f(x,y)$ que pode ser representada em uma matriz em que cada elemento irá identificar o nível de cinza naquele ponto. Cada ponto na matriz que representa a imagem digital é denominado elemento de imagem ou *pixel* (*picture element*).

Uma imagem colorida pode ser vista como a combinação de três cores primárias. Essa combinação é chamada de padrão ou sistema de cores RGB: vermelho (R - *Red*); verde (G - *Green*); azul (B - *Blue*). A maioria das câmeras coloridas utilizadas para a aquisição de imagens digitais utilizam o padrão RGB, tornando esse modelo importante no processamento de imagens (GONZALES; WOODS, 2000). A Eq. 2.8 mostra a representação da matriz tridimensional de uma imagem colorida no sistema de cores RGB.

$$f(x, y) = f_R(x, y); f_G(x, y); f_B(x, y) \quad (2.8)$$

Figura 12 – Convenção dos eixos para representação de imagens digitais.



Fonte: Adaptado de (GONZALES; WOODS, 2000).

2.7.2 Conceitos de processamento de imagens

O processamento de imagens considera a manipulação de imagens depois de realizada a aquisição por dispositivos tais como câmeras digitais, CCD (*Charge Coupled Device*), scanners, radares e etc (GONZALES; WOODS, 2000).

Em geral, as operações de processamento de imagens são categorizadas em quatro tipos (SHIH, 2009):

- Operação de Pixels: Operações como adição de brilho, ajuste de contraste e limiar são independentes;
- Operação Local: O tamanho da vizinhança de um pixel está relacionado com a transformação desejada, tal como a aplicação de filtros morfológicos, convolução, detecção de bordas e etc. Essas são operações que podem ser adaptáveis porque os resultados dependem dos valores de pixel específicos encontrados em cada região de imagem;
- Operação Geométrica: Essas operações alocam apenas determinados pixels para o cálculo de operações geométricas;
- Operação Global: As operações globais calculam as informações utilizando todos os pixels de uma imagem, tais como equalização de histogramas, distorção de imagens, transformação de domínio e etc.

2.7.3 Conceito de morfologia matemática

A morfologia matemática tornou-se uma importante área de estudos do processamento de imagens devido ao vasto número de aplicações que essa teoria oferece. Ela permite uma análise quantitativa das propriedades geométricas dos objetos. Especificamente, uma classe de algoritmos morfológicos existem para lidar com imagens binárias, com imagens em escala de cinza e também com imagens coloridas.

A morfologia matemática apresenta-se como um ramo não-linear de processamento do imagens e facilitou a aplicação de vários conceitos matemáticos, tais como, a segmentação de imagens, sistemas algébricos e conceitos de geometria (D'ORNELLAS, 2001).

2.7.4 MATLAB

O software *MATLAB*¹ combina um ambiente de computação numérica, gráficos avançados com uma linguagem de programação que expressa matriz e conjunto matemáticos diretamente (MathWorks Inc., 2018).

Além disso, o software tornou-se uma ferramenta essencial para especialistas por oferecer uma variedade de programas escritos em sua própria linguagem de programação que são utilizados para soluções de problemas em uma variedade de áreas de aplicação, incluindo processamento de sinais e imagens, engenharia, projeto de sistemas de controle e pesquisas médicas.

O *MATLAB* possui um *toolbox* para processamento de imagens que é composto por uma família de operadores e operações morfológicas. Ele inclui implementações para dilatação e erosão e permite a criação de qualquer outro operador morfológico através de sua abordagem construtiva (D'ORNELLAS, 2001).

A *toolbox* trabalha com imagens em escalas cinza e binária e possui inúmeras funções organizadas de acordo com a aplicação. Quando uma função é chamada, ela é buscada automaticamente na base de dados:

- Dilatação e Erosão: são definidas como operações de conjuntos que contém funções elementares como a erosão (contração da fronteira) e a dilatação (expansão da fronteira);
- Filtros Morfológicos: inclui filtros clássicos de abertura, fechamento e centrais;
- Operadores de Conexão: abertura e fechamento de áreas através de reconstrução, remoção de picos e preenchimento de formas;

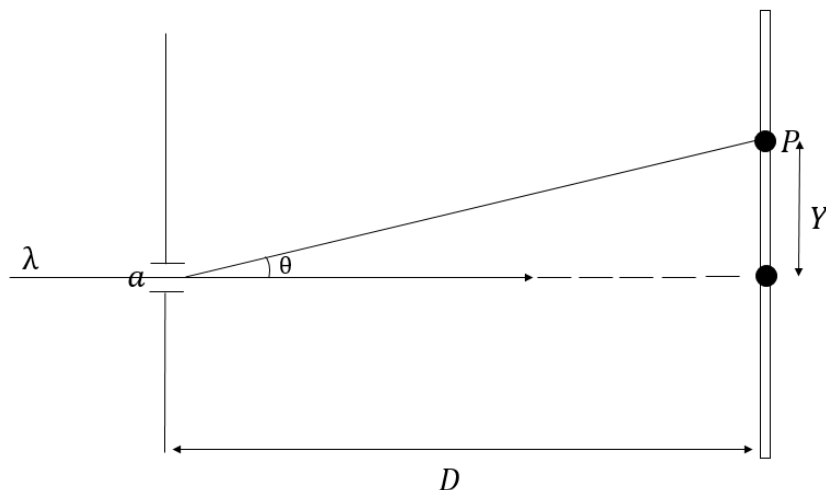
¹ O software MATLAB é uma marca registrada da Mathworks Inc.

3 ANÁLISE DA EQUAÇÃO BÁSICA DE DIFRAÇÃO

Nesse capítulo, serão realizadas operações matemáticas na Eq.2.7 que descreve os máximos de difração, para verificar quais as condições ideais de cada parâmetro geométrico, tais como distância da fibra e o anteparo de observação (detector), quantidade de máximos/mínimos de luz e comprimento de onda da fonte de luz laser para um processo de controle de diâmetro de fibra.

A Figura 13 representa a difração da luz de comprimento de onda λ interagindo transversalmente com a fibra de diâmetro “a”. Uma determinada ordem de difração que representa um máximo é gerada num ponto P, a uma distância Y do máximo central. O anteparo onde se forma a imagem está a uma distância D da fibra.

Figura 13 – Arranjo geométrico de difração em uma franja.



Fonte: Autoria própria.

Com a equação 2.7 e observando a Fig.13 é possível realizar algumas operações matemáticas que permitem descrever quais parâmetros geométricos podem ser alterados de forma a otimizar a sensibilidade à mudanças do diâmetro. Por exemplo, no caso estudado nesse trabalho, θ é pequeno pois a distância entre a fibra e o observador (D) é grande quando comparado com a distância do máximo secundário em relação ao máximo central (Y) de forma que:

$$\text{sen}\theta = \text{tg}\theta = \theta = Y/D \quad (3.1)$$

Considerando válida a aproximação de θ pequeno até 5 graus ou 0,087 radianos, a

relação entre Y e D se torna:

$$\frac{Y}{D} = 0,087 \quad (3.2)$$

$$D = 11,5Y \quad (3.3)$$

Ou seja, a distância da fibra e do anteparo que deve ser no mínimo $11,5Y$ nos experimentos.

Assim, a Eq. 2.7 pode ser reescrita como

$$a = \frac{D(m + 1/2)\lambda}{Y} \quad (3.4)$$

Da Eq.3.4 é possível obter relações entre mudanças de diâmetro Δa em função de mudanças de um dos outros parâmetros considerando todos os outros constantes.

Em particular, considerando a variação de posição Y em função de uma mudança do diâmetro da fibra (Δa), obtém-se:

$$\Delta Y = \frac{Y}{a} \Delta a \quad (3.5)$$

Onde:

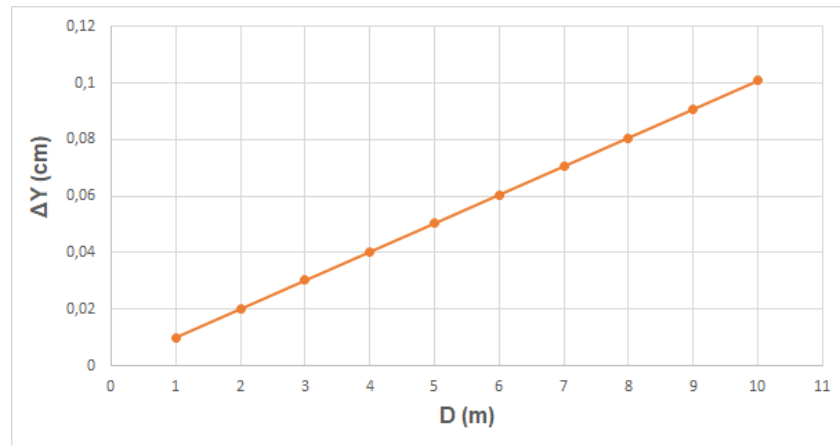
$$Y = \frac{D(m + 1/2)\lambda}{a} \quad (3.6)$$

Estas duas últimas equações permitem determinar a sensibilidade do dispositivo em termos dos parâmetros D , λ , a e m . Ainda é possível observar que quanto maior D , λ e m e menor o a , maior será o ΔY , ou seja, mais fácil será detectar as mudanças no diâmetro a quando este tende a dimensões de ordem de λ .

Para um caso hipotético em que $a = 250 \mu\text{m}$, $D = 5\text{m}$, $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ e $m=10$, o Y será igual a $12,6 \text{ cm}$. Se $\Delta a = 1 \mu\text{m}$, $\Delta Y = 0,5\text{mm}$. Isso significa que se o detector consegue detectar mudanças de $0,5\text{mm}$ este será capaz de detectar variações de $1 \mu\text{m}$ na produção da fibra.

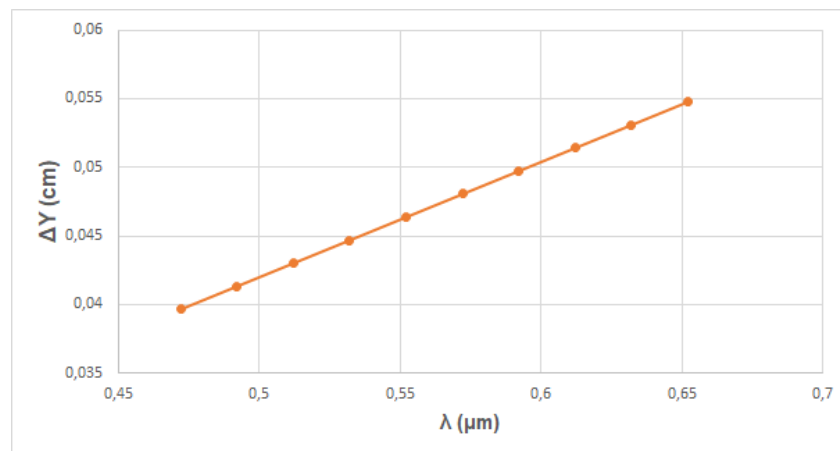
A Fig.14 mostra o gráfico da relação ΔY x D , utilizando os valores dos parâmetros do caso hipotético citado no parágrafo anterior, onde a , Δa , λ e $m=10$ foram mantidos constantes.

Como pode ser observado quanto maior a distância D , maior será ΔY . A importância em aumentar ΔY está no fato de que a distância entre as ordens aumenta, minimizando erros de medida.

Figura 14 – Gráfico teórico ΔY x D

Fonte: Autoria própria.

Já para determinar qual o melhor comprimento de onda a ser utilizado, foi plotado a curva $\Delta Y \times \lambda$. A Fig.15 mostra que quanto maior o comprimento de onda λ , maior ΔY .

Figura 15 – Gráfico teórico ΔY x λ .

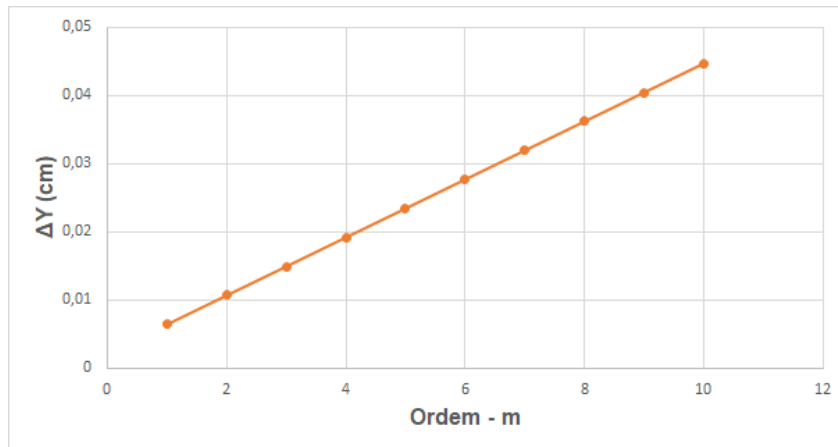
Fonte: Autoria própria.

Para determinar qual a melhor ordem de máximo de luz a ser observada, foi plotado a curva $\Delta Y \times m$.

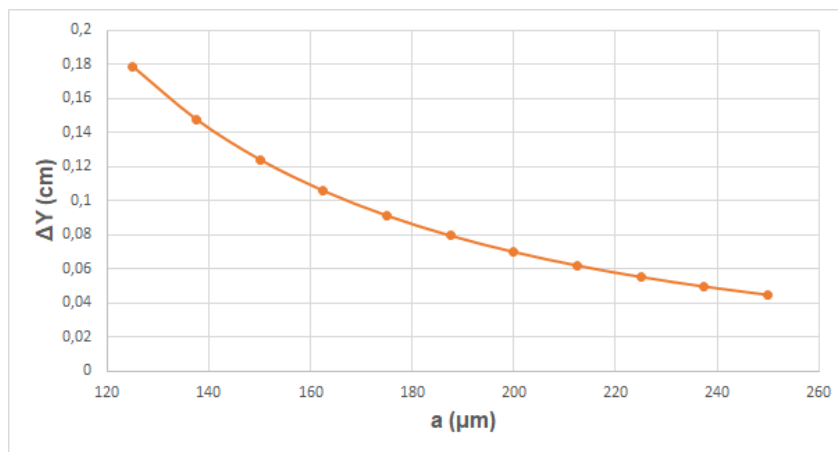
Neste caso, também é possível determinar que quanto maior a ordem de máximo de luz, maior será ΔY .

A última curva teórica plotada para esse caso hipotético foi para verificar a relação entre ΔY e o diâmetro a .

Observando a Figura 17, é possível determinar que quanto menor o diâmetro, maior será o ΔY . Ou seja, a utilização de difração como método óptico de determinação do diâmetro da fibra possui uma melhor resolução para menores diâmetros.

Figura 16 – Gráfico teórico ΔY x m 

Fonte: Autoria própria.

Figura 17 – Gráfico teórico ΔY x a .

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os gráficos acima pode-se afirmar que a precisão do diâmetro da fibra aumenta para D , λ e m grandes, bem como para “a” pequeno.

4 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foi aplicada a teoria básica de difração e o comportamento de seus parâmetros, como mostrado no Cap. 3. Em posse dessas informações, foram realizados ensaios experimentais com os seguintes materiais:

- Fibra óptica com diâmetro nominal de $125 \mu\text{m}$ (núcleo + casca) com capa protetora de $125 \mu\text{m}$;
- Laser verde - comprimento de onda de $532 \pm 10 \text{ nm}$;
- Suportes ópticos;
- Câmera Sony Cyber-shot DSC-W120, que possui as seguintes características:
 1. resolução de 7.1 mega pixels;
 2. zoom óptico 4x;

Embora o capítulo anterior tenha mostrado que quanto maior o comprimento de onda melhor seria a capacidade de detecção de variações do diâmetro, neste trabalho foi utilizado o laser verde devido a melhor qualidade do padrão de difração quando comparado com outros comprimentos de onda.

A disposição dos materiais utilizados é mostrado nas Figuras 18 e 19.

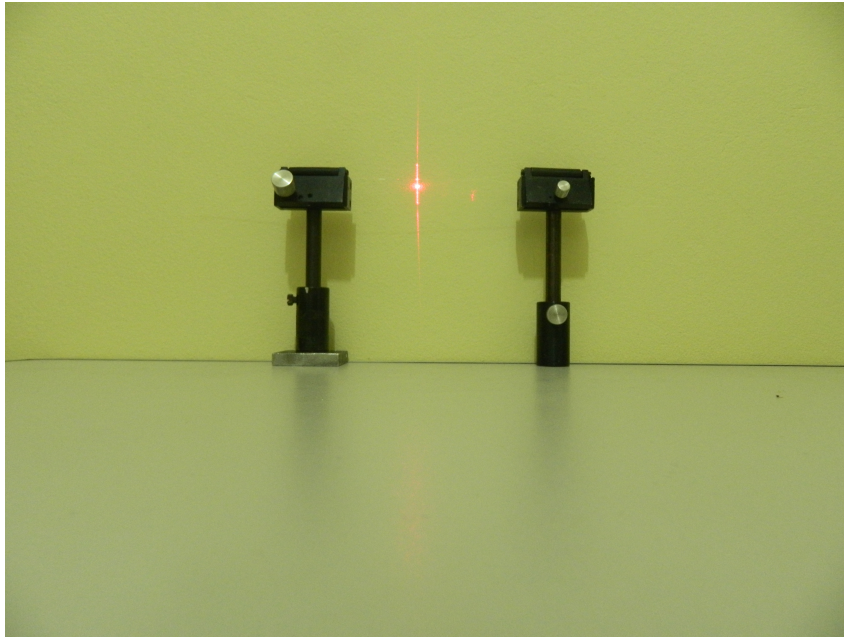
Nos ensaios experimentais, o laser foi alimentado através de uma fonte de alimentação de corrente contínua com tensão de 2,5V e corrente de 0,19A, para garantir uma boa potência óptica. O feixe de saída do laser foi incidido paralelamente ao eixo da fibra para formar a figura de difração no anteparo. A câmera ficou posicionada a uma distância de 82,2 cm do anteparo.

As distâncias entre os máximos de luz foram medidas com o auxílio de uma régua e após isso foram obtidas as imagens. Foram realizadas algumas variações no cenário de captação de dados e imagens, tais como:

- Diferentes distâncias entre a fibra e anteparo (D);
- Desbaste da capa protetora da fibra para realizar uma mudança no diâmetro.

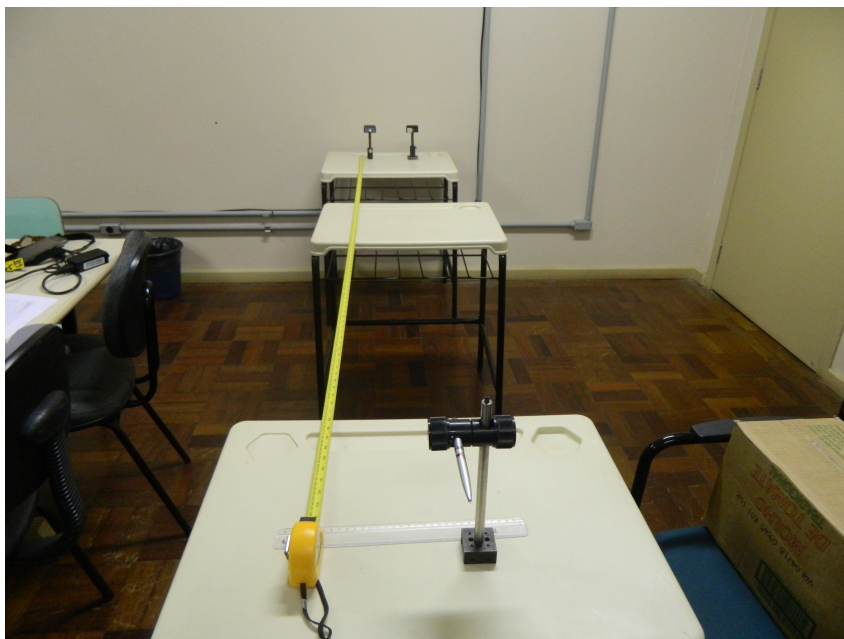
Após a realização dos ensaios foram plotadas e comparadas as curvas práticas e teóricas de cada caso, a fim de encontrar o melhor cenário para determinação do diâmetro da fibra com boa precisão.

Figura 18 – Suporte para fibra.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Disposição da fibra e do laser.



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, as imagens do melhor cenário foram processadas através do processamento de imagens no software MATLAB para verificar e determinar a sensibilidade desse método de processamento.

Por fim, os resultados foram comparados com a verificação do diâmetro da fibra utilizada através do microscópio óptico.

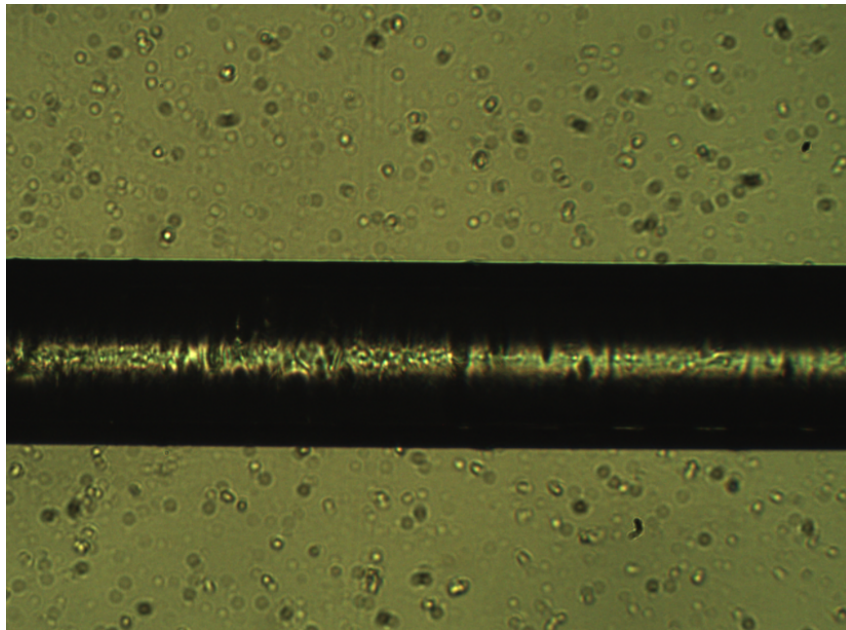
5 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através da implementação prática descrita na Seção 4, a fim de analisar e determinar o melhor cenário encontrado, comparando-o com os resultados teóricos. Além disso, serão mostrados os resultados do processamento de imagens dos padrões de difração a fim de melhorar o limite de detecção de mudanças de “a”.

5.1 Análise do desenvolvimento prático

Inicialmente, foi feita a medida do diâmetro real da fibra para os dois casos, com a sua capa protetora e com ela desbastada. As Figuras 20 e 21 mostram as imagens obtidas no microscópio óptico.

Figura 20 – Imagem da fibra com a capa protetora com diâmetro real de $243,5\mu\text{m}$.



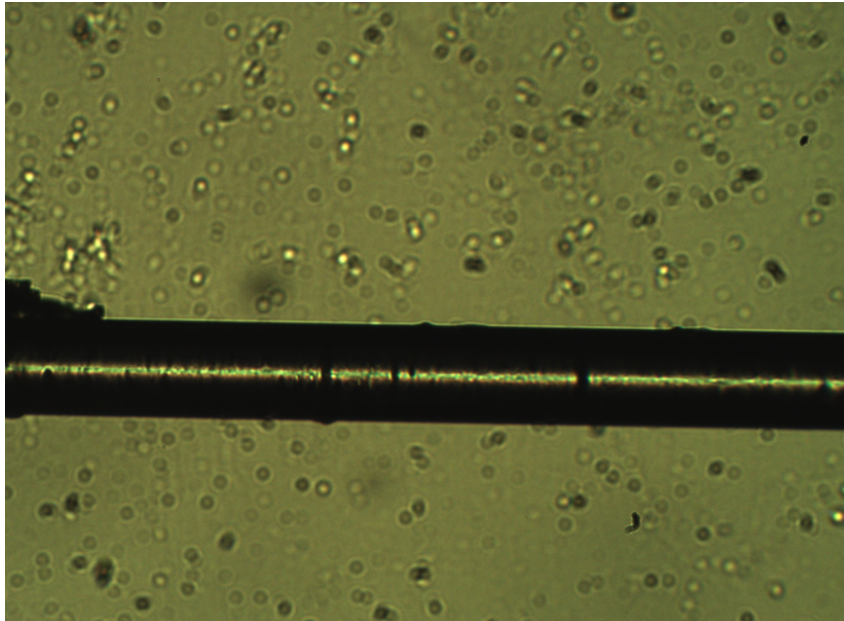
Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, foram realizados os ensaios com cinco maiores distâncias julgadas satisfatórias com a fibra + capa protetora e repetidos para o cenário com a fibra desbastada.

Como demonstrado nas considerações da Seção 3, quanto maior o D , melhor a análise visual e de processamento de imagens dos máximos de luz. As distâncias foram limitadas pelo tamanho do Laboratório de Física do campus Alegrete, local onde os ensaios foram realizados. Assim, as cinco distâncias experimentais foram:

- 4,99m;

Figura 21 – Imagem da fibra desbastada diâmetro real de $127,4\mu\text{m}$.



Fonte: Autoria própria.

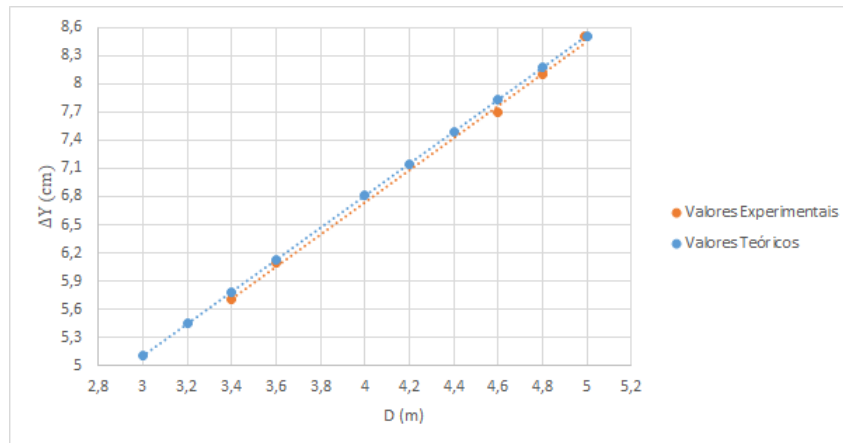
- 4,80m;
- 4,60m;
- 3,60m;
- 3,40m.

A Fig.22 mostra uma comparação dos resultados teóricos e experimentais para estas distâncias considerando $a = 125\mu\text{m}$, $\Delta m = 4$ e $\lambda = 532 \text{ nm}$.

Embora ΔY seja maior quanto maior for Δm , o que faz com que o erro seja menor, foi escolhido um $\Delta m = 4$ ($\Delta m = m_5 - m_1$) pois estas ordens estavam com seus contornos perfeitamente definidos a olho nu.

Como pode ser observado na Fig.22 os resultados experimentais e teóricos estão em boa concordância. A incerteza entre os resultados teóricos e experimentais pode ser explicado pela incerteza da medida do comprimento de onda da fonte ($\lambda = 532 + 10\text{nm}$.)

Figura 22 – Gráfico teórico e experimental $\Delta Y \times D$ - diâmetro nominal de $125\mu\text{m}$.



Fonte: Autoria própria.

5.2 Processamento de imagens

As rotinas básicas efetuadas em ambas as imagens seguem a sequência a seguir. Após a apresentação das rotinas ¹. Os resultados obtidos foram organizados separadamente, para uma melhor compreensão visual e comentários de resultados.

1. Após a etapa de aquisição das imagens digitais dos padrões de difrações formados, as imagens foram salvas em formato *Joint Photographic Experts Group (JPEG)*.
2. A próxima etapa utilizada foi a função que transforma a imagem colorida para uma imagem em níveis de cinza. Através dessa função, a imagem fica armazenada em uma matriz, onde cada posição representa um pixel e o seu tom (intensidade) de cinza correspondente.
3. Foi aplicado uma função para binarizar a imagem. O limiar para a binarização foi de 220.
4. Em seguida foi efetuada uma segmentação na imagem, onde foi realizada a detecção dos buracos dos centroides existentes na imagem. Para o aperfeiçoamento dessa etapa foram executados procedimentos através do filtro de Sobel, que retorna o gradiente da intensidade de pixels da imagem.
5. Posteriormente, iniciou-se a etapa de representação, a qual foi desenvolvida com a função *regionprops* que retorna em uma forma de tabela as medidas e as propriedades especificadas de cada componente desejado na imagem. Assim, foi possível localizar o pixel central de cada centroide em coordenadas x e y. Além disso essa função estima

¹ Os algoritmos implementados estão no Apêndice A.

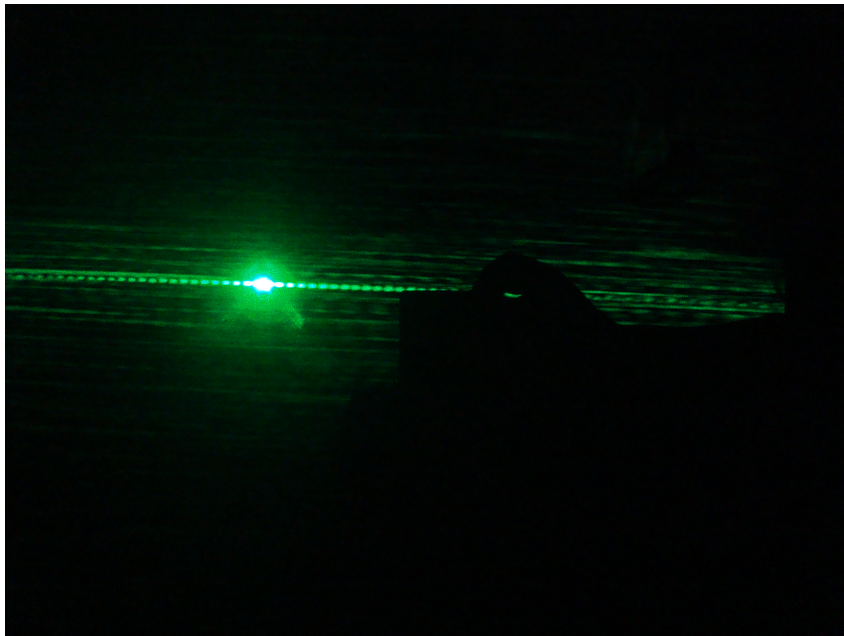
as dimensões e o raio dos centroides na imagem e utiliza essas informações para traçá-los.

6. A próxima etapa foi a de identificação das bordas dos centroides pela função *bwboundaries*, a qual numerou-os sequencialmente. Posteriormente as dimensões do máximo central e os máximos secundário de luz foram dispostas em uma tabela.

5.2.1 Fibra com capa protetora - diâmetro nominal de $250\mu\text{m}$

1 - A Figura 23 representa a imagem digital em formato JPEG obtida durante os ensaios experimentais. Para cada distância 10 imagens foram captadas, a fim de garantir um bom acervo para o processamento.

Figura 23 – Imagem original - fibra + capa.



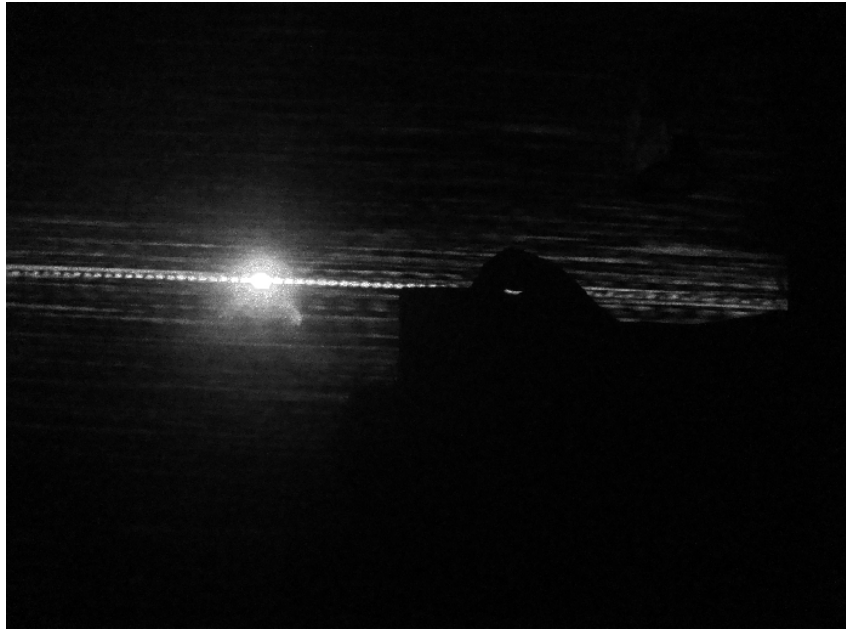
Fonte: Autoria própria.

2 - A Figura 24 mostra a imagem digital colorida convertida para uma imagem em níveis de cinza. Esse passo foi necessário para posterior aplicação de limiarização da imagem.

3 - A Figura 25 mostra a imagem binária obtida após o processo de limiarização (binarização). O valor do limiar utilizado foi definido através de testes a fim de determinar o melhor valor que eliminaria alguns aglomerados de pixels que poderiam ser considerados objetos, mas que não representavam informações relevantes na determinação dos centroides de máximos de luz.

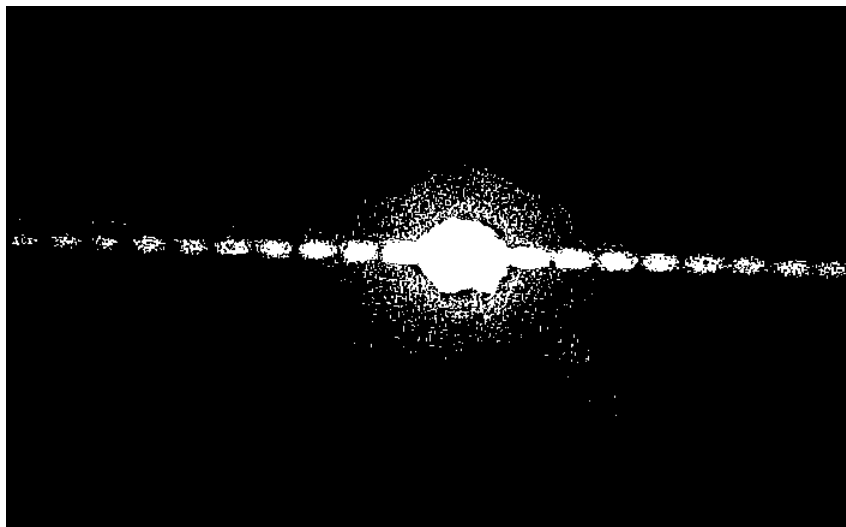
4 - A Figura 26 mostra a imagem como resultado da detecção das bordas dos contornos dos máximos de luz - central e secundários. Esse passo é importante pois quando

Figura 24 – Imagem em níveis de cinza - fibra + capa.



Fonte: Autoria própria.

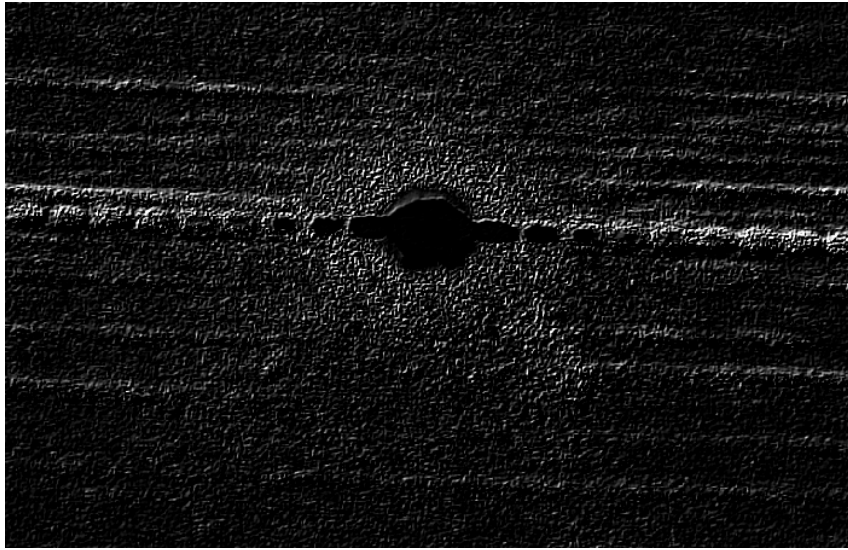
Figura 25 – Imagem binária (limiarizada) - fibra + capa.



Fonte: Autoria própria.

trabalha-se apenas com contornos geométricos existentes em uma imagem é exigido um menor esforço computacional. Na implementação do filtro de Sobel, o algoritmo procura por mudanças bruscas nos níveis de cinza dos pixels vizinhos após o processo de convolução da imagem com o filtro. Assim, em regiões de baixo contraste, o resultado da convolução com o filtro de Sobel sobre a imagem tende a valores próximos a zero. Entretanto, para regiões de contraste elevado esta convolução produz valores significativos possibilitando, dessa forma, a detecção de bordas das formas da imagem.

Figura 26 – Contornos detectados pelo filtro de Sobel - fibra + capa.



Fonte: Autoria própria.

5 - A Figura 27 mostra a imagem com o reconhecimento dos máximos de luz como centroides após a identificação das formas geométricas através do filtro de Sobel. Observa-se que a aplicação desse filtro produziu bons resultados, já que os centroides ficaram bem definidos.

Figura 27 – Imagem dos centroides da imagem - fibra + capa.

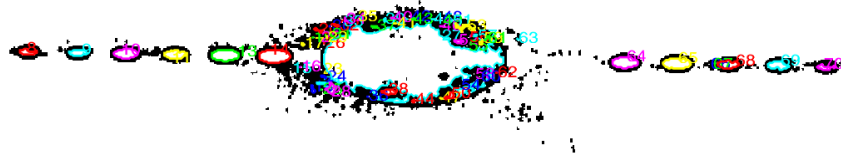


Fonte: Autoria própria.

6 - A imagem 28 retorna a rotulação e enumeração dos centroides anteriormente definidos. Observa-se que até algumas falhas de pixels foram identificadas como um centroide, pois o comando identifica buracos nas imagens. Porém, a dimensão desses centroides são pequenas e foram desprezadas. As localizações no eixo x dos centroides identificados como o máximo central e os secundários estão dispostos na Tabela 3. Como as ordens se encontram ao longo do eixo x, a posição dos centroides em y podem ser desprezadas.

Na Tabela 4 estão dispostas as distâncias, em unidades de pixels, entre os máximo secundário e máximo central

Figura 28 – Imagem dos centroides identificados e enumerados - fibra + capa.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Localização do máximo central e secundários de luz - fibra + capa.

| <i>Ordem</i> | <i>Localização do Pixel Central.</i> |
|--------------|--------------------------------------|
| m = -6 | 649,06 |
| m = -5 | 687,67 |
| m = -4 | 724,70 |
| m = -3 | 763,25 |
| m = -2 | 801,96 |
| m = -1 | 839,99 |
| Central | 948,25 |
| m = 1 | 1112,47 |
| m = 2 | 1152,87 |
| m = 3 | 1192,98 |
| m = 4 | 1232,18 |
| m = 5 | 1269,36 |
| m = 6 | 1310,13 |

Fonte: A autora

Tabela 4 – Distância entre Δm em pixels - Fibra + Capa.

| <i>Ordem</i> | <i>Distância - em pixels</i> |
|----------------|------------------------------|
| $\Delta m = 5$ | 299,2 |
| $\Delta m = 4$ | 260,6 |
| $\Delta m = 3$ | 223,5 |
| $\Delta m = 2$ | 185,0 |
| $\Delta m = 1$ | 146,2 |

Fonte: A autora

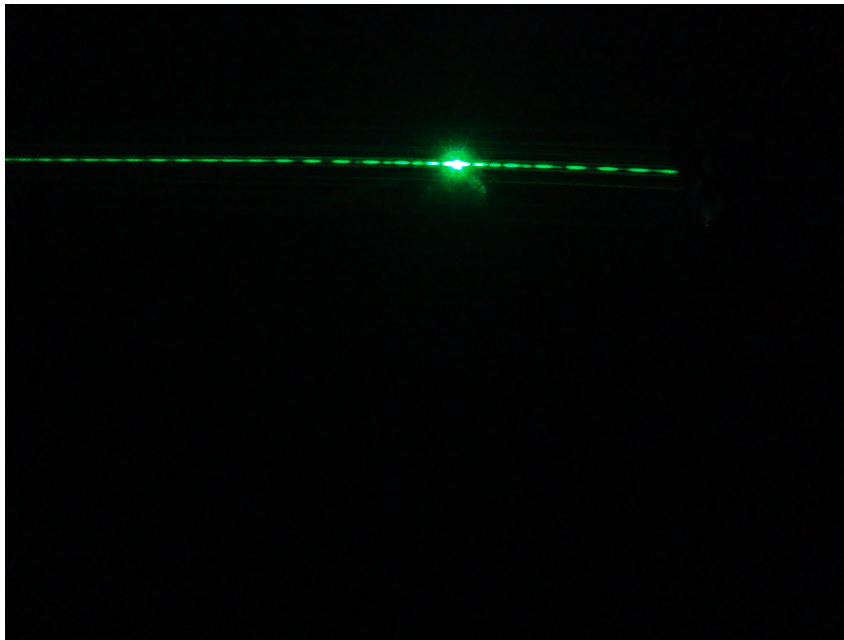
Analisando os dados observa-se que há uma linearidade de diferença de distâncias entre os máximos secundários de aproximadamente 39 pixels.

5.2.2 Fibra sem capa protetora - diâmetro nominal de $125\mu\text{m}$

Como já destacado na Seção 5.2 as rotinas básicas que foram efetuadas no processamento de imagens para a fibra com diâmetro nominal de $250\mu\text{m}$ foram executadas para a fibra de diâmetro nominal de $125\mu\text{m}$. As imagens a seguir mostra os resultados obtidos para esse último caso.

1 - A Figura 29 mostra a imagem digital obtida durante os ensaios experimentais.

Figura 29 – Imagem original - somente fibra.



Fonte: Autoria própria.

2 - A Figura 30 mostra a imagem digital original convertida para níveis de cinza.

3 - Figura 31 mostra a imagem binarizada com aplicação do limiar.

4 - A imagem 32 como resultado da detecção das bordas dos contornos dos máximos de luz - central e secundários.

No caso da Figura 32 o resultado encontrado não foi satisfatório, pois os contornos apresentados são fracos e descontínuos. Portanto, foi aplicada a função *imclose*, para criar um elemento estruturante (nesse caso foi aplicados discos de raio = 2) para realizar um fechamento nas formas para posteriormente a identificação dos centroides ficarem mais coesas.

5 - A Figura 34 mostra a imagem com a identificação dos máximos de luz como centroides.

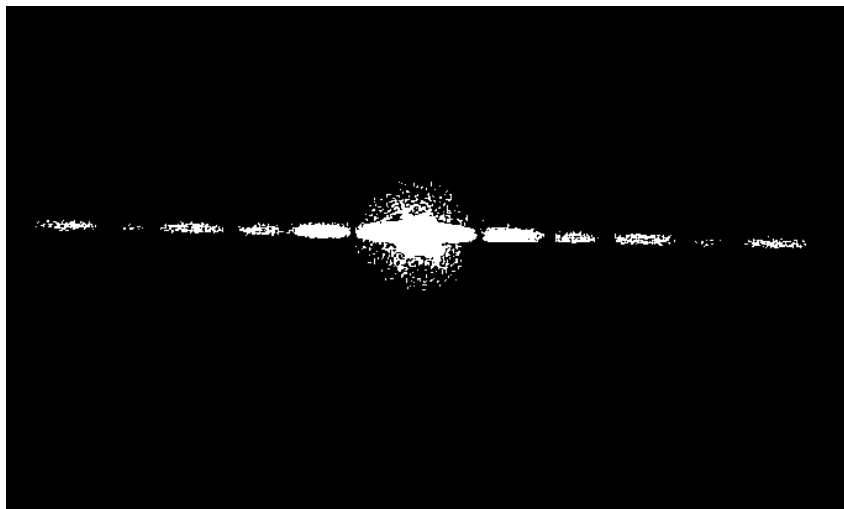
6 - A Imagem 35 retorna a identificação e enumeração dos centroides. Observe, novamente, algumas falhas de pixels foram identificadas como um centroide, porém em menor número, pois nesse caso foi realizado um fechamento morfológico na imagem.

Figura 30 – Imagem em níveis de cinza - somente fibra.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Imagem binária (limiarizada) - somente fibra.



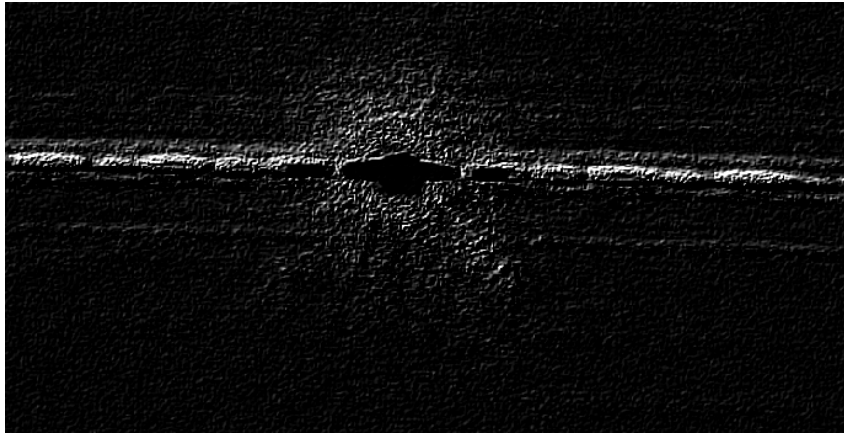
Fonte: Autoria própria.

Também nesse caso esses pequenos centroides foram desprezadas. As localizações dos centroides identificados como o central e os secundários estão dispostos na Tabela 5.

Na Tabela 6 estão dispostas as distâncias, em unidades de pixels, entre os máximo secundário e máximo central

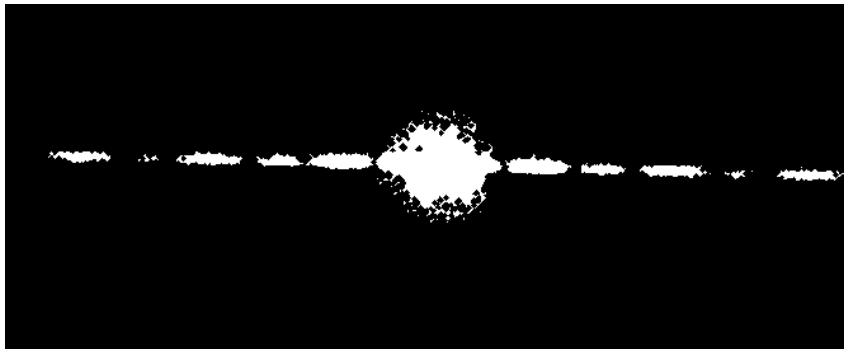
Analisando os dados observa-se que há uma linearidade de diferença de distâncias entre os máximos secundários de aproximadamente 107 pixels.

Figura 32 – Contornos detectados pelo filtro de Sobel - somente fibra.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Imagem com níveis de cinza acima de 220 com fechamento morfológico - somente fibra.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Imagem dos centroides da imagem - somente fibra.



Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Imagem dos centroides identificados e enumerados - somente fibra.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Localização do máximo central e secundários de luz - somente fibra.

| <i>Ordem</i> | <i>Localização do Pixel Central.</i> |
|--------------|--------------------------------------|
| m = -5 | 1224,90 |
| m = -4 | 1332,00 |
| m = -3 | 1417,91 |
| m = -2 | 1441,12 |
| m = -1 | 1551,64 |
| Central | 1635,11 |
| m = 1 | 1718,94 |
| m = 2 | 1775,23 |
| m = 3 | 1834,27 |
| m = 4 | 1951,70 |
| m = 5 | 2060,78 |

Fonte: A autora

Tabela 6 – Distância entre Δm em pixels - fibra

| <i>Ordem</i> | <i>Distância - em pixels</i> |
|----------------|------------------------------|
| $\Delta m = 4$ | 410,2 |
| $\Delta m = 3$ | 303,1 |
| $\Delta m = 2$ | 207,2 |
| $\Delta m = 1$ | 98,5 |

Fonte: A autora

5.3 Análise dos resultados

5.3.1 Cálculo da sensibilidade do método

Para calcular a sensibilidade do método estudado neste trabalho, foram comparadas as distâncias de pixels para um $\Delta m = 4$ em ambos os casos ($a = 125\mu\text{m}$ e $a = 250\mu\text{m}$) para obter-se uma relação de pixel/ μm .

Como uma variação de posição (ΔY) causa uma variação de pixels (Δp) tem-se que:

$$\frac{a}{Y} = \frac{\Delta a}{\Delta Y} = \frac{\Delta a}{\Delta p} \quad (5.1)$$

A partir dos dados experimentais tem-se que para $\Delta m = 4$:

- $p_1 = 260,6$ para $a_1 = 250 \mu\text{m}$;
- $p_2 = 410,4$ para $a_2 = 125 \mu\text{m}$;

Dessa forma a sensibilidade S pode ser calculado como sendo:

$$S = \frac{\Delta a}{\Delta p} = \frac{a_2 - a_1}{p_2 - p_1} \quad (5.2)$$

Assim, a sensibilidade do método proposto neste trabalho foi de:

$$S = 0,83 \frac{\mu\text{m}}{\text{pixels}} \quad (5.3)$$

Considerando um limite de detecção da câmera de 1 pixel, o sistema do sensor proposto permite detectar uma variação de diâmetro de $0,83 \mu\text{m}/\text{pixels}$, que equivale para uma fibra de $125 \mu\text{m}$ a uma variação de $0,659\%$.

5.4 Comparação da variação dos métodos - pré-forma e puxamento

O resultado do método proposto se equipara ao método clássico de controle:

1. Método que utiliza uma matriz de fotodiodos e realiza o processamento através de uma FFT, descrito na Seção 2.4.1.

Apesar da filtragem ser mais eficiente usando a FFT do que quando realizada diretamente no domínio temporal, de uma forma geral, o sistema desse sensor proposto possui um aparato de captação dos padrões de difração com um custo muito inferior ao

utilizado no método de processamento de dados com FFT. Além disso, a resposta do processamento de dados através do *software* MATLAB deu-se de maneira satisfatória.

Comparando com os outros métodos, este torna-se um pouco inferior. Uma das alternativas para melhorar a sensibilidade é a utilização de câmeras que possuem maiores resoluções. Atualmente, no mercado existem câmeras que possuem resoluções de 45.4 mega pixels, 6x maior resolução que o modelo de câmera utilizado neste trabalho. A utilização desse modelo melhoraria a sensibilidade em 6x.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto e desenvolvido um sistema de um sensor de medição de diâmetro de fibra óptica de baixo custo utilizando a teoria de difração e processamento de imagens. Um estudo teórico utilizando os conceitos de difração mostraram que uma melhor sensibilidade a mudanças de diâmetro ocorrem quando se analisam ordens de difração (m), comprimentos de onda da fonte bem como a distância entre fibra e detector (D) grandes. Este estudo teórico foi comprovado experimentalmente. Aplicando este estudo e considerando o espaço bem como material disponível, foi considerado como ideal a utilização dos seguintes parâmetros para o sistema de medição: comprimento de onda de 532 ± 10 nm, $D=4,99$ m e $\Delta m = 4$.

Para esta configuração, foram capturadas imagens através de uma câmera fotográfica de 7,2 mega pixels. As imagens digitais foram processadas através do software MATLAB considerando as coordenadas em pixels das centróides dos máximos central e secundários e convertendo estas coordenadas em unidades de distância. Para a câmera utilizada, foi encontrada uma sensibilidade de $0,86 \mu\text{m}/\text{px}$. Considerando o limite de detecção da câmera como sendo de 1 px, o sistema desenvolvido pode, teoricamente, detectar mudanças de diâmetro da fibra de $0,86 \mu\text{m}$, um resultado comparável com resultados encontrados na literatura utilizando outras técnicas mais avançadas.

A relevância deste trabalho se encontra no custo do aparato experimental onde foi utilizado uma simples câmera fotográfica e uma caneta laser.

Para trabalhos futuros sugere-se utilizar uma câmera de melhor resolução e do ponto de vista de aplicação prática seria interessante fazer um sistema em que a fibra se mova permitindo a detecção em tempo real da variação do diâmetro da fibra através de um gráfico diâmetro vs tempo, simulando desta maneira a etapa de puxamento da fibra. Neste sentido poderia ser avaliado experimentalmente o limite de detecção das variações de diâmetro considerando os possíveis ruídos do sistema bem como o limite temporal de captação das imagens. Além disso, para um trabalho ainda mais avançado seria interessante ter dois sistemas ortogonais que se comunicam de forma a detectar as variações ao longo de toda a circunferência da fibra.

REFERÊNCIAS

- ABUSHAGUR, M. A. G.; GEORGE, N. Measurement of optical fiber diameter using the fast fourier transform. *Applied Optics*, v. 19, n. 12, p. 1–3, 1980. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 28.
- BLANKENSHIP, M. G.; DENEKA, C. W. The Outside Vapor Deposition Method of Fabricating Optical Waveguide Fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, v. 18, n. 10, p. 1–6, 1982. Citado na página 24.
- D'ORNELLAS, M. C. *Algoritmica Patterns for Morphological Image Processing*. Tese (Doutorado) — Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, Netherlands, 2001. Citado na página 36.
- FEJER, G. A. M. M. M.; BYER, R. L. High-speed high-resolution fiber diameter variation measurement system. *Applied Optics*, v. 24, n. 15, p. 1–7, 1985. Citado 4 vezes nas páginas 19, 28, 29 e 30.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. *Processamento de Imagens Digitais*. São Paulo: [s.n.], 2000. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, J. W. *Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna*. [S.l.: s.n.], 2009. (8ª ed.). Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- KAO, K.; HOCKHAM, G. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *IEE PROCEEDINGS - Optoelectronics*, v. 133, n. 3, p. 1–8, 1986. Citado na página 19.
- KEISER, G. *Comunicações Por Fibra Óptica*. [S.l.]: AMGH Editora Ltda, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- MathWorks Inc. *MATLAB*. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://se.mathworks.com/products/matlab.html>>. Citado na página 36.
- MULPUR, A.; THOMPSON, C. Nonlinear control of optical fiber diameter variations. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 4, n. 2, p. 1–11, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 25, 30 e 31.
- MYERS, M. R. A model for unsteady analysis of preform drawing. *American Institute of Chemical Engineers*, v. 35, n. 4, p. 1–11, 1989. Citado na página 25.
- NACCACHE, M. F. *Estudo da Deposição Termoforética de Partículas na Fabricação de Fibras Óticas*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica da PUC/RJ, Rio de Janeiro, RJ, 1989. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.
- RIBEIRO, J. A. J. *Propagação das ondas eletromagnéticas : princípios e aplicações*. São Paulo: [s.n.], 2011. (2ª ed.). Citado na página 23.
- SAHA, A. P. M.; SEN, R. Vapor phase chelate delivery technique for fabrication of rare earth doped optical fiber. *International Conference on Fiber Optics and Photonics*, p. 1–3, 2012. Citado na página 23.

SCHULT ABDELFATTAH ZEBIB, S. H. D. W. W.; LEE, Y. Nonlinear stability of newtonian fibers. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 49, p. 455–475, 1989. Citado na página 25.

SEKIYA, E. H. *Estudo da Processo de Deposição e Consolidação da Preforma de Sílica Vítrea Para Fibras Ópticas Pelo Método VAD*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001. Citado na página 24.

SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. *Physics for Scientists and Engineers*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 4. (6ª ed., v. 4). Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

SHIH, F. Y. *Image Processing and Mathematical Morphology Fundamentals and Applications*. [S.l.]: CRC Press: Taylor e Francis Group, 2009. Citado na página 35.

WATKINS, L. S. Control of fiber manufacturing. *Proceedings of the IEEE*, p. 1–9, 1981. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 26 e 27.

Apêndices

APÊNDICE A – ROTINAS EXECUTADAS NO MATLAB

Filtro de Sobel

```

close all;

clc

x = imread('5.jpg');
imr = x(:,:,2); %matriz de tons verdes
janela=2;
filtrox = [ 1 0 -1 ; 2 0 -2 ; 1 0 -1 ];
filtroy = [ 1 2 1 ; 0 0 0 ; -1 -2 -1 ];
bordav = conv2(imt,filtrox);
bordah = conv2(imt,filtroy);
bordav = bordav(2:end-1,2:end-1);
bordah = bordah(2:end-1,2:end-1);
figure
subplot(1,2,1); imshow(uint8(bordav )); title('Bordas verticais da imagem')
subplot(1,2,2); imshow(uint8(bordah)); title('Bordas horizontais da imagem')
borda = bordav + bordah;
figure
imshow(uint8(borda));

```

Rotinas de Segmentação da Imagem e Cálculo dos Centroides

```

clc;

close all;

clear all;

im = imread('binarizada.tif');

figure

imshow(im)

se=strel('disk',2);

imc=imclose(imt,se);

```

```

figure;
imshow(imc);
title('Imagem com Fechamento Morfológico') %Realize uma operação de fechamento
morfológico na imagem.
stat = regionprops(imt,'centroid');
figure;
stats = regionprops('table',imt,'Centroid','MajorAxisLength','MinorAxisLength');
centers = stats.Centroid;
diameters = mean([stats.MajorAxisLength stats.MinorAxisLength],2); radii =
diameters/2;

```

```
hold on
```

```
viscircles(centers,radii);
```

```
hold off
```

Rotina de Identificação dos Centroides:

```
clc;
```

```
close all;
```

```
clear all;
```

```
I = imread('teste.tif');
```

```
BW = im2bw(I, 220);
```

```
[B,L] = bwboundaries(BW,'noholes');
```

```
imshow(label2rgb(L, @jet, [.5 .5 .5]))
```

```
imshow(BW); hold on;
```

```
colors=['b' 'g' 'r' 'c' 'm' 'y'];
```

```
for k=1:length(B),
```

```
boundary = Bk;
```

```
cidx = mod(k,length(colors))+1;
```

```
plot(boundary(:,2), boundary(:,1),colors(cidx),'LineWidth',2);
```

```
rndRow = ceil(length(boundary)/(mod(rand*k,7)+1));
```

```
col = boundary(rndRow,2); row = boundary(rndRow,1);
```

```
h = text(col+1, row-1, num2str(L(row,col)));
```

```
set(h,'Color',colors(cidx),'FontSize',14,'FontWeight','bold');
```

end