



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto de Física Armando Dias Tavares

Núbia Monteiro Batista Pereira

**Estudo, caracterização e simulação em COMSOL de fibras PCF visando a
construção de um detector de radiação**

Rio de Janeiro

2024

Núbia Monteiro Batista Pereira

Estudo, caracterização e simulação em COMSOL de fibras PCF visando a construção de um detector de radiação

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Física, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Resende Camara

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Vinícius Colaço Gonçalves

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/ REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/D

P436e Pereira, Núbia Monteiro Batista.
Estudo, caracterização e simulação em COMSOL de fibras PCF visando a construção de um detector de radiação / Núbia Monteiro Batista Pereira. – 2024.
97 f. : il.

Orientador: Alexandre de Resende Camara.
Coorientador: Marcos Vinícius Colaço Gonçalves.
Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Física Armando Dias Tavares.

1. Fibras ópticas - Teses. 2. Cristais fotônicos – Teses. 3. Microtomografia por raio-X – Teses. 4. COMSOL Multiphysics – Teses. 5. Radiação – Detectores – Teses. I. Camara, Alexandre de Resende (Orient.). II. Gonçalves, Marcos Vinicius Colaço (Coorient.). III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Física Armando Dias Tavares. IV. Título.

CDU 535.399

Bibliotecária: Teresa da Silva CRB7/5209

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Núbia Monteiro Batista Pereira

Estudo, caracterização e simulação em COMSOL de fibras PCF visando a construção de um detector de radiação

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.


Aprovada em 25 de setembro de 2024.

Banca Examinadora:



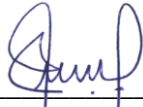
Prof. Dr. Alexandre de Resende Camara (Orientador)

Instituto de Física Armando Dias Tavares – UERJ



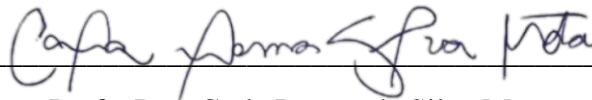
Prof. Dr. Marcos Vinicius Colaço Gonçalves (Coorientador)

Instituto de Física Armando Dias Tavares – UERJ



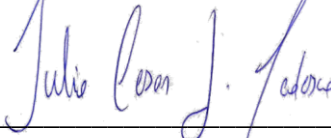
Prof. Dr. Liebert Parreiras Nogueira

Universidade de Oslo



Profa. Dra. Carla Lemos da Silva Mota

Universidade do Estado do Rio de Janeiro



Prof. Dr. Julio Cesar Guimarães Tedesco

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família...

AGRADECIMENTOS

Agradeço, ao meu orientador, Alexandre Camara, por aceitar a continuação da orientação nesse novo projeto, o apoio e conhecimento transmitidos.

Ao meu coorientador, Marcos Colaço, pelas oportunidades oferecidas, por todo o auxílio e tempo dedicados à minha pesquisa dentro do laboratório de Física Aplicada às Ciências Biomédicas e Ambientais.

Aos meus pais, Maira Monteiro e Vitor Pereira, pelo amor, carinho e apoio incondicional as minhas escolhas e incentivo contínuo para prosseguir com a trajetória acadêmica.

Ao meu namorado, Jamarc Teixeira, pela paciência de ouvir a todos os meus problemas e me ajudar a encontrar soluções, dedicação, preocupação e paciência comigo. A vida é mais tranquila com você ao meu lado.

Aos meus amigos da época do colégio, Rafaela Felix, Gabriel Balbi e Maria Luzia, pela amizade de mais de 10 anos, apoio e atenção que sempre me deram com os entraves ao longo desses últimos dois anos.

Aos meus amigos conquistados ao longo do curso de Física, André Limas, Filipe Fernandes e Wallace Torres, pela companhia e amizade ao longo desses anos.

Às minhas amigas do laboratório de Física Médica Thaina Alvarenga, Samara Oliveira, Tayane Tanure e Katrine Paiva por prontamente me acolherem no grupo, pela companhia no laboratório e me auxiliarem em todas as minhas dúvidas e problemas. Toda a jornada do mestrado foi mais fácil e divertida com vocês.

À chefe do laboratório de Física Médica, Regina Cely Barroso, por todo conhecimento transmitido sobre a Física e sobre a vida.

Ao Instituto de Pesquisa da Suécia (RISE), principalmente ao João Manoel Barbosa Pereira, por disponibilizar os quatro modelos de fibras microestruturadas utilizados nesse trabalho.

À Universidade de Oslo, principalmente ao Liebert P. Nogueira, que realizou todo o processo de microtomografia e reconstrução das imagens das fibras ópticas desse trabalho.

À Professora Isabel Cristina S. Carvalho, da PUC-Rio, por permitir o uso do COMSOL Multiphysics durante o desenvolvimento do trabalho.

À toda a equipe da secretaria de pós-graduação em Física e da biblioteca pelo auxílio, carinho e atenção durante a graduação e o mestrado.

À equipe da secretaria de pós-graduação em Física, que sempre foram muito solícitos e acessíveis para qualquer problema.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradeço à instituição por proporcionar o apoio financeiro fundamental necessário para conduzir esse projeto do início ao fim.

À instituição UERJ, que me possibilitou a formação no curso de graduação em Física e, agora, no mestrado, viabilizando a minha evolução profissional sem custos.

Desaprender para aprender. Deletar para escrever em cima. Houve um tempo em que eu pensava que, para isso, seria preciso nascer de novo, mas hoje sei que dá para renascer várias vezes nesta mesma vida. Basta desaprender o receio de mudar.

Martha Medeiros

RESUMO

PEREIRA, N. M. B. *Estudo, caracterização e simulação em COMSOL de fibras PCF visando a construção de um detector de radiação*. 2024. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física Armando Dias Tavares, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A proteção radiológica é de extrema importância, tornando-se um assunto atual e muito estudado. Além disso, detectores de radiação ionizante são fundamentais e obrigatórios por lei em qualquer local que trabalhe com ela, protegendo o ambiente e todos os seres vivos envolvidos. Dessa forma, existem diversos dispositivos cumprindo esse papel, porém, em geral, possuem alto custo de produção e venda, além de, geralmente, os mais acessíveis não possuem aferição instantânea. Com isso em vista, existem formas de superar esses entraves na produção de um detector de radiação, dentre elas, o uso de fibras ópticas e o fenômeno da radioluminescência. A fibra óptica é uma inovação tecnológica que revolucionou o meio como todos os seres humanos se comunicam, principalmente por ser considerada de baixo custo, pequena, leve, versátil e não ser danificada por radiação. Por essas razões, existem muitos usos para a fibra óptica, sendo o uso na fabricação de sensores, uma das principais aplicações para essa ferramenta. Como exemplos dessas aplicações, podem ser citados os sensores de movimento, sensores de substâncias, e os sensores de radiação. Já a radioluminescência ocorre ao incidir radiação ionizante em um material radioluminescente, que irá excitar os elétrons do material e, ao se desexcitar emitem fótons. Assim, esse fenômeno auxiliará na verificação instantânea da dose irradiada. Dessa forma, com o auxílio das fibras e de um material radioluminescente, seria possível viabilizar a construção de um sensor de radiação de baixo custo, que ao incidir radiação ionizante produza instantaneamente luz que será guiada ao longo do comprimento da fibra até um dispositivo fotossensível. Para tanto, alguns pontos devem ser examinados e testados, como por exemplo, a maneira pela qual material de fibra será utilizado, ou qual geometria de fibra maximizará o funcionamento do sistema, além de quais substâncias radioluminescentes são boas candidatas para essa finalidade. Para tal propósito, essa dissertação tem como objetivo o estudo e caracterização de quatro diferentes fibras do tipo PCF, *Photonic-crystal fiber*, com diferentes geometrias, como possíveis candidatas a dispositivo de armazenamento do material radiosensível e dispositivo de guiamento da luz. Com esse objetivo, realizaram-se microtomografias, de cada uma das fibras, que foram reconstruídas e segmentadas no programa *Avizo 3D* para mensurar suas propriedades geométricas. Complementando esse estudo, simulações, no programa COMSOL *multiphysics*, das PCFs em questão foram produzidas para comparação de qual geometria geraria um modo fundamental e central com a maior intensidade de campo elétrico e menor perda de confinamento.

Palavras-chave: fibras ópticas; *Photonic Crystal Fiber* (PCF); simulação no COMSOL *multiphysics*; microtomografia computadorizada.

ABSTRACT

PEREIRA, N. M. B. *Study, characterization and simulation in COMSOL of PCF fibers aiming at constructing a radioluminescent detector*. 2024. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física Armando Dias Tavares, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024

Radiological protection is vital, becoming a current and widely studied subject. In addition, ionizing radiation detectors are essential and legally mandatory in any place that works with them, protecting the environment and all living beings involved. Thus, several devices are fulfilling this role, however, in general, they have a high cost of production and sale, in addition to, generally, the most affordable ones do not have instant measurement. With this in mind, there are ways to overcome these obstacles in the production of a radiation detector, among them, the use of optical fibers and the phenomenon of radioluminescence. Optical fiber is a technological innovation that has revolutionized the way all human beings communicate, mainly because it is considered low-cost, small, light, versatile, and not damaged by radiation. For these reasons, there are many uses for optical fiber, with use in sensor manufacturing being one of the main applications for this tool. Examples of these applications include motion sensors, substance sensors, and radiation sensors. Radioluminescence, on the other hand, occurs when ionizing radiation falls on a radioluminescent material, which will excite the electrons of the material and, when it becomes deexcited, emit photons. Thus, this phenomenon will help in the instantaneous verification of the irradiated dose. In this way, with the help of fibers and a radioluminescent material, it would be possible to build a low-cost radiation sensor, which, when ionizing radiation falls, instantaneously produces light that will be guided along the length of the fiber to a photosensitive device. To do so, some points must be examined and tested, such as the way in which fiber material will be used, or which fiber geometry will maximize the operation of the system, as well as which radioluminescent substances are good candidates for this purpose. For this purpose, this dissertation aims to study and characterize four different PCF-type fibers, *Photonic-crystal fibers*, with different geometries, as possible candidates for radiosensitive material storage devices and light guidance devices. With this objective, micro-tomography was performed of each of the fibers, which were reconstructed and segmented in the *Avizo* 3D program to measure their geometric properties. Complementing this study, simulations, in the COMSOL *multiphysics* program, of the PCFs in question were produced to compare which geometry would generate a fundamental and central mode with the highest electric field strength and lowest confinement loss.

Keywords: optical fibers; Photonic Crystal Fiber (PCF); COMSOL multiphysics simulation; micro-computed tomography.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fibra óptica padrão | 21 |
| Figura 2 - Reflexão total interna..... | 22 |
| Figura 3 - Fibra monomodo e fibra multimodo..... | 23 |
| Figura 4 - Tipos de perda óptica em uma fibra óptica..... | 24 |
| Figura 5 - Fibra óptica de índice degrau e fibra de índice gradual..... | 25 |
| Figura 6 - Diferentes geometrias de fibra óptica | 26 |
| Figura 7 – Exemplos de modos de propagação na fibra com distribuição e padrão de intensidade do campo elétrico | 32 |
| Figura 8 - Diferentes modelos de PCF | 33 |
| Figura 9 - PCF <i>solid core</i> e PCF <i>hollow core</i> | 34 |
| Figura 10 - Processo de luminescência em cristais inorgânicos..... | 37 |
| Figura 11 - CT e Micro-CT | 40 |
| Figura 12 - Layout de um modo fundamental simulado em uma geometria de fibra PCF modelo Hollow_Core_D14748-7 no COMSOL <i>multiphysics</i> | 43 |
| Figura 13 - Modelos de PCF..... | 45 |
| Figura 14 - Bruker <i>Multiscale SkyScan</i> 2211 | 46 |
| Figura 15 - Esquema experimental do SkyScan..... | 47 |
| Figura 16 – Projeções e imagens reconstruídas (<i>slice</i>) dos quatro modelos de PCF..... | 48 |
| Figura 17 – Divisão das três amostras do modelo 1 | 49 |
| Figura 18 - Interface do <i>Segmentation room</i> | 50 |
| Figura 19 - Processo de segmentação do núcleo e fibra inteira do modelo 1 amostra A | 51 |
| Figura 20 - Segmentações do núcleo e fibra inteira para todos os modelos..... | 52 |
| Figura 21 - Diâmetro de Feret e Baricentros de um triângulo..... | 53 |
| Figura 22 - Comparação da segmentação semiautomática e manual para as paredes da fibra do modelo 1 | 54 |
| Figura 23 – Separação e numeração das paredes e casca externa por modelo de PCFs, respectivamente | 55 |
| Figura 24 - Imagem em formato PNG do modelo 1 para a simulação..... | 56 |
| Figura 25 - Seleção da sílica na geometria e suas propriedades no modelo 1 amostra A | 59 |
| Figura 26 - Seleção dos buracos de ar na geometria e suas propriedades no modelo 1 amostra A..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 27 - Diferentes <i>meshes</i> testados no modelo 1 da amostra A | 61 |
| Figura 28 - Artefatos de anel e linha nas <i>slices</i> | 72 |
| Figura 29 - Diferença nos baricentros de acordo com a esfericidade da circunferência | 73 |
| Figura 30 - Pontos analisados durante a simulação exemplificados no modo de propagação fundamental do modelo 1 amostra B | 76 |
| Figura 31 - Alguns dos diferentes modos de propagação gerados na simulação | 77 |
| Figura 32 - Melhor modo por modelo de fibra para 420 <i>nm</i> | 79 |
| Figura 33 - Melhor modo por modelo de fibra para 550 <i>nm</i> | 81 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Renomeação dos modelos de Photonic Crystal Fiber | 45 |
| Tabela 2 - Ordem de produção das simulações no COMSOL | 62 |
| Tabela 3 - Resultado do modelo 1 das segmentações Núcleo e Fibra inteira | 64 |
| Tabela 4 - Compatibilidade das medidas do Modelo 1 | 65 |
| Tabela 5 - Resultado do modelo 2 das segmentações Núcleo e Fibra inteira | 66 |
| Tabela 6 - Compatibilidade das medidas do Modelo 2 | 67 |
| Tabela 7 - Resultado do modelo 3 das segmentações Núcleo e Fibra inteira | 68 |
| Tabela 8 - Compatibilidade das medidas do Modelo 3 | 69 |
| Tabela 9 - Resultado do modelo 4 das segmentações Núcleo e Fibra inteira | 70 |
| Tabela 10 - Compatibilidade das medidas do Modelo 4 | 71 |
| Tabela 11 - Médias dos diâmetros das paredes internas e casca dos quatro modelos de fibra. | 74 |
| Tabela 12 – Intensidades de campo elétrico e perdas de confinamento dos melhores modos de cada modelo de fibra para 420 nm | 78 |
| Tabela 13 - Intensidades de campo elétrico e perdas de confinamento dos melhores modos de cada modelo de fibra para 550 nm | 80 |
| Tabela 14 - Melhores modos, com maior intensidade e sua respectiva perda, por modelo de fibra para os comprimentos de 420 nm e 550 nm | 82 |
| Tabela 15 - Espessura das paredes do Modelo 1 para as três amostras | 94 |
| Tabela 16 - Espessura da casca do Modelo 1 para as três amostras | 94 |
| Tabela 17 - Espessura das paredes do Modelo 2 para as três amostras | 95 |
| Tabela 18 - Espessura da casca do Modelo 2 para as três amostras | 95 |
| Tabela 19 - Espessura das paredes do Modelo 3 para as três amostras | 96 |
| Tabela 20 - Espessura da casca do Modelo 3 para as três amostras | 97 |
| Tabela 21 - Espessura das paredes do Modelo 4 para as três amostras | 97 |
| Tabela 22 - Espessura da casca do Modelo 4 para as três amostras | 97 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| ANVISA | Agência Nacional de Vigilância Sanitária |
| CNEN | Comissão Nacional de Energia Nuclear |
| COMSOL | <i>Software COMSOL Multiphysics</i> |
| CT | Tomografia Computadorizada |
| FDK | <i>FeldkampDavis-Kress</i> |
| FEM | Full-vectorial finite element method (método de elementos finitos totalmente vetorial) |
| IAEA | <i>International Atomic Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia Atômica) |
| MEV | Microscópio Eletrônico de Varredura |
| Micro-CT | <i>Micro Computed Tomography</i> (Microtomografia Computadorizada) |
| N° | Abreviação de número OSL <i>Optically Stimulated Luminescent</i> (Luminescência Ópticamente Estimulada) |
| PBG | <i>Photonic Bandgap</i> (Bandgap fotônico) |
| PCF | <i>Photonic crystal Fiber</i> |
| RISE | <i>Research Institutes of Sweden</i> |
| SUS | Sistema Único de Saúde |
| TL | Termoluminescência |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------------|---|
| $Al_2O_3:C$ | Óxido de Alumínio dopado com Carbono |
| MgB_4O_7 | Tetraborato de Magnésio |
| nm | Nanometro |
| n_1 | Índice de refração do meio 1 |
| n_2 | Índice de refração do meio 2 |
| θ | Ângulo que a luz faz com a normal em um meio qualquer |
| $\sin \theta$ | Senos do ângulo θ |
| $\theta_{critico}$ | Menor ângulo no qual ocorre reflexão total interna |
| c | Velocidade da luz no vácuo |
| v | Velocidade da luz no meio |
| \vec{E} | Vetor campo elétrico |
| \vec{B} | Vetor campo magnético |
| t | Tempo |
| μ | Permeabilidade magnética em um meio |
| ϵ | Permissividade elétrica em um meio |
| D | Densidade de fluxo elétrico |
| P | Polarização elétrica induzida |
| ϵ_0 | Permissividade elétrica no vácuo |
| H | Densidade de fluxo magnético |
| M | Polarização magnética induzida |
| μ_0 | Permeabilidade magnética no vácuo |
| ω | Frequência óptica |
| $\epsilon(\omega)$ | A constante dielétrica dependente da frequência |
| i | Número complexo |
| α | Coefficiente de absorção do meio |
| $n(\omega)$ | Índice de refração |
| $\alpha(\omega)$ | Coefficiente de absorção |
| E_z | Solução da equação de onda para fibras ópticas |
| ρ | Coordenada radial |
| ϕ | Coordenada azimutal |

| | |
|-------------------------------------|--|
| z | Coordenada z |
| k_0 | Número de onda no vácuo |
| $F(\rho)$ | Solução radial |
| $\Phi(\phi)$ | Solução azimutal |
| $Z(z)$ | Solução em z |
| β | A constante de propagação da solução em Z |
| m | A constante de propagação da solução em Φ |
| A, A', C e C' | Constantes |
| J_m, Y_m, K_m e I_m | Diferentes tipos de funções de Bessel |
| p | Um parâmetro definido por $p^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2$ |
| q | Um parâmetro definido por $q^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2$ |
| a | Raio do núcleo da fibra óptica |
| μm | Micrometro |
| I | Intensidade do feixe transmitida |
| I_0 | Intensidade do feixe inicial |
| μ_{at} | Coefficiente de atenuação do meio |
| x | Espessura do material |
| $A(x)$ | Área da superfície do objeto |
| <i>Volume3D</i> | Volume do objeto |
| <i>voxels</i> | Número de <i>voxels</i> no objeto |
| <i>cx cy, cz</i> | Coordenadas de um <i>voxel</i> |
| f_0 | Símbolo para frequência em um determinado comprimento de onda no COMSOL <i>multiphysics</i> |
| v_0 | Símbolo para velocidade da luz no vácuo (???) no COMSOL <i>multiphysics</i> |
| lda | Símbolo para um comprimento de onda qualquer no COMSOL <i>multiphysics</i> |
| $Loss \left(\frac{dB}{km} \right)$ | Perda em decibéis por quilômetro |
| λ | Comprimento de onda |
| $Im(n_{eff})$ | Parte imaginária do índice de refração |
| σ_x | Desvio padrão |
| x_i | Valor na posição i do conjunto de dados |
| \bar{x} | Média aritmética dos dados |
| N | Quantidade de dados disponíveis |

| | |
|-------------|---------------------------|
| σ | Erro padrão |
| σ_A | Desvio padrão da medida A |
| σ_B | Desvio padrão da medida B |
| \bar{x}_A | Estimativa da medida A |
| \bar{x}_B | Estimativa da medida B |
| V/m | Volts por metro |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 1.1 | Fibras ópticas..... | 21 |
| 1.1.1 | <u>Aspectos gerais</u> | 21 |
| 1.1.2 | <u>Modos de propagação</u> | 27 |
| 1.1.3 | <u>Photonic Crystal Fiber (PCF).....</u> | 32 |
| 1.2 | Material radioluminescente..... | 36 |
| 1.3 | Microtomografia computadorizada..... | 36 |
| 1.3.1 | <u>Aspectos gerais.....</u> | 38 |
| 1.3.2 | <u>Reconstrução de imagem</u> | 41 |
| 1.3.3 | <u>Segmentação da imagem.....</u> | 41 |
| 1.4 | Simulação computacional de fibras ópticas | 42 |
| 2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 45 |
| 2.1 | Preparação das amostras | 45 |
| 2.2 | Aquisição das microtomografias e reconstrução das imagens | 46 |
| 2.3 | Segmentação das PCFs no <i>Avizo 3D</i> | 48 |
| 2.3.1 | <u>Erros associados ao conjunto de medidas da <i>label analysis</i></u> | 56 |
| 2.4 | Simulações computacionais no COMSOL <i>multiphysics</i>..... | 58 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 63 |
| 3.1 | Resultado da caracterização das PCFs..... | 63 |
| 3.2 | Resultado das simulações computacionais no COMSOL <i>multiphysics</i> | 75 |
| | CONCLUSÃO..... | 84 |
| | PERSPECTIVAS FUTURAS..... | 87 |
| | REFERÊNCIAS | 87 |
| | APÊNDICE A – Tabelas com os resultados da segmentação paredes da fibra...94 | |

INTRODUÇÃO

A radiação é definida como a energia que se propaga de um ponto ao outro e é emitida por uma fonte e transmitida por diversos meios, interagindo com a matéria. Ela pode ser classificada em radiação ionizante, toda a radiação que possui energia o suficiente para ionizar um átomo, ou seja, retirar um elétron do átomo, e não ionizante. Por produzir ionizações ao interagir com um meio, a radiação ionizante pode gerar diversos efeitos ao interagir com tecidos biológicos por exemplo, que, em altas doses, podem gerar mutações e doenças graves (Okuno; Yoshimura, 2010).

Existe uma área de estudo dedicada apenas à proteção radiológica. E, dentro dela, existem normas internacionais, ditadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, em inglês, International Atomic Energy Agency), e nacionalmente, cada país pode impor mais especificações com regras e sugestões de proteção radiológica a qualquer estabelecimento que possuía tecnologia radiológica.

No Brasil, em publicação no Diário Oficial da União em 2022 da resolução N° 611, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA estabelece, em conjunto com o Sistema Único de Saúde, SUS, e a Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, diversas normas de proteção radiológica. Entre elas, regras que precisam ser atendidas para uso de radiação ionizante em clínicas, hospitais e indústria. Além disso, impõe que cada profissional exposto a radiação utilize um dosímetro pessoal que deve ser lido a cada trinta dias (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2022).

Por isso, detectores de radiação ionizante são de extrema importância na sociedade atual, principalmente na área da saúde e de energia nuclear. Sua importância é vital para evitar desastres com altas contaminações em ambientes e seres humanos, principalmente os dosímetros que detectam o nível de radiação a todo momento. Dessa forma, é uma área muito desenvolvida com diversas categorias e modelos, dentre eles, dosímetros, câmaras de ionização, cintiladores, filmes e outros dispositivos (Tauhata *et al.*, 2013).

Porém, algo em comum a todos os dosímetros é o custo elevado. Além disso, poucos possuem leitura instantânea de radiação (Zubair *et al.*, 2019). Em vista disso, foi pensada a construção de um dosímetro de radiação que superasse essas limitações. Nele seria utilizado um material com baixo custo de produção e sensível a radiação que permitisse a leitura instantânea. A melhor opção para esta função é um material radioluminescente, que ao receber a radiação, luminesce instantaneamente, ou seja, há a emissão de fótons de imediatamente.

Para o desenvolvimento do novo dispositivo sensor, as fibras ópticas foram prontamente consideradas pois são dispositivos que transportam luz por seu comprimento, muito usados para aplicações em telecomunicações desde o século passado. Contudo, sua utilização é diversificada e um de seus principais empregos é em sensoriamento. Sendo utilizado para monitoramento em ambientes extremos, perigosos (como usinas nucleares) ou em longas distâncias e medindo mudanças de fase da luz, de comprimento de onda e espalhamento, entre outros (Pendão; Silva, 2022).

Ademais, as fibras são ótimas candidatas para sensoriamento por demonstrarem diversas vantagens comparadas a outros sensores. Dentre as vantagens estão ter um custo acessível na casa das centenas de reais, serem altamente sensíveis, imunes a interferências, livres da influência da umidade, insolubilidade em água, terem excelente resolução espacial e terem diversidade de pontos sensoriais (Zubair *et al.*, 2019). E ainda, serem pequenas, leves, resistentes a altas temperaturas e pressão (Pendão; Silva, 2022).

Com todas essas vantagens, a fibra óptica se comprova como uma candidata para a construção de um dispositivo sensor de radiação. Inicialmente, esse dispositivo funcionaria da seguinte forma: a fibra seria utilizada como um porta-amostra para um material radioluminescente, que ao ser irradiado, causa uma excitação nos elétrons que ao voltarem para o seu estado fundamental emitem fótons, liberando energia na forma de luz, e essa luminescência seria transportada ao longo da mesma fibra óptica.

Contudo, para a construção desse dispositivo, alguns pontos devem ser analisados. Entre eles, os principais são qual material e geometria de fibra maximizariam o funcionamento do sistema, ou seja, qual fibra conseguiria servir de porta amostra e ainda assim, guiar a luz com a menor perda possível. E, além disso, qual material radioluminescente funcionaria melhor para tal finalidade.

Nesse intuito, estudando diferentes geometrias de fibras, as fibras de cristal fotônico ou PCFs (do inglês, *Photonic-crystal fibers*), foi pensada como uma boa candidata ao papel duplo no detector. As PCFs são fibras com uma estrutura interna periódica feita de capilares preenchidos com ar (Buczynski, 2004), ou seja, o material radioluminescente, normalmente feito de um material em pó, poderia ser colocado dentro de um ou de todos os capilares e ao luminescer, a fibra também serviria para o guiamento de luz.

As PCFs têm inúmeras vantagens para as mais variadas aplicações se comparadas as fibras tradicionais, principalmente porque foram desenvolvidas levando o sensoriamento em consideração. Entre esses benefícios estão, alta sensibilidade, flexibilidade de *design*, alta birrefringência, perda muito baixa, infinita propagação de monomodo ao longo de uma gama

de comprimento de onda (tipo de transmissão de luz em fibras ópticas que permite apenas um modo de luz se propagar através do núcleo da fibra), entre outros (De; Gangopadhyay; Singh, 2019).

Assim, observa-se que por vários motivos as PCFs se enquadram muito bem no papel pensado para elas nesse trabalho. Principalmente por desenvolver dois papéis naturalmente, de porta amostra e guia de luz, e pela diversidade de geometrias, suas perdas muito baixas se comparadas com as fibras tradicionais e alta sensibilidade.

Com relação a escolha do material radioluminescente, alguns materiais foram cogitados, e pesquisando sobre detectores de radiação, cristais inorgânicos são os mais utilizados e muitos produzem o fenômeno da radioluminescência, que, por consequência, se tornam a melhor opção para esse projeto. Dentre diversos cristais pesquisados, o óxido de alumínio, conhecido também como alumina dopada com carbono ($Al_2O_3:C$) e tetraborato de magnésio (MgB_4O_7) foram selecionados e suas propriedades, encontradas na literatura, utilizadas para as simulações em COMSOL. Dessa maneira, será possível observar qual dos materiais se encaixa melhor ao sistema antes de comprá-lo e, efetivamente, fabricar o dispositivo.

Portanto, o objetivo desse trabalho é o estudo, caracterização e simulação de *PCFs* com diferentes geometrias com dois materiais radioluminescentes para testar sua viabilidade na construção futura de um dispositivo sensor radioluminescente. Para isso, foi feita a aquisição de microtomografias de quatro PCFs em um tomógrafo de bancada. Após o processo de reconstrução das imagens, realizou-se a segmentação das imagens, no programa *Avizo 3D*, das quatro fibras. Assim, foi possível realizar a caracterização das PCFs, com o resultado das segmentações, obtendo o diâmetro de Feret, área, volume, baricentros e grossuras de suas paredes.

Além disso, foram produzidas simulações computacionais no programa COMSOL *multiphysics* da geometria de superfície dos quatro modelos de fibra, para luminescência em dois comprimentos de onda, 420 nm e 550 nm. Assim, obtendo a parte real e imaginária do índice de refração para cada uma delas, para inúmeros modos de propagação que resolvem a equação de onda. Em seguida, o cálculo da perda de luz para cada uma das fibras em cada comprimento de onda foi executado. Por fim, houve a análise dos resultados da simulação e perda, com propósito de indicar qual material e geometria de fibra mais se adequa ao sistema, oferecendo um modo de propagação com menor perda e maior intensidade de campo elétrico.

O corpo principal dessa dissertação está dividido em três capítulos, Fundamentação Teórica, Materiais e Métodos e Resultados e Discussões. No capítulo 1, será introduzida

toda a contextualização teórica empregue nesse trabalho contendo todas as propriedades e parâmetros físicos necessários para compreensão. Discorrendo sobre o funcionamento, propriedades e importância das fibras ópticas, chegando a uma subsecção específica para fibras PCF, com suas características e a equação de perda. Posteriormente, são abordados os tópicos de material radioluminescente, microtomografia computadorizada, segmentação de imagens e o programa COMSOL *Multiphysics*.

No capítulo 2, são apresentados os materiais e métodos utilizados durante a execução do trabalho. Sendo eles, a preparação das amostras, a aquisição das microtomografias, a reconstrução das imagens, a segmentação das imagens e a caracterização geométrica, obtenção do diâmetro geométrico, diâmetro de Feret e espessura das paredes, feitas no programa *Avizo 3D* para cada uma delas. Além disso, as simulações computacionais de modos de propagação da luz nas PCFs produzidas no COMSOL *Multiphysics*.

No capítulo 3, serão apresentados e discutidos os resultados. Assim, primeiramente será analisada a caracterização comparando as amostras de uma mesma geometria de fibra, constatando se são iguais ou não. E, em seguida, a avaliação das simulações computacionais, observando os parâmetros utilizados para obtenção e comparando intensidade de campo elétrico e perda entre as quatro possibilidades estabelecendo a melhor opção para cada comprimento de onda. E, por último, verificar se os materiais radioluminescentes pressupostos operariam bem nas PCFs estudadas.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Fibras ópticas

A fibra óptica é uma inovação tecnológica que revolucionou o meio como todos os seres humanos se comunicam. Desde os anos 70, as fibras vêm mudando todo o sistema de telecomunicações. Estima-se que nas primeiras décadas posteriores, cem milhões de quilômetros de fibras já haviam sido instalados e com o passar do tempo essa quantidade só aumentou (Hecht, 2002).

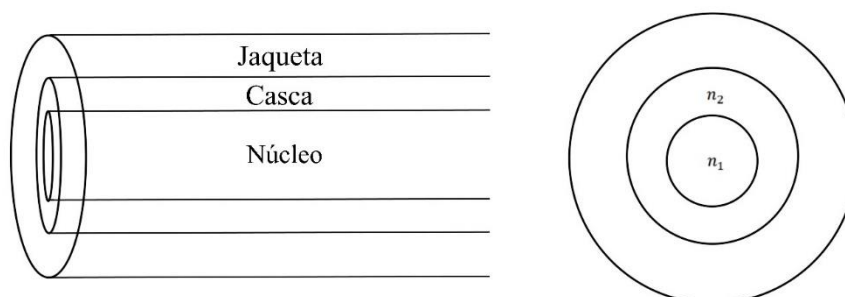
Mais recentemente, outras áreas de atuação se interessaram pelas fibras, gerando grandes avanços em campos como o sensoriamento, obtendo dispositivos que medem diversas grandezas, mostrando a versatilidade das fibras ópticas (Hecht, 2002). Dessa forma, se tornando uma das principais e mais qualificadas opções para esse tipo de dispositivo (Pendão; Silva, 2022).

1.1.1 Aspectos gerais

A fibra óptica pode ser produzida com dióxido de silício (SiO_2), mais conhecido como sílica, ou plástico. A fibra padrão para telecomunicações é constituída de sílica pura e ao ser produzida, uma dopagem é feita, geralmente com germânio ou fósforo, no núcleo gerando uma ligeira mudança no índice de refração. Essa dopagem produz um índice de refração para o núcleo um pouco maior que para o índice ao seu redor, chamado de casca, que está diretamente ligado ao guiamento de luz dentro dela (Agrawal, 2001).

Após o processo de produção a fibra será coberta por películas de proteção chamadas de “jaqueta”, que garantirá que impurezas externas ou qualquer tipo de luz externa alcance a sílica. O esquema de montagem de uma fibra padrão pode ser visto na figura 1 abaixo:

Figura 1 - Fibra óptica padrão



Legenda: Divisão dos constituintes da fibra, núcleo e casca, e da jaqueta de proteção.
Fonte: Crisp, 2001, p. 25. Adaptado pela autora.

O funcionamento da fibra óptica padrão depende exclusivamente do fenômeno da reflexão interna total. Por esse motivo, no processo de produção, uma dopagem é realizada. Esse efeito funciona da seguinte forma, se um feixe de luz transita por um meio com índice de refração n_1 em direção a outro meio n_2 , sendo $n_1 > n_2$, ao chegar a interface que divide os dois meios o feixe de luz irá ser completamente refletido se o ângulo de incidência da luz for maior que o ângulo crítico (Figura 2) de acordo com a Lei de Snell-Descartes (1) para a óptica geométrica (Crisp, 2001).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

$$\theta_{crítico} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

n_1 – Índice de refração do meio 1

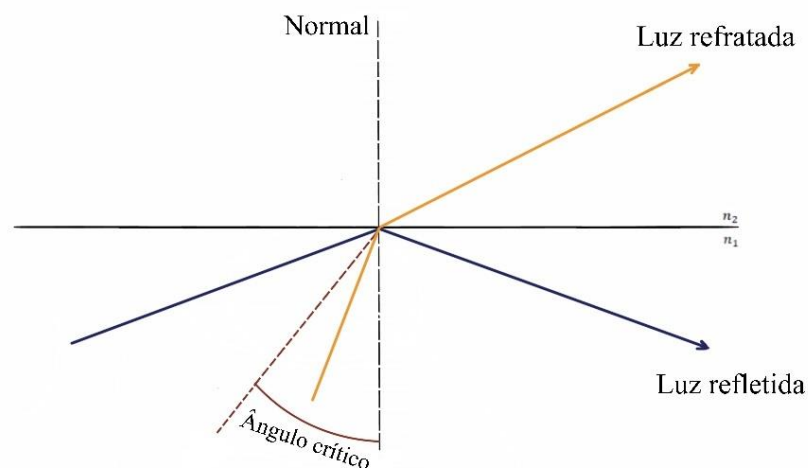
θ_1 – Ângulo que a luz faz com a normal no meio 1

n_2 – Índice de refração do meio 2

θ_2 - Ângulo que a luz faz com a normal no meio 2

$\theta_{crítico}$ – Menor ângulo no qual ocorre reflexão total interna

Figura 2 - Reflexão total interna



Legenda: Fenômeno da reflexão total interna, onde se observa que se o ângulo de incidência do feixe for menor que o crítico, o feixe refrata. Já se o ângulo de incidência for maior que o crítico, o feixe reflete.

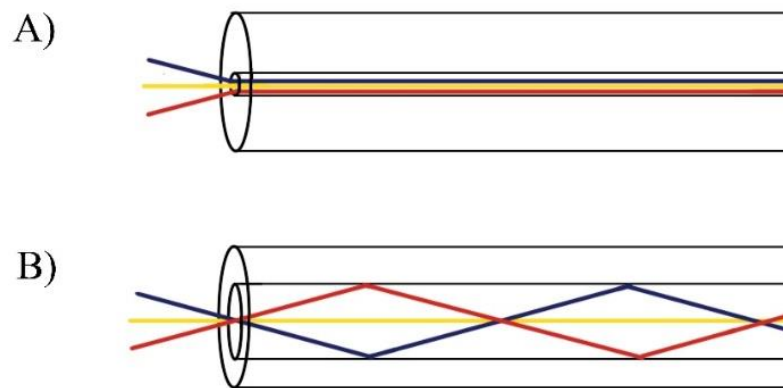
Fonte: Crisp, 2001, p. 15. Adaptado pela autora.

Semelhantemente, dentro do núcleo de uma fibra óptica o feixe de luz pode atravessar seu comprimento com várias reflexões totais ao longo da trajetória, e, é assim que a luz será guiada até o fim do cabo. Uma maneira alternativa a anterior, seria o feixe de luz percorrer

a fibra em linha reta, nunca encostando na interface núcleo-casca. Com isso em mente, pode-se classificar os diferentes modos com que a luz pode ser guiada e, assim, duas categorias são criadas para distinguir quando uma fibra produz cada um desses modos (Hecht, 2002).

Se apenas a segunda maneira acontece, o feixe de luz se propaga em linha reta sem encostar nas bordas, dizer-se que a fibra é monomodo, ou seja, o único modo possível é o mais fundamental. Já quando a primeira e a segunda maneira coexistem, diversos modos podem existir, onde vários ângulos de reflexão serão produzidos, gerando diversos feixes de luz diferentes. Nesse caso, a fibra é dita multimodo (Crisp, 2001). Exemplos dessas fibras se encontram na figura 3, abaixo:

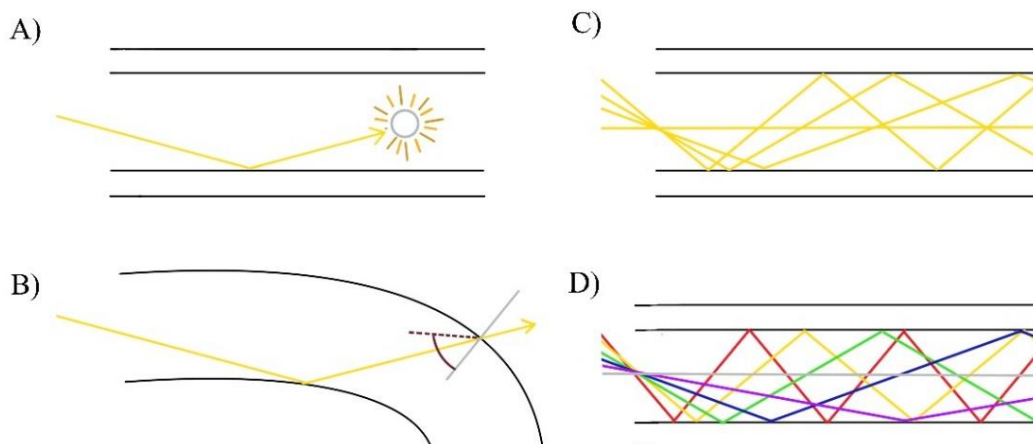
Figura 3 - Fibra monomodo e fibra multimodo



Legenda: Modos de propagação dentro da fibra monomodo (A) e na fibra multimodo (B).
Fonte: Crisp, 2001, p. 36. Adaptado pela autora.

Apesar do funcionamento da fibra depender apenas da reflexão interna total, a sua boa operação depende de um fator principal, o tamanho da perda óptica total que ela produz. As perdas podem ser geradas por diversos fatores, uns estruturais como imperfeições na sílica (bolhas, micro curvaturas ou ligeiras mudanças no índice de refração do meio em questão) ou sujeiras não detectadas no processo de fabricação que causam absorção ou espelhamento da luz (Figura 4 – A). Além disso, existem perdas por macro curvaturas, quando a fibra é curva em de tal forma que o ângulo de incidência da luz não será maior que o crítico e o feixe será transmitido do núcleo para a casca, causando perda de sinal (Figura 4 – B) (Crisp, 2001).

Figura 4 - Tipos de perda óptica em uma fibra óptica



Legenda: Algumas das possíveis perdas que uma fibra óptica pode sofrer, sendo A) espalhamento da luz por imperfeição, B) perda por curvatura, C) dispersão modal e D) dispersão cromática.

Fonte: Crisp, 2001, p. 51-63. Adaptado pela autora.

Outro fator importante são as perdas por dispersão do feixe de luz (Figura 4 – C e D). Quando dois raios de luz se movem em trajetórias diferentes em um mesmo material, o momento em que cada um deles chegará ao final do percurso será diferente. Isto acontece porque a velocidades desses feixes depende de dois fatores, do comprimento de onda da luz e do índice de refração do meio (Hecht, 2002).

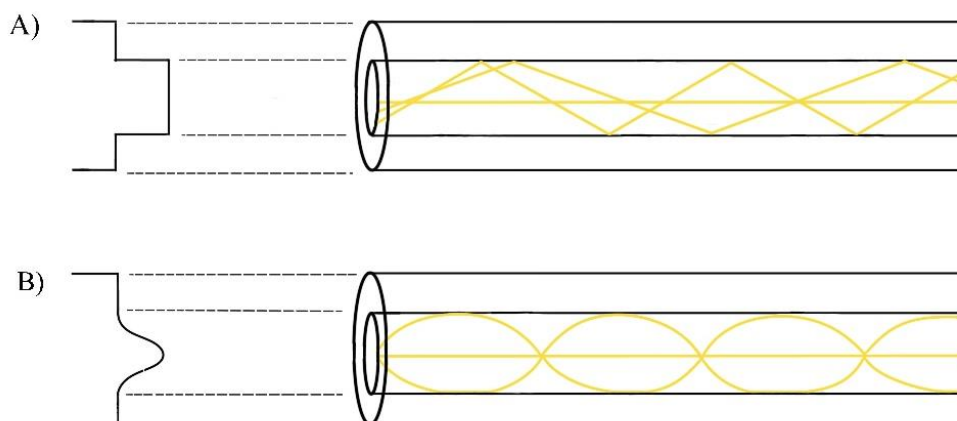
Quando o feixe é monoenergético e a fibra multimodo, o percurso pode variar de acordo com o modo com que a luz se propaga. Por exemplo, um feixe de luz amarela que tem trajetória em linha reta chegará ao fim da fibra antes de um que sofre reflexões internas totais até o fim dela (Figura 4 – C). Dessa forma, um sinal que iniciou o trajeto no mesmo momento, chegará ao final em momentos diferentes ocasionando em perda de informação.

Por outro lado, se o feixe for polienergético, como a luz branca, cada uma das “cores” do feixe terão um comprimento de onda característico diferente. Isso causará uma dispersão cromática, na qual, cada uma das diferentes cores chegará em um momento diferente ao final do trajeto (Figura 4 - D). Tendo como consequência, da mesma forma, a perda de informação (Hecht, 2002).

Para minimizar as perdas por dispersão, outro perfil de fibra foi criado. As primeiras fibras produzidas tinham índice degrau, ou seja, um índice de refração para o núcleo e outro um pouco menor para a casca. A fibra criada para minimizar essa dispersão tem índice de refração gradual ao longo do núcleo, dessa forma, o índice de refração no núcleo é maior no

centro e decresce conforme se aproxima da interface núcleo-casca (Crisp, 2001). Um esquema dos dois perfis de fibra pode ser visto na figura 5 abaixo.

Figura 5 - Fibra óptica de índice degrau e fibra de índice gradual



Legenda: Dois perfis de índice de refração diferentes para o núcleo da fibra óptica, em A) a fibra de índice degrau e em B) a fibra gradual.

Fonte: Crisp, 2001, p. 63. Adaptado pela Autora.

A fibra de índice gradual é baseada no fato de que o índice de refração do meio é inversamente proporcional a velocidade da luz no meio, de acordo com a equação 3, que relaciona o índice de refração e a velocidade da luz. Assim, os modos em que o feixe transita pela área mais externa do núcleo tem maior velocidade que o modo onde o feixe se move apenas pelo centro do núcleo.

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

Sendo,

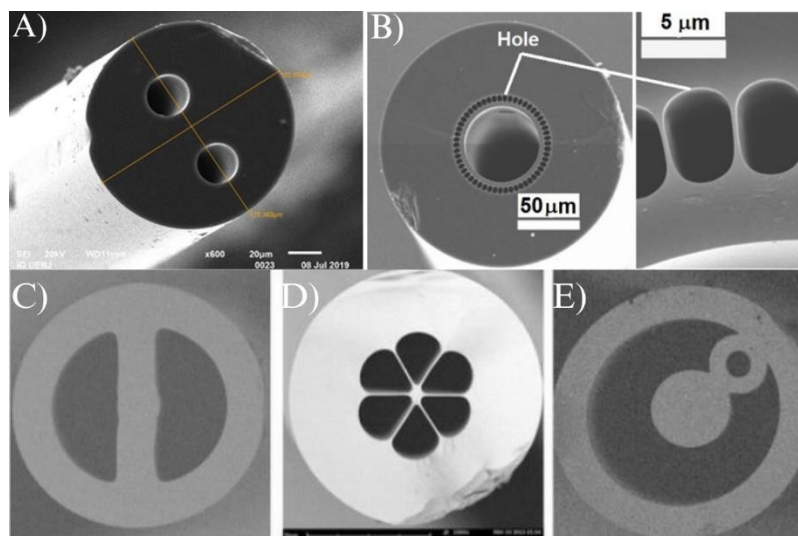
n – O índice de refração do meio

c - Velocidade da luz no vácuo

v – Velocidade da luz no meio

As fibras ópticas são extremamente versáteis e podem ser produzidas com diversos tamanhos e geometrias de acordo com a necessidade e aplicação, variando tamanho de núcleo e casca, número de núcleos, valor do índice de refração, com buracos preenchidos com ar e entre outros (Hecht, 2002; Russell, 2003). Na figura 6 é possível observar a variedade de geometrias de fibras ópticas que podem ser produzidas.

Figura 6 - Diferentes geometrias de fibra óptica



Legenda: Diversos modelos de fibras microestruturadas.

Fonte: A) Colaço *et al.*, 2021, p. 4; B) Mescia; Prudenzano, 2013, p. 15; C), D) e E) Liu; Tam, 2018, p. 4.

Logo, com uma grande quantidade de variações, as aplicações desse material são inúmeras. A mais conhecida é relativa às telecomunicações, porém a fibra pode ser utilizada em diversos sistemas físicos. Isso se deve às diversas características que propiciam o uso desse material, como: ter baixo custo de aquisição na casa das centenas de reais, não ser afetada por campos eletromagnéticos, ser portátil, ter dimensões de núcleo e casca na ordem do micrômetro (Pendão; Silva, 2022), possuir pouca perda de informação ao longo de grandes distâncias e ter a capacidade de suportar situações extremas, como não sofrer o processo de corrosão e ferrugem como os cabos de cobre tradicionais e não ser danificada por radiação (Souza, *et al.*, 2019).

A área em que as fibras mais se destacam, além da telecomunicação, é em sensoriamento. Por todas as vantagens descritas anteriormente, as fibras ópticas são ótimas candidatas a serem sensores em diversas áreas da ciência. Tendo trazido soluções para essa área em diversas aplicações como, por exemplo, no meio ambiente (Gouveia, 2008), na química (Acosta Pérez; Suárez Castrillón; Suárez Castrillón, 2016), na saúde (Camara, 2015) e entre outras.

Apesar das vantagens estruturais e mecânicas da fibra o principal fator que a torna uma grande candidata para sensoriamento é o papel físico dual o qual ela desempenha. O fato dela mensurar diversos parâmetros apenas por mudanças em propriedades da luz propagada, e ainda funcionar como um cabo transmitindo informação em uma comunicação

adicional, é uma grande vantagem se comparada com outras tecnologias de sensoriamento (Pendão; Silva, 2022).

Além disso, sensores a fibra óptica podem ser classificados de acordo com vários aspectos, como o tipo de parâmetro que vão medir, químico, físico ou biomédico. Outra classificação importante é com relação ao tipo de sensor, podendo ser intrínsecos ou extrínsecos/híbridos. No primeiro caso a fibra desempenha o papel de material sensor e transporte de sinal óptico ao mesmo tempo. Enquanto para o segundo, o cabo de fibra é utilizado apenas para comunicação, guiando a luz para/até o ponto no qual o sensor óptico se encontra (Pendão; Silva, 2022).

Na área da saúde, especificamente, existem protótipos de sensores para detectar doenças, substâncias e até radiação no ser humano, sendo, este último, um dispositivo dosimétrico capaz de medir a taxa de dose de radiação ionizante em um ambiente, no corpo humano, em um órgão ou em um tecido (Souza *et al.*, 2019). Com o auxílio das fibras, torna-se possível medir em tempo real a dose de radiação por meio do fenômeno da radioluminescência (Polf *et al.*, 2004).

Por essas razões, o estudo de fibras é um fator importante e imprescindível para a criação de qualquer tipo de sensor, principalmente para entender a perda de luz dentro da fibra, pois se houver grande perda de luz não será possível propagar o feixe até o final do cabo. Assim, é possível determinar se a fibra estará apta ou não para o propósito pensado.

1.1.2 Modos de propagação

Para entender como funciona a propagação de luz dentro de uma fibra óptica e seus modos de propagação, deve-se iniciar a partir das equações de Maxwell, que regem todos os fenômenos eletromagnéticos (Agrawal, 2001). Dessa forma, abaixo está o conjunto de equações de Maxwell para meios dielétricos (4-7).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss da Eletricidade}) \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss do Magnetismo}) \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday}) \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = -\mu\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Ampère – Maxwell}) \quad (7)$$

Sendo,

\vec{E} – O vetor campo elétrico

\vec{B} – O vetor campo magnético

μ – Permeabilidade magnética do material

ε – Permissividade elétrica do material

t - Tempo

Essas relações são necessárias para a obtenção da Equação de Onda, que descreve a propagação de luz ao longo de uma fibra óptica. Para isso, utilizando a Lei de Faraday (6) e a Lei de Ampère-Maxwell (7), a densidade de fluxo elétrico (8) e magnético (9) e se valendo do fato de que as fibras são meio não-magnéticos, a magnetização pode ser considerada zero. Assim, chega-se à equação 10 (Agrawal, 2001).

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (8)$$

$$B = \mu_0 H + M \quad (9)$$

$$\nabla \times \nabla \times E = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (10)$$

Sendo,

D – Densidade de fluxo elétrico

ε_0 – Permissividade elétrica no vácuo

E – Vetor campo elétrico

P – Polarização elétrica induzida

B – Densidade de fluxo magnético

μ_0 – Permeabilidade magnética no vácuo

H – Vetor campo magnético

M – Polarização magnética induzida

c – A velocidade da luz no vácuo, dada por $c^2 = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}$

Para completar a relação, uma associação entre o campo elétrico e a polarização se faz necessária. Se a solução para efeitos não lineares de terceira ordem for utilizada, a polarização induzida consiste em duas partes (11) (Agrawal, 2001).

$$P(r, t) = P_L(r, t) + P_{NL}(r, t) \quad (11)$$

Sendo,

$P(r, t)$ – Polarização induzida total

$P_L(r, t)$ – Parte linear da polarização

$P_{NL}(r, t)$ – Parte não linear da polarização

E, considerando que efeitos não lineares em fibras de sílica são relativamente fracos por ser um material amorfo, para baixas intensidades, pode-se condicionar que existem apenas pequenas perturbações na polarização induzida total. Assim, chega-se a equação 12, sendo ela, a equação 10 modificada para o domínio das frequências (Agrawal, 2001).

$$\nabla \times \nabla \times \tilde{E}(r, \omega) - \varepsilon(\omega) \frac{\omega^2}{c} \tilde{E}(r, \omega) = 0 \quad (12)$$

Sendo,

$\tilde{E}(r, \omega)$ – A transformada de Fourier definida como $\tilde{E}(r, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(r, t) \exp(i\omega t) dt$

$\varepsilon(\omega)$ – A constante dielétrica dependente da frequência, dada por $\varepsilon(\omega) = 1 + \tilde{\chi}^{(1)}(\omega)$.

Sendo, $\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)$ a transformada de Fourier de $\chi^{(1)}(\omega)$.

ω – Frequência do campo óptico

c – Velocidade da luz no vácuo

Como, geralmente a constante dielétrica $\varepsilon(\omega)$ e a transformada de Fourier $\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)$, são complexas, pode-se relacioná-las com a coeficiente de refração $n(\omega)$ e o coeficiente de absorção $\alpha(\omega)$, usando a definição dada na equação 13. E, além disso, com suas respectivas relações com $\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)$, equações (14) e (15) (Agrawal, 2001).

$$\varepsilon = \left(n + \frac{i\alpha c}{2\omega} \right)^2 \quad (13)$$

$$n(\omega) = 1 + \frac{1}{2} \text{Re}[\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)] \quad (14)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{nc} \text{Im}[\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)] \quad (15)$$

Sendo,

n – O índice de refração do meio

α – Coeficiente de absorção do meio

$n(\omega)$ – Coeficiente de refração

$\text{Re}[\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)]$ – Parte real de $\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)$

$\alpha(\omega)$ – Coeficiente de absorção

$\text{Im}[\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)]$ – Parte imaginária de $\tilde{\chi}^{(1)}(\omega)$

Desse modo, com o auxílio das equações (13-15), de uma identidade vetorial, equação (16), e considerando que $\nabla \cdot D = \varepsilon \nabla \cdot E = 0$, determina-se à equação de onda para as fibras ópticas, descrita pela equação 17.

$$\nabla \times \nabla \times E \equiv \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = -\nabla^2 E \quad (16)$$

$$\nabla^2 \tilde{E} + n^2(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} \tilde{E} = 0 \quad (17)$$

Para a dedução dos modos de propagação, apenas a parte espacial da equação de onda será resolvida pois é ela que determina o padrão dos modos de propagação na geometria, foco de interesse desse trabalho. Com isso em mente, é interessante reescrever a parte espacial da equação de onda em coordenadas cilíndricas (equação 18), para se beneficiar da simetria das fibras ópticas que possuem formato de um cilindro.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 E_z = 0 \quad (18)$$

Onde,

E_z – A solução da equação

ρ – Coordenada radial

ϕ - Coordenada azimutal

z – Coordenada longitudinal

k_0 – Número de onda no vácuo, dado por $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$

A equação (18) pode ser resolvida pelo método de separação de variáveis, com solução na forma de:

$$E_z(\rho, \phi, z) = F(\rho)\Phi(\phi)Z(z) \quad (19)$$

Onde,

$F(\rho)$ – Solução radial

$\Phi(\phi)$ – Solução azimutal

$Z(z)$ – Solução em z

Quando aplicada a equação 18 à equação 19 são geradas três equações diferenciais ordinárias como solução (20-22). As soluções em Z e Φ tem significado físico relacionado a constante de propagação β e m , sendo a última restrita a valores inteiros já que o campo é periódico em ϕ (Agrawal, 2002).

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + \beta^2 Z = 0 \quad (20)$$

$$\frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} + m^2 \Phi = 0 \quad (21)$$

$$\frac{d^2 F}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dF}{d\rho} + \left(n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right) F = 0 \quad (22)$$

Onde,

β – É a constante de propagação em Z

m – É a constante de propagação em Φ

Já a solução da parte radial, é dada pelas funções de Bessel, com soluções gerais para as regiões do núcleo e da casca, equação 23, (Agrawal, 2002). A solução das funções de

Bessel para cada modo juntas, resultarão no conjunto de todos os modos de propagação dentro da fibra óptica, ou seja, todas as possibilidades de como a luz pode se propagar.

$$F(\rho) = \begin{cases} AJ_m(p\rho) + A'Y_m(p\rho); & \rho \leq a \\ CK_m(q\rho) + C'I_m(q\rho); & \rho > a \end{cases} \quad (23)$$

Sendo,

A, A', C e C' - Constantes

J_m, Y_m, K_m e I_m – Diferentes tipos de funções de Bessel

p – Um parâmetro definido por $p^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2$, onde n_1 é o índice de refração do núcleo

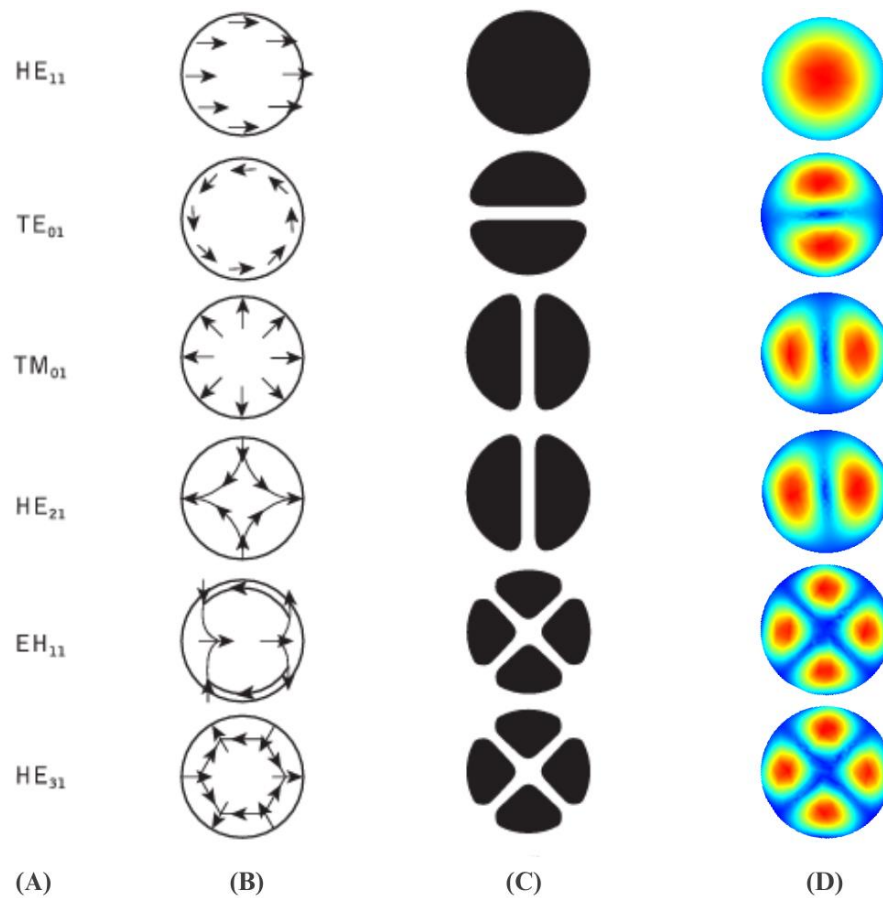
q – Um parâmetro definido por $q^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2$, onde n_2 é o índice de refração da casca

a – Raio do núcleo

Os modos de propagação são considerados diferentes de acordo com a distribuição e padrão de intensidade do campo elétrico. Na figura 7, é possível observar os modos de propagação que demonstram algumas das primeiras soluções da equação de onda, onde a função de Bessel correspondente define o padrão de intensidade apresentado. Nela, pode-se notar que o modo fundamental, nomeado como HE_{11} , tem padrão de distribuição de campo elétrico mais intenso no centro e com uma diminuição de intensidade em direção às bordas.

Além disso, outros padrões de intensidade podem ser vistos nos outros modos da figura 7, com distribuição do campo elétrico dividida em dois ou quatro pontos. Vale ressaltar, que esses não são os únicos padrões possíveis, existem diversos outros modos com intensidades de campo elétrico mais complexas, porém não serão abordados nesse trabalho.

Figura 7 – Exemplos de modos de propagação na fibra com distribuição e padrão de intensidade do campo elétrico



Legenda: Exemplos de alguns dos primeiros modos que são solução da equação de onda. Em (A) o nome de cada modo, onde, H e E representam o campo magnético e o campo elétrico e TM e TE representam quando $H_z = 0$ e $E_z = 0$. Em (B) se observa a distribuição e em (C) o padrão de intensidade, ambos, do campo elétrico. Em (D) está uma representação com cores do padrão de intensidade dos modos correspondentes produzido no COMSOL *multiphysics* pela autora.

Fonte: Senior; Jamro, 2009, p. 37. Adaptado pela autora.

Portanto, com o auxílio dessas equações, é possível calcular os modos de propagação dentro de uma fibra óptica e detectar o padrão do campo elétrico. Porém, é necessário o uso de algum software ou programa devido a matemática aplicada, principalmente na obtenção de muitos modos.

1.1.3 Photonic Crystal Fiber (PCF)

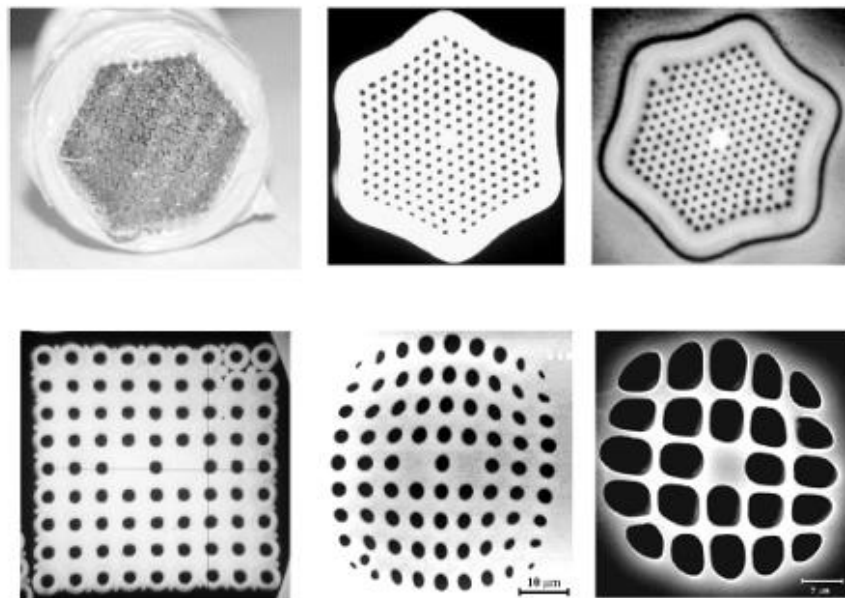
As *photonic crystal fibers*, PCFs, são fibras idealizadas em 1978 por Pochi Yeh, Amnon Yariv e Emanuel Marom e criadas no final do século 20 por Phillip Russell com a intenção de fabricar uma fibra óptica com uma perda muito baixa e maior versatilidade de

aplicações, principalmente na área de sensores, se comparada com a fibra tradicional (Buczynski, 2004).

O uso da PCF tem muitas vantagens como por exemplo, alta sensibilidade, flexibilidade de geometria, perda muito baixa se comparada as fibras tradicionais, infinita propagação de monomodo ao longo de uma gama de comprimento de onda, entre outros (De; GangopadhyayA; Singh, 2019). Assim, com tantos benefícios, o uso das PCFs está cada vez mais difundido. Alguns exemplos de sensores que vêm sendo utilizados recentemente são para medição de deformação, temperatura, fluxo de ar, nível de líquido, pressão, deslocamento, campo magnético e entre outros (Portosi *et al.*, 2019).

As PCFs consistem em fibras com estruturas periódicas feitas de capilares preenchidos com ar (Buczynski, 2004), sendo capilares, fibras que ao invés de possuírem um núcleo e cascas totalmente sólidos, como as fibras tradicionais, tem casca sólida e núcleo oco preenchidos com ar. Na Figura 8, é possível observar alguns tipos de PCFs.

Figura 8 - Diferentes modelos de PCF



Fonte: Buczynski, 2004, p. 145.

Esse tipo de material é produzido a partir de um método chamado “*Stack-and-draw*” e se provou extremamente versátil. Ele consiste em vários capilares de sílica que são fundidos juntos na geometria desejada para a criação da fibra final. Desse modo, é possível criar um tipo de rede com diferentes tamanhos de núcleo e buracos, além de diferentes formas geométricas para esses buracos que não necessariamente precisam ser cilíndricas. Ademais,

ainda é possível dopar alguma região dessa fibra facilmente se houver interesse (Russell, 2003).

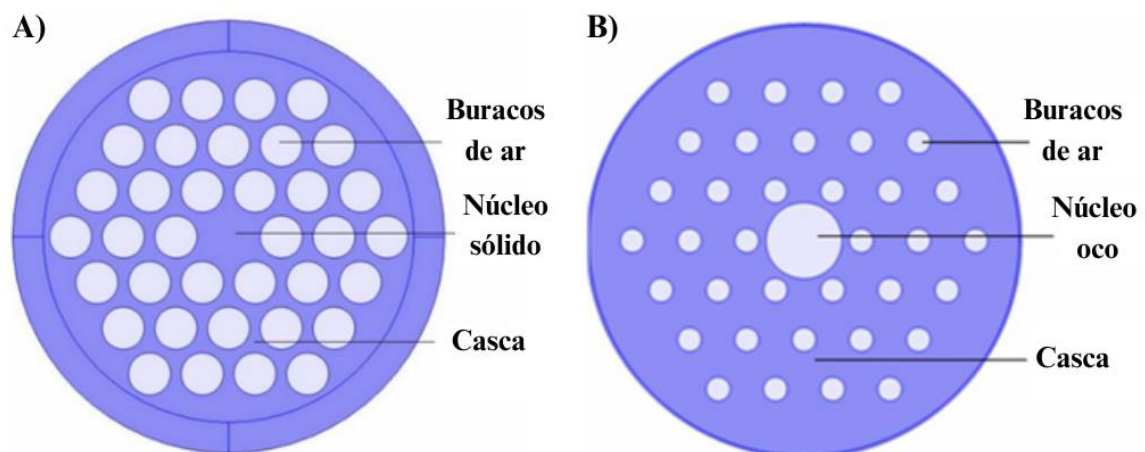
Esse processo se provou extremamente preciso ao produzir estruturas altamente regulares com relação a tamanho do buraco e continuidade dele. Isto acontece devido à estrutura ter estabilidade mecânica de maneira que as forças de tensão da superfície tendem a se balancear.

Existem duas categorias para as PCFs, a *Solid core* (núcleo sólido) e a *Hollow core* (núcleo vazio). As fibras de núcleo sólido têm núcleo e casca com uma diferença positiva de índice de refração e funcionam a partir do fenômeno da reflexão total interna, como em fibras tradicionais. Portanto, há uma dopagem no núcleo para que ele tenha índice de refração um pouco maior que a casca (De; Gangopadhyay; Singh, 2019).

Já as fibras de núcleo vazio são feitas totalmente de sílica pura e, ao invés de um núcleo de sílica, possuem um núcleo oco preenchido inicialmente com ar. Dessa forma, a diferença de índice de refração é negativa entre o núcleo e a casca (De; Gangopadhyay; Singh, 2019). Esse tipo de fibra pode ser produzida retirando um capilar central ou posicionando no centro um capilar de tamanho diferente aos de seus arredores, podendo ser menor ou maior que os demais, provocando um “defeito na estrutura” (Buczynski, 2004).

Nos dois casos existem buracos preenchidos com ar ao longo da fibra, organizados de maneira ordenada. Os esquemas dos dois tipos de fibra se encontram na figura 9.

Figura 9 - PCF *solid core* e PCF *hollow core*



Legenda: Esquema mostrando as diferentes partes que compõem as PCFs, A) *solid core* e B) *hollow core*.
Fonte: De; Gangopadhyay; Singh, 2019, p. 2-3. Adaptado pela autora.

Para as fibras de núcleo vazio a luz é guiada pelo método de *bandgap* fotônico, *photonic bandgap* (sigla em inglês PBG). A estrutura dessa fibra deve ser periódica como um cristal fotônico, e, pelo *bandgap* natural da estrutura, bandas de energia proibidas são

criadas, assim, alguns comprimentos de onda não são propagados em certas frequências. Por isso, a fibra é produzida obrigatoriamente com um núcleo central de tamanho maior ou menor que o resto dos buracos que “quebre” a periodicidade da estrutura e forme uma região especial diferente dos cristais fotônicos no centro.

Nessa nova região, núcleo central, as propriedades dos cristais fotônicos não se aplicam e não existem *bandgaps*, assim, qualquer comprimento de onda pode ser propagado na fibra. Ao final, o resultado é que apenas o núcleo central pode propagar todos os comprimentos de onda da luz, gerando modos confinados dentro dele para comprimentos de onda proibidos pelo *bandgap* (Buczynski, 2004).

Por esse motivo, não é necessário que essa fibra tenha uma diferença de índices de refração positivo como na fibra tradicional. E, além disso, como apenas uma pequena parcela da luz se propagar pelo vidro, fenômenos de interação luz-vidro (dispersão, espalhamento e efeitos não-lineares) são extremamente diminuídos, reduzindo drasticamente as perdas ópticas (Buczynski, 2004).

Além das perdas convencionais que as fibras ópticas podem sofrer, como visto na seção 1.1.1, as PCFs apresentam perda por atenuação causada pelo guia de onda da geometria, chamada perda de confinamento. Essa perda está associada ao fato das PCFs, independente da forma, possuírem um número finito de buracos. Assim, ao propagar a luz, inevitavelmente parte dela irá “vazar” para os buracos adjacentes, a quantidade de luz perdida por esse motivo é chamada de perda de confinamento.

As equações (24-25), quantificam a perda de confinamento (L_c) relacionando-a com o comprimento de onda da luz (λ) e a parte imaginária do índice de refração do meio ($Im(n_{eff})$) para o modo fundamental de propagação em decibéis por quilômetro (dB/km) (Zolla *et al.*, 2005).

$$L_c \left(\frac{dB}{km} \right) = \frac{20}{\ln(10)} \times k_0 \times Im(n_{eff}) \quad (24)$$

$$L_c \left(\frac{dB}{km} \right) = 8.686 \times \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \times Im(n_{eff}) \quad (25)$$

Sendo,

$L_c \left(\frac{dB}{km} \right)$ – Perda em decibéis por quilômetro

k_0 – O número de onda no vácuo

λ – Comprimento de onda

$Im(n_{eff})$ – Parte imaginária do índice de refração

As fibras estudadas nessa dissertação são do tipo *hollow core* com quatro geometrias diferentes. Portanto, as PCFs se mostram como boas candidatas para a produção do sensor, tendo todos os artifícios necessários para maximizar o funcionamento do sistema pensado para o detector, funcionando como porta amostra e como transmissor de informação. Assim, a caracterização e simulação delas se faz necessário para testar seu desempenho e constatar qual modelo melhor se adapta ao sistema. Dessa forma, é necessário estudar, também, o material radioluminescente pensado para o projeto do sensor.

1.2 Material radioluminescente

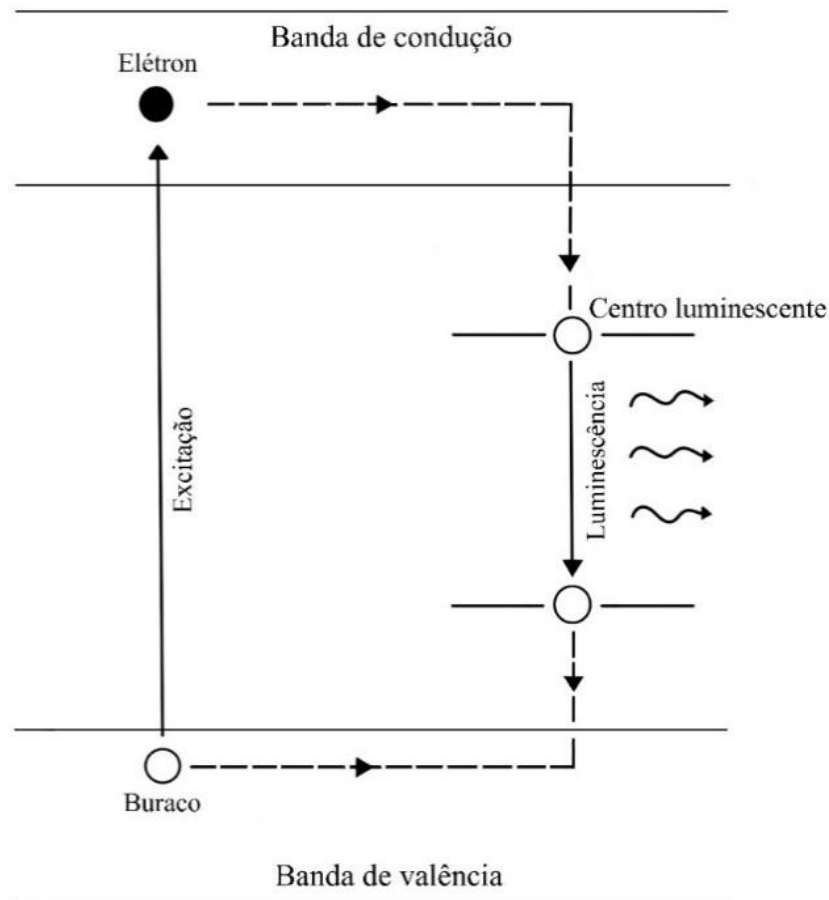
Um material luminescente é uma substância que ao incidir radiação ionizante de algum tipo emite fótons. Esse tipo de material é encontrado em grande variedade, tais como, cristais, cerâmicas, polímeros, gases atmosféricos, água e até proteínas e aminoácidos (Klein; Sun; Pratz, 2019).

O material radioluminescente é uma das variedades existentes no âmbito da luminescência e nesse trabalho são constituídos de cristais inorgânicos. Dentro desse material, naturalmente existe a banda de valência e a banda de condução separadas por um *gap*, uma lacuna proibida para o elétron. Porém com a adição de impurezas nesse cristal, dopando o material, níveis intermediários são criados formando centros luminescentes.

O processo de radioluminescência se inicia, em cristais inorgânicos, ao incidir radiação ionizante, os elétrons se excitam e migram da banda de valência para a banda de condução deixando buracos positivos. Com a excitação vinda da radiação, pares de elétron-buraco se recombinam de duas formas, fora ou dentro do centro luminescente.

No primeiro caso, ao se recombinarem, emitem um fóton, chamado de éxciton, que excita o centro luminescente formado por íons dopados que emitem outro fóton ao decair para o estado fundamental. No segundo caso, quando o par se recombina no centro luminescente, excita o centro luminescente emitindo um fóton (Figura 10) (Birks, 1964). Esse processo de radioluminescência em cristais inorgânicos é também conhecido como cintilação.

Figura 10 - Processo de luminescência em cristais inorgânicos



Fonte: Birks, 1964, p. 71. Adaptado pela autora.

Todo procedimento descrito na Figura 10 ocorre em segundos, por esse motivo, é possível utilizá-lo em um sensor de radiação de tempo real.

Dois materiais foram pensados para reproduzir esse papel no sensor, o óxido de alumínio dopado com carbono ($Al_2O_3:C$) e o Tetraborato de magnésio (MgB_4O_7). O primeiro porque é um material muito estudado em dosimetria e usado em dosímetros OSL, além de outras vantagens como ter boa estabilidade óptica, química e térmica quando irradiada, tendo número atômico efetivo relativamente baixo, $Z_{eff} = 12$, ser sessenta vezes mais sensível que o cristal de fluoreto de lítio dopado com magnésio e titânio ($LiF:Mg,Ti$) e espectro de emissão no visível, em 420 nm (Akselrod; Kortov; Gorelova, 1993).

Já o segundo material, ter número atômico efetivo baixo, $Z_{eff} = 7.5$, cerca de 2 a 15 vezes mais sensível que o TLD-100 (SOUZA, 2016), um dosímetro feito com cristal de fluoreto de lítio dopado com magnésio e titânio ($LiF:Mg,Ti$) utilizado atualmente em dosimetria termoluminescente (Thermo Fisher Scientific, 2024). Além disso, apresenta resposta

linear a uma ampla faixa de dose, e possui resposta radioluminescente sem dopagem, no espectro do visível, em 550 nm (Souza, 2016).

Portanto, os comprimentos de onda desses dois materiais serão usados nas simulações de COMSOL para simular a perda por confinamento nas geometrias propostas. Vale ressaltar que esses materiais não foram adquiridos, visto que os resultados das simulações serão necessários para decidir qual geometria se adequa mais a cada material. Ademais, com o método de simulação feito nesse trabalho, um terceiro material pode vir a ser testado posteriormente.

1.3 Microtomografia computadorizada

Existem algumas maneiras de se caracterizar microestruturas, entre elas, a microtomografia computadorizada (micro-CT, em inglês, *micro computed tomography*) desponta como a mais promissora. É uma técnica atual e muito utilizada para observar estruturas da ordem do micrometro ao nanometro, dentro de amostras físicas ou biológicas. Por isso, sua utilização vêm se expandindo e, dentre ela, está a aquisição de imagens de fibras ópticas.

1.3.1 Aspectos gerais

A Micro-CT é uma técnica de tomografia computadorizada que obtém uma imagem 3D das estruturas internas de materiais com resolução espacial abaixo de 1 μm (Landis; Keane, 2010). É uma técnica não destrutiva baseada nos diferentes coeficientes de atenuação de raios x para cada material. Por isso, admite maior tempo de aquisição, permitindo mais de uma tomada de medidas (Vásárhelyi *et al.*, 2020).

Essa é uma técnica muito utilizada para observar estruturas de seres biológicos pequenos, como insetos, porém também é aplicada a dispositivos eletrônicos e outras estruturas (Landis; Keane, 2010). A Micro-CT funciona de forma parecida com a tomografia computadorizada tradicional (CT, em inglês, *computed tomography*) porém voltada para microestruturas. Nas duas, são adquiridas imagens longitudinais da amostra, em diferentes ângulos, que constituem as projeções (Menin; Artioli, 2010).

É composta por uma fonte de raios X, um porta amostra e um detector. Onde, geralmente, a fonte é um tubo com cátodo e ânodo em cada ponta, que produzem elétrons, e um alvo, no qual os elétrons irão colidir. Na interação dos elétrons com os núcleos atômicos do material do alvo, fótons de raios X serão produzidos, sendo possível a produção de raios X

característicos e raios X de freamento. Já o detector é um equipamento que possui sensibilidade para detectar e quantificar os feixes de fótons de raios X após passarem pela amostra (Okuno; Yoshimura, 2010).

A técnica se baseia nas mudanças de intensidade do feixe de raios X, antes e após percorrerem a amostra, chamada de contraste de absorção. Quando um feixe de fótons de raios X atravessa uma amostra podem ocorrer alguns tipos de interação a depender da energia do feixe e do número atômico do material. Para esse trabalho, como os raios X tem de baixa a média energia, há a ocorrência do efeito fotoelétrico, em sua maioria, e do espalhamento Compton ou do espalhamento Rayleigh (Okuno; Yoshimura, 2010).

Portanto, ao passarem pelo material, os raios X irão interagir sendo absorvidos ou espalhados, e ao atingir o detector a intensidade transmitida será menor que a intensidade inicial do feixe. Caso o material seja composto por mais de um elemento, como o tecido humano, os raios X irão interagir de forma diferente com cada meio. Além disso, a espessura do material também influencia na intensidade do feixe transmitido, se o material for grosso demais pode atenuar todo o feixe, assim como em um material muito fino pode não interagir. Essa dependência do meio é descrita pelo coeficiente de atenuação (μ_{at}) e pela espessura do material (x) de acordo com a lei de Beer-Lambert, equação 26 (Okuno; Yoshimura, 2010).

$$I = I_0 e^{-\mu_{at}x} \quad (26)$$

Onde,

I – Intensidade transmitida

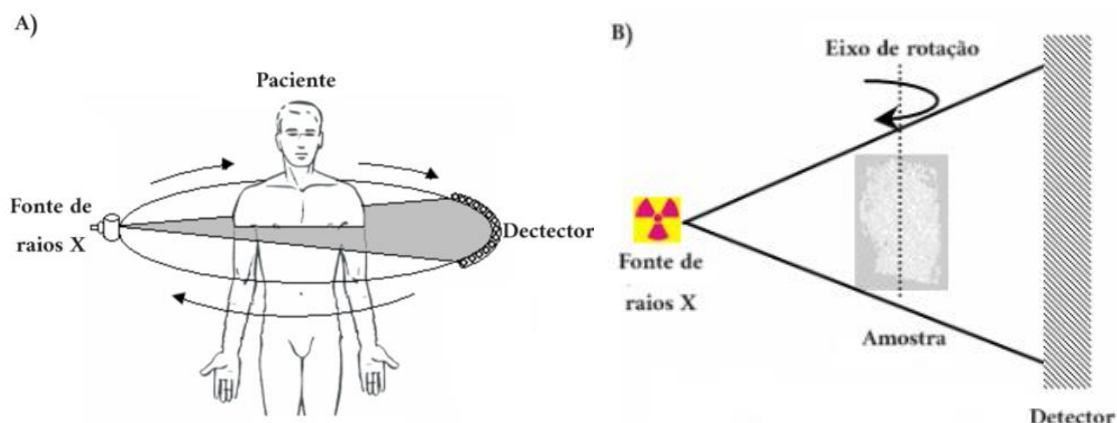
I_0 - Intensidade inicial

μ_{at} – Coeficiente de atenuação do meio

x – Espessura do material

Uma das principais diferenças entre a tomografia tradicional e a micro-CT é a rotação da amostra, enquanto na CT em hospitais, por exemplo, o paciente se deita em uma mesa e o tomógrafo gira ao redor dele, na micro-CT a amostra gira 360° em torno do seu próprio eixo a uma certa distância do detector (Vásárhelyi *et al.*, 2020). É possível observar a diferença entre as duas técnicas na figura 11:

Figura 11 - CT e Micro-CT



Fonte: A) Menin; Artioli, 2010, p.16. adaptado pela Autora; B) Lima *et al.*, 2007, p. 22. Adaptado pela autora.

O processo de microtomografia consiste em duas etapas para se obter uma imagem 3D, a aquisição de imagens e a reconstrução. A aquisição é o momento em que os raios X interagem com a amostra e a imagem do objeto é adquirida por meio das projeções como resultado. Já a reconstrução, ocorre posteriormente, e a partir das projeções adquiridas, as imagens são reconstruídas gerando em um conjunto de *slices*, imagens da secção transversal da amostra.

Além disso, a depender do objetivo do estudo, uma terceira etapa no processo da microtomografia pode ser adicionada, a segmentação. Na análise das PCFs, ela se faz necessária para separar as regiões da fibra e caracterizá-las geometricamente, já que existem *softwares* que possuem ferramentas específicas para tal fim.

Para o estudo e caracterização das fibras é necessário que seja obtida uma imagem 2D ou 3D. Existem diversas ferramentas que medem microestruturas como por exemplo o MEV, microscopia eletrônica de varredura, que geram imagens 2D de uma secção transversal de um material. Porém, de acordo com Colaço *et al.*, (2021), a micro-CT é mais vantajosa em um estudo aprofundado das microestruturas de uma fibra óptica (Colaço *et al.*, 2021). Isto se deve ao fato de a micro-CT gerar uma imagem 3D da amostra. Enquanto o MEV, apenas uma projeção seria feita por vez, um tomógrafo, mais de duas mil projeções de uma amostra podem ser realizadas, poupando tempo de aquisição e de preparação dela (Colaço *et al.*, 2021)

Nas fibras, como existem regiões bem definidas com coeficientes de atenuação diferentes a aquisição de imagens se torna mais fácil. Principalmente em casos como as PCFs

hollow core, sendo constituídas apenas de sílica com buracos cheios de ar, ou seja, duas regiões com coeficientes de atenuação destoantes.

1.3.2 Reconstrução da imagem

Após a aquisição das projeções, o próximo passo para obter a imagem 3D da amostra utilizada na micro-CT, é a reconstrução. É uma etapa matemática na qual são calculados os coeficientes de atenuação dos diferentes materiais que compõem a amostra, para assim, reconstruí-la em um conjunto de *slices*. Essa reconstrução é feita por algoritmos matemáticos que transformam as projeções, imagens longitudinais da amostra, em *slices*, imagens transversais da amostra.

Existem diversas formas de reconstruir uma imagem, sendo, uma etapa posterior ao processo de aquisição das imagens microtomográficas. Isto depende do equipamento utilizado, muitos tomógrafos já possuem um programa de reconstrução de imagens, contudo, as projeções podem ser reconstruídas em outros *softwares*, a critério do usuário.

1.3.3 Segmentação da imagem

Posteriormente ao processo de aquisição e reconstrução, existe a etapa opcional de segmentação. Ela consiste em detectar regiões homogêneas que sejam diferentes em relação à sua vizinhança, “dividindo” a imagem em regiões. Dessa forma, simplificando e reduzindo a informação, tornando-a mais apropriada para análise de microestruturas (Pal; Pal, 1993; Saldanha; Freitas, 2009).

Assim, a imagem seria repartida em um conjunto de imagens homogêneas, de tal forma que os *pixels* em cada região tenham características e propriedades idênticas (Acharya; Ray, 2005). Sendo, o pixel, o menor elemento que compõe uma imagem, como um quadrado pequeno (Blinn, 2005). Com isso, se torna possível, por exemplo, repartir a imagem de um órgão em diversas regiões, ou separar a imagem de uma fibra óptica em núcleo e casca.

Portanto, existem duas formas de detectar essas regiões, por descontinuidades ou similaridades. A primeira consiste em observar as bordas dos objetos notando mudanças bruscas de tons de cinza da imagem, seja em uma região, ponto ou linhas. Já a segunda, se propõe a identificar pixels com propriedades parecidas ou iguais, dessa maneira, localizando tons de cinza próximos que formarão uma região (Saldanha; Freitas, 2009).

Esse processo de detecção pode ser feito de três formas: manual, semiautomática ou automática. O primeiro fundamenta-se em segmentar manualmente cada região com auxílio apenas de interface gráfica, como o mouse. A segmentação semiautomática, utiliza *softwares* que detectam as bordas de acordo com as informações dadas pelo usuário, por vezes, tornando-se necessário ajustes manuais. Já a automática realiza a detecção de regiões a partir de algoritmos de segmentação, sendo totalmente automatizada, sem a necessidade de inclusão de dados prévios manualmente. Atualmente, o *deep learning* vem sendo implementado para as segmentação automática (Dionisio *et al.*, 2021).

Portanto, para o estudo das microestruturas de fibra óptica, a segmentação se mostra indispensável. No caso das PCFs, núcleo, buracos e casca podem ser segmentados para obtenção de propriedades espaciais com o auxílio do programa *Avizo 3D*, onde além de segmentar existem ferramentas de análise geométrica das regiões (Bandyopadhyay, 2021).

1.4 Simulação computacional de fibras ópticas

Simulação computacional de fibras ópticas é um excelente meio de se observar como a luz se comportará dentro delas sem utilizá-las efetivamente, poupando tempo e gasto com tentativas e erros. Desse modo, pode-se testar diversas opções de arranjo e materiais, através de um software em um computador.

Um dos métodos utilizados para produzir simulações é o software COMSOL *multiphysics*. Ele possui um ambiente de simulação interativo que resolve a maioria dos problemas de Física e Engenharia, em áreas como, Acústica, Eletromagnetismo, Dinâmica de Fluidos, Fotônica, Óptica, Física de Plasma, Biociência, Reações Químicas, Mecânica Quântica e muitos outros (COMSOL Multiphysics, 2019).

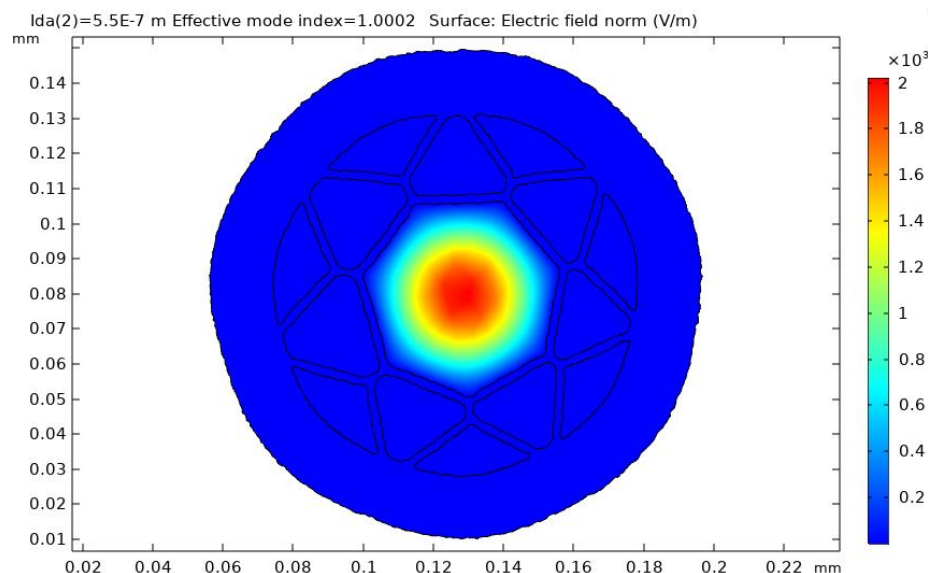
Dessa forma, com uma lista tão abrangente de aplicações, uma delas é a fibra óptica. Muitos trabalhos com fibras são desenvolvidos a partir do COMSOL hoje em dia, tendo resultados melhores. Alguns exemplos são simulações, em ressonância de plasmon de superfície para sensores de fibras ópticas (Hoseinian; Bolorizadeh, 2019), em sensores de fibra óptica para campo elétrico (Temkina; Medvedev; Mayzel, 2019) e entre outras.

Contudo, além de simulações de fibras tradicionais, existem muitas que envolvem fibras PCFs. Por exemplo, a análise de propriedades ópticas em PCFs com buracos no formato de quadrados, círculos e hexágonos (Hoissain *et al.*, 2017), design e análise da ressonância de plasmon de superfície em um sensor com PCFs (Soghra; Jamal; Bahar, 2022), o

design de uma fibra para comunicações em 5G (Das; Sen, 2023) e perdas em uma PCF *hollow core* (Hasanuzzaman *et al.*, 2018).

Uma das simulações possíveis no COMSOL é a de modos de propagação na fibra, que utiliza o método de elementos finitos totalmente vetorial (FEM, em inglês, full-vectorial finite element method) (Velamuri *et al.*, 2018). Ela pode ser feita para qualquer geometria de fibra, PCF ou não, e é possível escolher diversas propriedades para a simulação, como: comprimento de onda característico da luz, índice de refração do meio de propagação e número de modos desejado (entre 6 e 600 modos). O resultado dessa simulação é um gráfico para cada modo de propagação onde se observa a intensidade de campo elétrico gerado e índice de refração efetivo do modo (figura 12).

Figura 12 - Layout de um modo fundamental simulado em uma geometria de fibra PCF modelo *Hollow_Core_D14748-7* no COMSOL *multiphysics*



Fonte: A autora, 2024.

Com a simulação pronta ainda é possível descobrir o valor da parte imaginária do índice de refração. Desse modo, pode-se calcular a perda de confinamento, no modo fundamental, em PCFs por meio da equação 25, dada na seção 1.1.3. Dessa forma, pode-se observar qual modo de propagação possui maior intensidade e menor perda de confinamento. Esse tipo de simulação é necessária para esse trabalho pois através de seus resultados várias geometrias de PCF e materiais radioluminescentes podem ser testados e escolhidos antes da montagem do sensor. E, além disso, é possível eleger um modo específico, que tenham a maior intensidade de campo elétrico e menor perda, para ser reproduzido no funcionamento do sensor.

Logo, o software COMSOL *Multiphysics* se mostra como um programa atual e comprovadamente eficiente para o tipo de dispositivo que esse trabalho almeja estudar e simular, sendo possível a simulação de perda de confinamento em PCFs com diferentes geometrias e nos comprimentos de onda desejados. Com esse objetivo final em mente, a metodologia envolvida nesse trabalho será discutida ao longo do capítulo 2.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desse trabalho foi dividida em quatro etapas: 1) a viabilização e preparação das fibras a serem estudadas; 2) a realização da micro-CT e a reconstrução das imagens; 3) a caracterização das fibras por meio da segmentação de suas microestruturas; e 4) as simulações de modos de propagação da luz na geometria das PCFs em COMSOL *multiphysics*. Todos os estágios desse estudo estão descritos nesse capítulo.

2.1 Preparação das amostras

Inicialmente foram disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisa da Suécia, *Research Institutes of Sweden (RISE)*, quatro modelos de fibras PCFs, com geometrias diferentes. Os modelos de PCFs utilizados são do tipo *hollow core* e nomeados como: D14748-7, K14503, *HoneyComb_P-1C* e 13kPa_018193. Cada modelo foi renomeado para facilitar a descrição dos processos e resultados envolvendo as PCFs ao longo do trabalho.

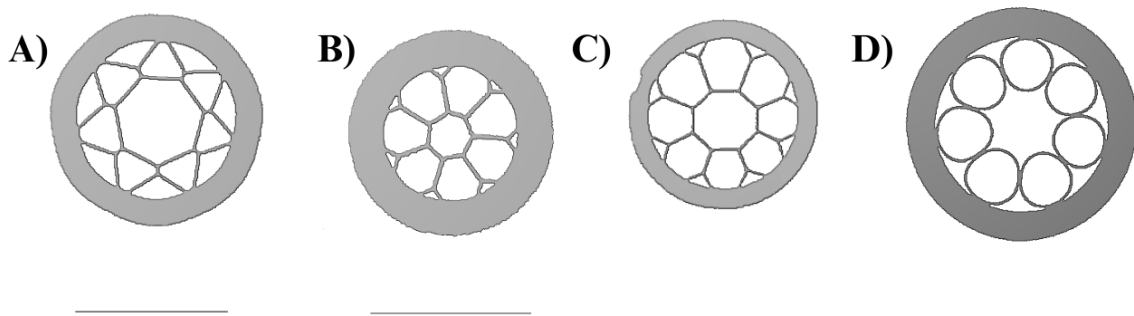
Tabela 1 - Renomeação dos modelos de Photonic Crystal Fiber

| Modelo de <i>Photonic Crystal Fiber</i> | Renomeação |
|---|------------|
| D14748-7 | Modelo 1 |
| K14503 | Modelo 2 |
| <i>HoneyComb_P-1C</i> | Modelo 3 |
| 13kPa_018193 | Modelo 4 |

Fonte: A autora, 2024.

Além disso, cada uma de suas geometrias pode ser observada na Figura 13, que apresenta o design de cada um dos modelos de fibra.

Figura 13 - Modelos de PCF



Legenda: *Photonic Crystal Fiber* do modelo A) modelo 1, B) modelo 2, C) modelo 3 e D) modelo 4 e em preto a barra representando 100 μm proporcional a cada fibra.

Fonte: A autora, 2024.

As PCFs possuem geometrias diferentes, sendo o modelo 1 com buracos triangulares e um centro heptagonal, o modelo 2 com buracos em formato que lembra o de uma pétala e centro heptagonal. Já o modelo 3, *HoneyComb*, tem seu nome em português descrito como favo de mel e se justifica por sua geometria com buracos de tamanhos irregulares que se assemelham ao alvéolo de um favo de abelha, e possui núcleo octogonal. Por último, o modelo 4 tem buracos circulares com um centro que se assemelha a uma estrela de sete pontas.

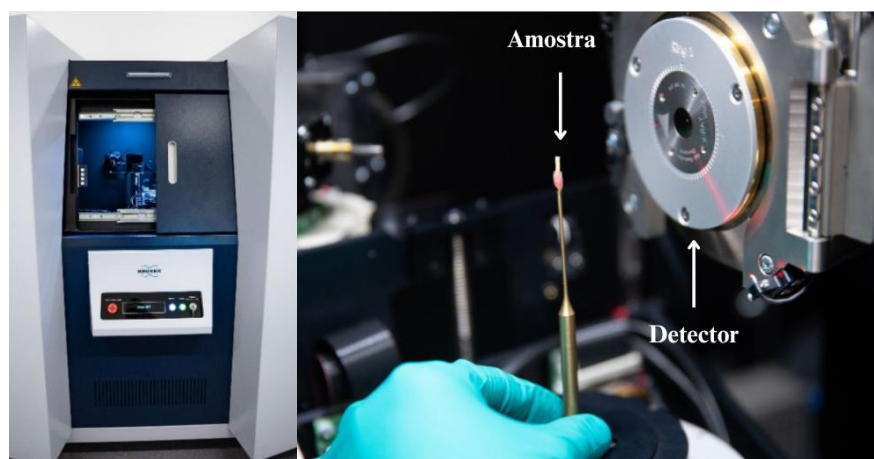
Antes de iniciar o processo de micro-CT, cada cabos de fibra foi cortadas, apenas quebrando em três pedaços de aproximadamente 1,0 cm de comprimento, dessa forma criando três amostras diferentes. Não houve nenhum tipo de limpeza e a jaqueta de proteção foi mantida ao longo de todo o processo.

2.2 Aquisição das microtomografias e reconstrução das imagens

A aquisição e reconstrução das imagens foi realizada na Universidade de Oslo, na Noruega, pelo Dr. Liebert P. Nogueira, pela resolução do tomógrafo ser maior e já existir uma parceria com o Laboratório de Física Aplicada às Ciências Biomédicas e Ambientais da UERJ, que já possui artigo publicado com estudo de fibras ópticas microestruturas com a técnica de micro-CT (Colaço *et al.*, 2021).

O tomógrafo utilizado é do modelo Bruker *Multiscale SkyScan 2211*, (Figura 14), que possui uma fonte de raios X (20-190 kV), gera um feixe cônico e policromático, e dois detectores de raios X, um painel plano para grandes objetos e um CCD (Dispositivo de carga acoplada, em inglês, *charged-coupled device*) resfriado de 11 Megapixels (Mp) para varreduras com alta resolução, o segundo foi utilizado para esse trabalho.

Figura 14 - Bruker *Multiscale SkyScan 2211*

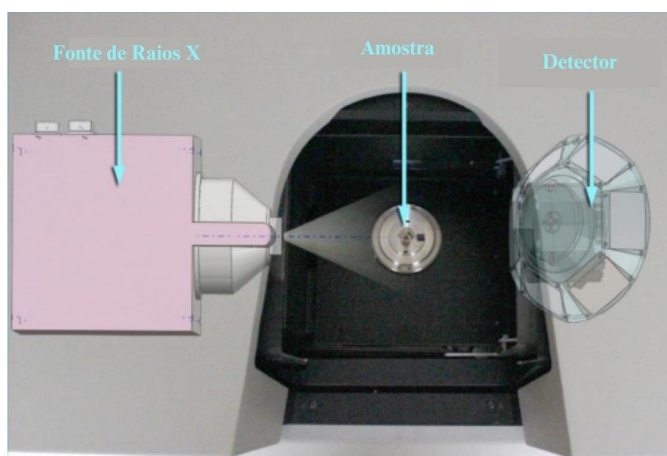


Legenda: Imagens do tomógrafo SkySan 2211 e do porta amostra em frente ao detector.
Fonte: University of Oslo, 2024.

As quatro fibras de geometrias diferentes foram medidas por meio das três amostras de cada modelo. Para otimizar o processo, as respectivas projeções foram adquiridas com as três fibras enfileiradas, gerando um conjunto de imagens para cada geometria. Assim, ao todo foram efetuados quatro procedimentos de microtomografia computadorizada.

O processo de aquisição das imagens foi realizado seguindo o procedimento descrito na seção 1.3.1 e observado na Figura 15, onde a fonte de raios X e o detector permanecem estáticos e a amostra gira 360 graus em torno de seu próprio eixo. O tempo de aquisição por projeção foi de 1,35 s para os modelos 1, 3 e 4, já para o modelo 2 foi de 1,25 s, com voltagem de 40 kV, corrente em 300 μA . Dessa forma, gerando um tamanho de *pixel* de 0,40 μm e um número de projeções de 1242 para o modelo 1, 1294 para os modelos 2 e 4 e 1387 para o modelo 3.

Figura 15 - Esquema experimental do *SkyScan*



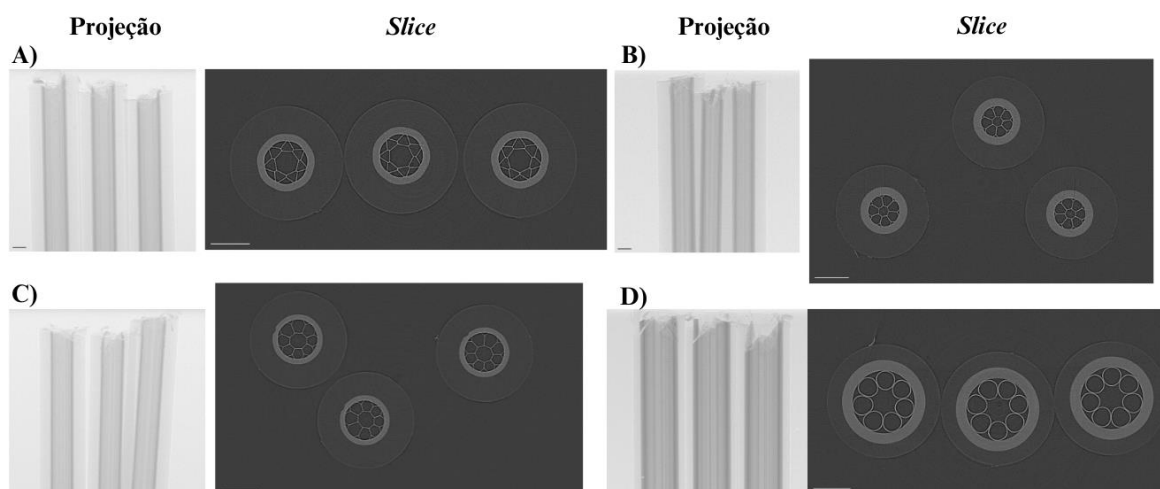
Legenda: Esquema experimental do tomógrafo *SkyScan*, onde se pode ver a posição da fonte de raios X, do porta amostra e do detector.

Fonte: Bruker MicroCT, 2018, p. 19. Adaptado pela autora.

Após essa etapa, os dados obtidos foram processados, onde as projeções foram reconstruídas através de um programa, transformando-as em fatias transversais (comumente chamadas de *slices*) ao eixo sob o qual a amostra girou e, assim, gerando um conjunto de imagens que podem ser visualizadas como arquivo único em programas que serão citados posteriormente. O processo de reconstrução foi realizado com o programa NRecon (Bruker MicroCT, 2014), original do próprio aparelho *SkyScan* 2211, em um intervalo de tempo de três a quatro minutos, a depender da fibra. Esse programa utiliza o algoritmo *FeldkampDavis-Kress* (FDK), amplamente empregado para reconstrução de imagens tridimensionais a partir de projeções de feixe cônico medidas com uma da fonte de raios X (Rodet; Noo; Defrise, 2004).

Em cada reconstrução, é gerado um número de imagens específico de acordo com o número de projeções obtidas na aquisição das imagens, que varia de acordo com alguns parâmetros como distância da amostra ao detector, tipo e tamanho da amostra. Para os quatro modelos de fibra esses dados foram os seguintes: 2464 *slices* para o modelo 1, 2464 *slices* para o modelo 2, 2458 *slices* para o modelo 3 e 2451 *slices* para o modelo 4. Na figura 16 pode-se observar uma imagem reconstruída de cada modelo de fibra para melhor entendimento do posicionamento das fibras no processo de aquisição das imagens.

Figura 16 – Projeções e imagens reconstruídas (*slice*) dos quatro modelos de PCF



Legenda: Uma projeção e uma *slice* de cada geometria exibindo a disposição em que a micro-CT ocorreu, sendo, A) modelo 1, B) modelo 2, C) modelo 3 e D) modelo 4. No canto esquerdo de cada projeção e *slice* está a barra representando 100 μm proporcional a cada imagem.

Fonte: A autora, 2024.

2.3 Segmentação das PCFs no *Avizo 3D*

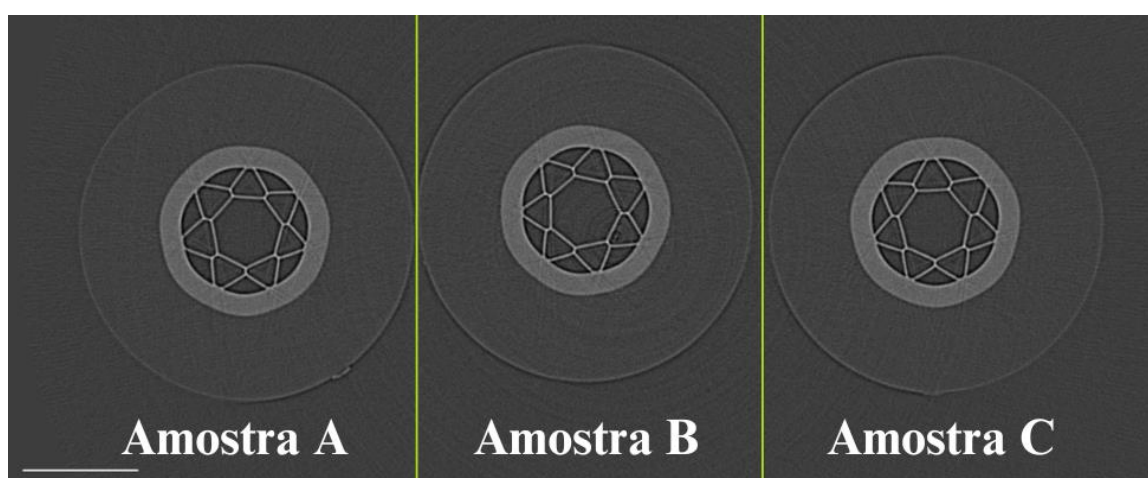
Após o processo de aquisição e reconstrução das projeções das PCFs, o último passo é a segmentação dessas imagens, que consiste em separar regiões de interesse na imagem. Para esse trabalho, as PCFs foram segmentadas em três regiões: núcleo, estrutura (casca) e fibra inteira. Essas divisões ocorreram visando a obtenção da espessura das paredes da estrutura, do diâmetro, baricentros, área e volume do núcleo e da fibra. E, com isso, caracterizá-las geometricamente, comparando entre si as três amostras de fibra de cada um dos quatro modelos.

Todas as segmentações foram feitas no Lab_FisMed/UERJ em computadores de alta performance com GPU 11 GB GeForce, processador Intel i9, 128 GB RAM. O primeiro passo, antes do início da segmentação, foi transformar o formato dos arquivos de imagem de PNG para *Raw Data*, formato utilizado no programa de segmentação escolhido. Para isso,

o programa *Image J* – FIJI (Ferreira; Rasband, 2011) foi utilizado. Nele é possível carregar todas as imagens e modificá-las instantaneamente.

Além da mudança de formato dos arquivos, as *slices* foram cortadas para que cada arquivo *Raw Data* só incluísse uma amostra de fibra. Desse modo, criando um projeto para cada PCF e, assim, diminuindo o tamanho do arquivo e facilitando o processo posterior de segmentação. Portanto, uma nova nomenclatura foi criada para cada uma delas, de acordo com sua posição, chamadas de amostras A, B e C. Essa separação por posição pode ser compreendida a partir da observação da figura 17, que apresenta uma *slice* do modelo 1.

Figura 17 – Divisão das três amostras do modelo 1

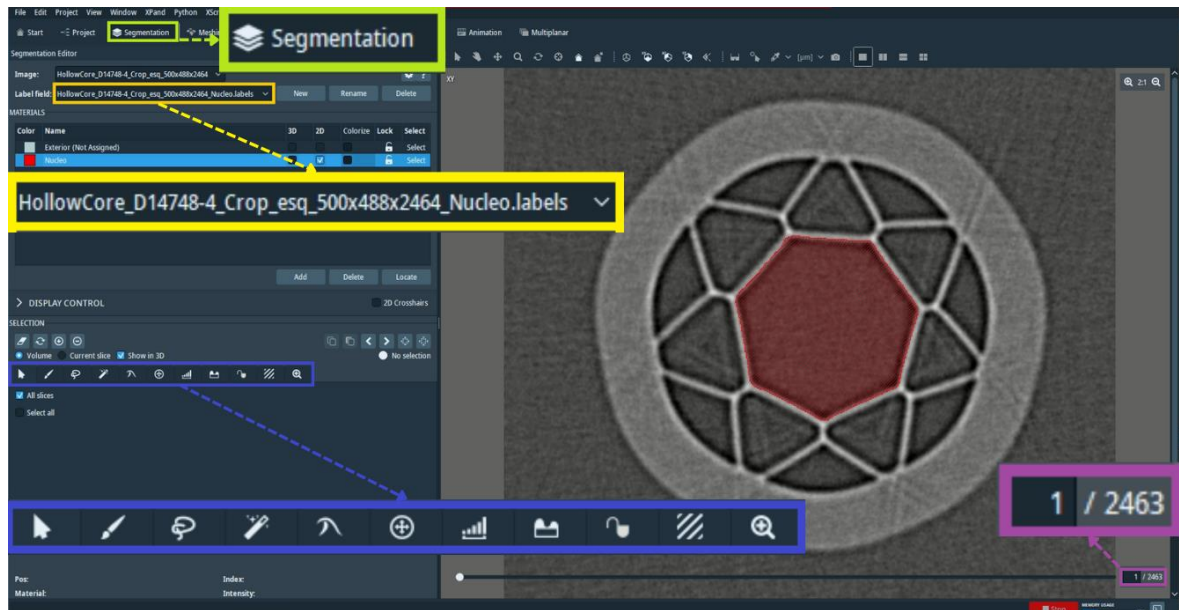


Legenda: Uma *slice* em que se pode observar as três amostras do modelo 1 com buracos, casca e jaqueta. Em verde, as linhas simbolizando os cortes feitos na imagem para separá-la em três. Em branco, o nome de cada amostra e a barra representando $100\ \mu\text{m}$ proporcional a imagem à esquerda.

Fonte: A autora, 2024.

Com todo o procedimento no ImageJ efetuado, a segmentação pode ser iniciada. Para esse trabalho, todas as segmentações foram realizadas no programa *Avizo 3D*, de forma semiautomática, onde, o usuário fornece informações e o programa segmenta a partir dessa referência. Inicialmente, se carrega o pacote de *slices* no programa e ele demanda algumas propriedades da imagem para a leitura correta dos dados, como tamanho de *pixel* e as dimensões do conjunto de *slices*. Ao iniciá-lo, pode-se começar a segmentação clicando em *Segmentation*, que leva a uma interface chamada de *Segmentation Room* (Figura 18), sendo possível criar um rótulo para cada região de interesse, chamado *label*. Nesse caso, os rótulos de núcleo e fibra inteira foram criados. Por fim, se seleciona a *slice* inicial que se deseja trabalhar.

Figura 18 - Interface do *Segmentation room*

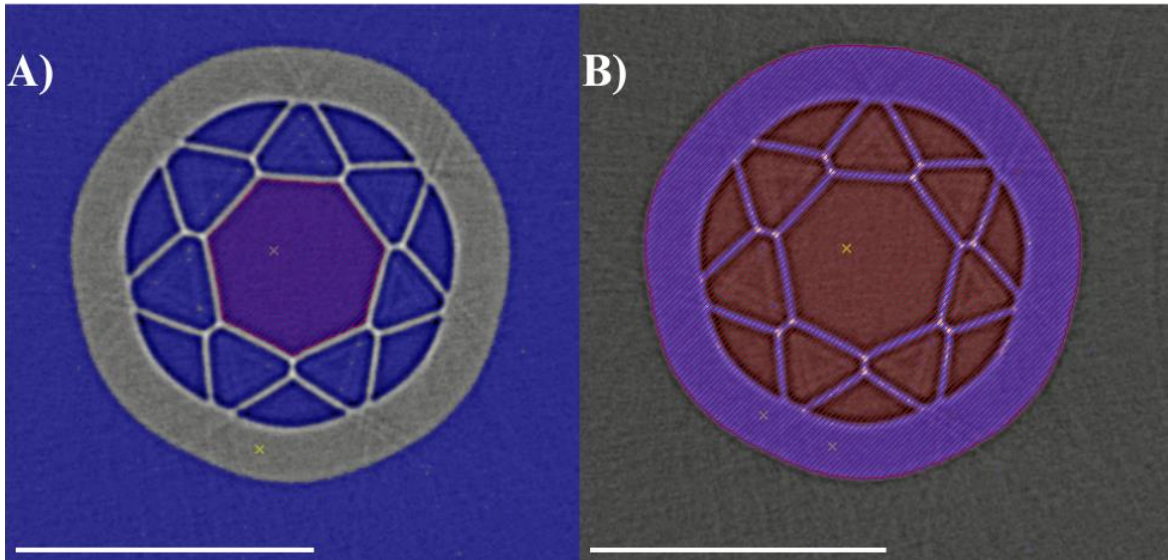


Legenda: Aparência do *Segmentation Room*, onde, em verde, está a área *Segmentation*, que ao ser clicada, leva ao *Segmentation Room*. Em amarelo, o nome do arquivo da *label*, em azul, as ferramentas disponíveis para uso no processo de segmentação e, em roxo, o número da *slice* projetada na tela para modificação.

Fonte: A autora, 2024.

Para delimitar a região de interesse, padronizou-se que todas as *labels* iniciariam da *slice* um até a mil e seriam segmentadas de dez em dez. Para isso, a ferramenta *Magic Wand* foi empregada para delimitar a região de interesse, que seleciona automaticamente uma região de acordo com os pixels semelhantes da área escolhida, ou seja, clica-se em um ponto da imagem e a partir daquele ponto automaticamente uma área será delimitada. Além disso, a opção *fill interior* foi selecionada para garantir que todos os pixels dentro da área delimitada foram selecionados. Na figura 19, pode-se observar um exemplo de como a ferramenta atuou nas duas segmentações, núcleo e fibra inteira.

Figura 19 - Processo de segmentação do núcleo e fibra inteira do modelo 1 amostra A



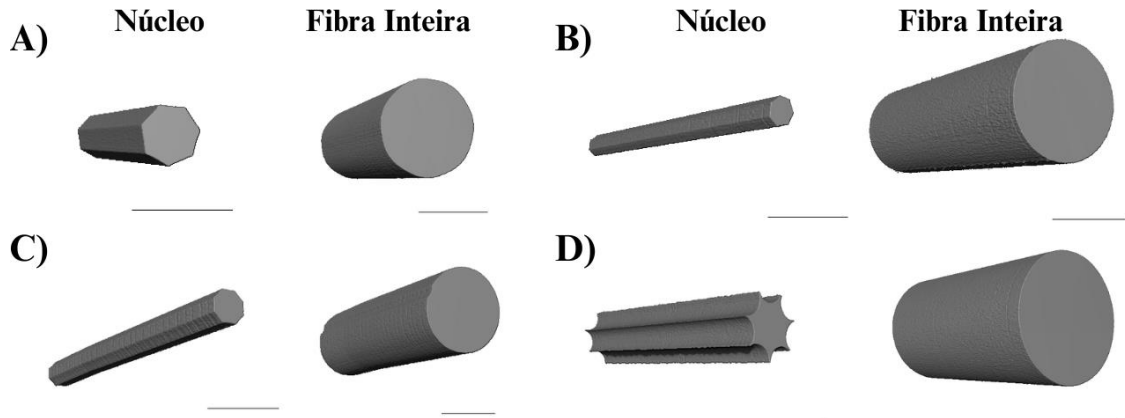
Legenda: A) Área do buraco central em roxo delimitada pela ferramenta *Magic Wand*. B) Área da fibra inteira em vermelho delimitada pela *Magic Wand*. Em branco, a barra representando $100 \mu\text{m}$ proporcional a cada imagem.

Fonte: A autora, 2024.

Após garantir que a região de interesse fosse totalmente selecionada, sem pontos faltantes ou a mais, pode se passar para a próxima *slice* de interesse. Com isso, se repete o mesmo processo de selecionar a área com as mesmas ferramentas. Quando as duas primeiras *slices* estiverem prontas, é possível realizar o processo de interpolação de regiões. Ele consiste em segmentar automaticamente as *slices* que estão no intervalo entre as duas feitas anteriormente, ou seja, se a *slice* um foi segmentada, depois a *slice* dez e, ao final, houve a interpolação, as *slices* de dois a nove serão segmentadas imediatamente de acordo com os tons de pixels das regiões delimitadas pela inicial e a final.

Dessa maneira, foram produzidas as segmentações do núcleo e de toda a fibra, das três amostras, de cada um dos modelos de PCF. As segmentações finais dos quatro modelos podem ser observadas na figura 20 para exemplificação do resultado de uma segmentação.

Figura 20 - Segmentações do núcleo e fibra inteira para todos os modelos



Legenda: Imagens das segmentações do núcleo e da fibra inteira para A) o modelo 1 amostra A e B) o modelo 2 amostra A, C) modelo 3 amostra A e D) modelo 4 amostra A. Em preto, a barra representando $100 \mu\text{m}$ proporcional a cada imagem.

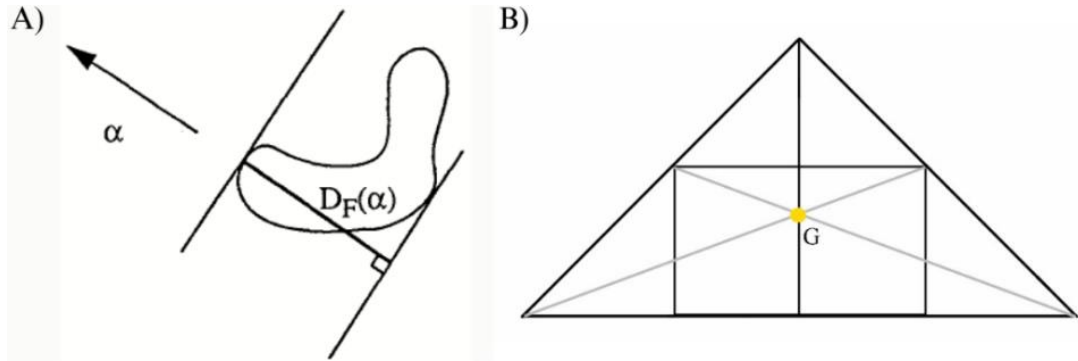
Fonte: A autora, 2024.

Após a finalização da segmentação, o próximo passo é a caracterização das microestruturas, também produzida dentro do *Avizo* 3D. Nesse caso, volta-se a interface inicial do programa e seleciona-se a ferramenta *Label Analysis*. Nela, podem ser calculadas várias grandezas geométricas, 2D ou 3D, como diâmetro, diâmetro equivalente, diâmetro de Feret, baricentro, área, volume, perímetro e entre outras. As ferramentas escolhidas para o processo de caracterização das PCFs foram o diâmetro de Feret, baricentro x e y, área, volume e width.

O diâmetro de Feret é definido como a distância entre duas retas tangentes ao objeto em uma dada direção (Figura 21 - A), ou seja, mede-se o diâmetro da secção transversal da fibra ao longo de seu eixo de rotação. A quantidade de vezes em que o diâmetro será calculado foi estipulada manualmente, em um intervalo de 18° , gerando 10 valores de diâmetro de Feret ao longo de 180° de rotação (Avizo Software User's Guide, 2022).

Já a ferramenta de baricentro mede o centro geométrico do objeto em um determinado eixo. Para as PCFs serão calculados os baricentros em x e em y, que indicam se o centro geométrico do núcleo está alinhado com o da casca. Ele está exemplificado na Figura 21 - B), que mostra as linhas do baricentro e o centro geométrico de um triângulo.

Figura 21 - Diâmetro de Feret e Baricentros de um triângulo



Legenda: A) Diâmetro de Feret de um objeto qualquer em um ângulo α e B) o centro geométrico do triângulo, em amarelo, identificado como G e, em cinza, as linhas de baricentro.

Fonte: A) Avizo Software User's Guide, 2022; B) A autora, 2024.

O cálculo da área é definido como aproximadamente o número de pixels na superfície de um objeto (equação 27) (Avizo Software User's Guide, 2022).

$$A(x) = \sum_{i,j} g(x_i, y_i) \quad (27)$$

Sendo,

$A(x)$ - Área da superfície do objeto

$$g(x_i, y_i) = \begin{cases} 1, & \text{se o pixel estiver no objeto} \\ 0, & \text{se o pixel não estiver no objeto} \end{cases}$$

O cálculo do volume 3D é medido contabilizando o número de *voxels* do objeto, sendo *voxel* o equivalente a um pixel 3D, e multiplicando pelo volume de apenas um *voxel* (equação 28) (Avizo User's Guide, 2022).

$$Volume3D = voxels \times cx \times cy \times cz \quad (28)$$

Sendo,

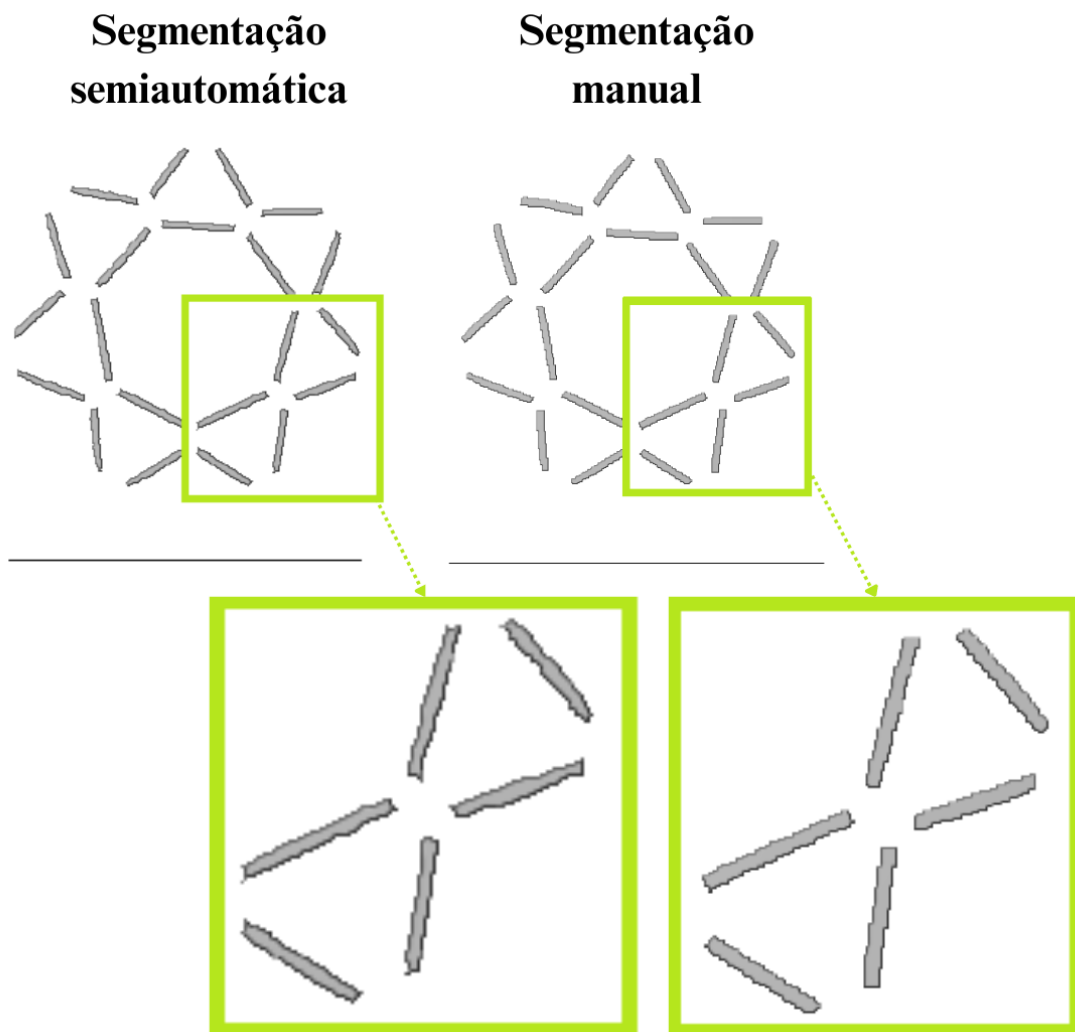
$Volume3D$ – Volume do objeto

$voxels$ – Número de *voxels* no objeto

cx, cy, cz – Coordenadas de um *voxel*

Por último, a ferramenta *width* calcula o menor diâmetro de Feret, que será adotada como a espessura do objeto. Para utilizar essa ferramenta foi necessário realizar a segmentação de uma *slice* de forma manual, para separar todas as paredes da fibra, garantindo que cada uma delas fosse considerada um objeto diferente pelo programa, e, além disso, para melhorar a segmentação semiautomática feita pela ferramenta *Magic Wand*, que não detectou alguns *pixels* das paredes menores. Na figura 22 é possível observar a diferença entre a segmentação semiautomática do *Avizo 3D* e a manual.

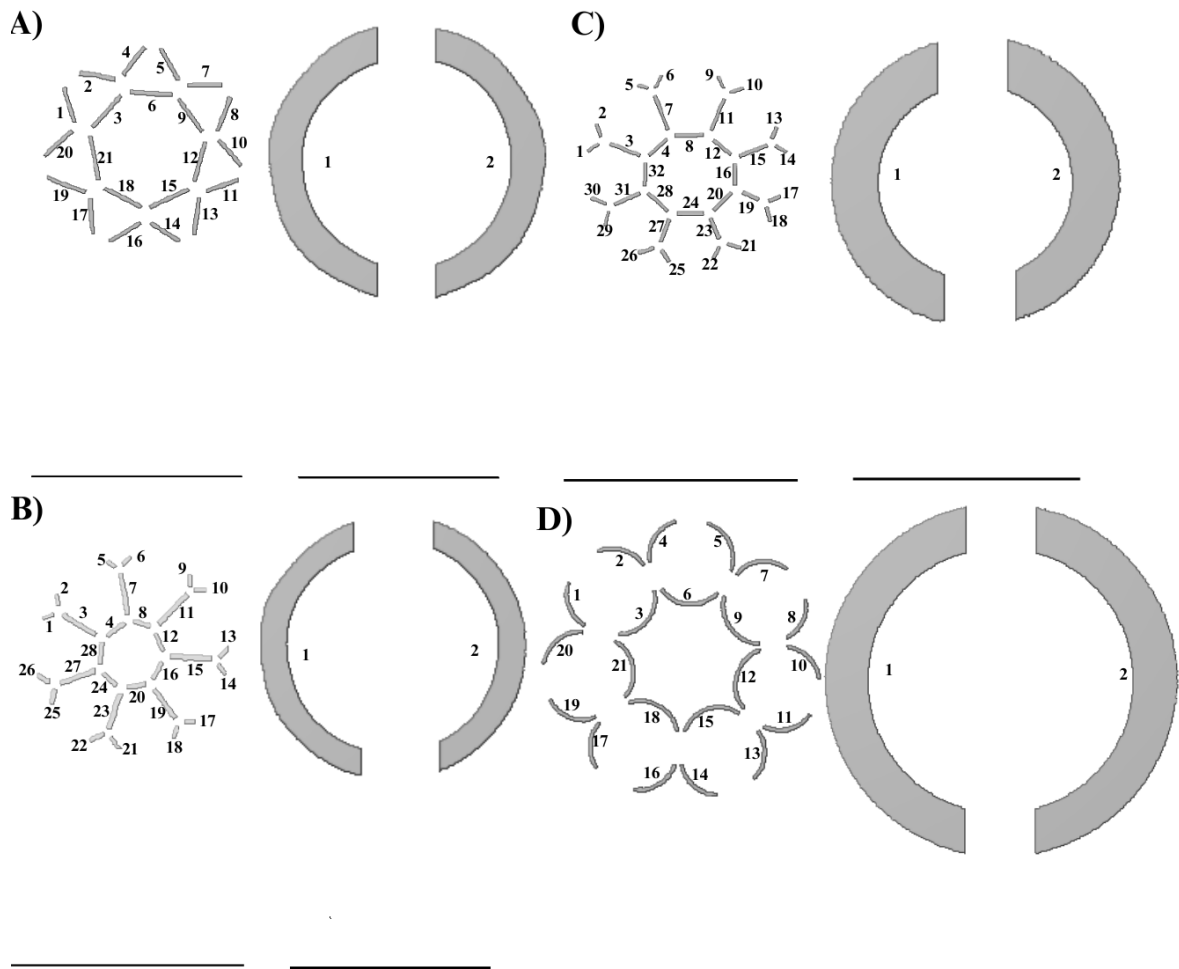
Figura 22 - Comparação da segmentação semiautomática e manual para as paredes da fibra do modelo 1



Fonte: A autora, 2024.

A partir dos resultados dados pelo programa, cada parede da fibra foi numerada para facilitar a análise dos resultados, essa separação pode ser observada na figura 23.

Figura 23 – Separação e numeração das paredes e casca externa por modelo de PCFs, respectivamente



Legenda: Separação e numeração das paredes internas e casca das PCFs do A) modelo 1, B) modelo 2, C) modelo 3 e D) modelo 4. Em preto, a barra representando $100 \mu\text{m}$ proporcional a cada imagem.
Fonte: A autora, 2024.

Dessa maneira, calculou-se os parâmetros geométricos de acordo com as ferramentas descritas acima para cada uma das amostras de fibra, gerando doze conjuntos de dados. Esses parâmetros descritos serão utilizados para comparação entre as amostras da mesma fibra constatando se possuem os mesmos valores ou não. E, em conjunto, serão responsáveis por caracterizar geometricamente as microestruturas da fibra.

Ao final, ainda foram produzidas imagens 2D das geometrias das fibras, a partir da segmentação da estrutura de cada uma, em formato PNG, para posterior uso nas simulações no COMSOL *multiphysics*. Essas imagens foram retiradas da primeira *slice* da segmentação da estrutura de todas as fibras, um exemplo está na Figura 24.

Figura 24 - Imagem em formato PNG do modelo 1 para a simulação



Legenda: Exemplo de imagem PNG retirada da segmentação da estrutura da fibra do modelo 1 no *Avizo 3D* para ser utilizada na simulação em *COMSOL*.

Fonte: A autora, 2024.

2.3.1 Erros associados ao conjunto de medidas da *label analysis*

A *label analysis* produz resultados na amostra de acordo com o número de *slices* segmentadas. Para grandezas unidimensionais ou bidimensionais, um novo valor é calculado a cada *slice*. Já para grandezas tridimensionais um resultado é encontrado para um conjunto de *slices*. Por consequência, como foram segmentadas um conjunto de mil *slices* do núcleo e da fibra inteira, para cada modelo, existem mil valores de baricentro x, baricentro y e área.

Além disso, como o diâmetro de Feret é calculado dez vezes ao longo dos 180° do eixo de rotação, existem dez mil valores de diâmetro de Feret. Para o volume, o resultado conta apenas com um valor por segmentação, já que ele engloba as mil *slices*. Já para espessura das paredes, a ferramenta *width* foi utilizada em apenas uma *slice* da segmentação da estrutura, como foi explicado na secção 2.3, e, por isso, conta com um resultado por parede também, exceto para a casca externa das fibras que foi dividida em duas para facilitar a *label analysis*, e, por isso, tem dois resultados por amostra.

Para realizar uma análise estatística acerca da compatibilidade dos resultados encontrados na *label analysis* o erro associado às grandezas medidas nesse trabalho foi calculado no programa Excel com a ferramenta de desvio padrão populacional (=DESVPAD.P()).

O desvio padrão populacional (Equação 29) é a medida mais utilizada para a estimativa de erros e expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados (Santoro *et al.*, 2013).

Ele foi aplicado a todas as medidas com grandezas unidimensionais com mais de um resultado por *slice*, ou seja, ao diâmetro de Feret, baricentros x e y e a área.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (29)$$

Onde,

σ_x – Desvio padrão

x_i – Valor na posição i do conjunto de dados

\bar{x} – Média aritmética dos dados

N – Quantidade de dados disponíveis

Para a espessura das paredes (*width*), que dispõe de uma medida por parede da fibra, o erro associado foi considerado como o tamanho de pixel, $0.40 \mu m$, sendo a menor medida que o *Avizo* 3D consegue detectar para esse conjunto de dados. Já para o volume, que possui apenas uma medida para o conjunto de *slices* de cada amostra, o erro associado adotado foi calculado também pela equação 29, porém utilizando a medida de volume das três amostras como um conjunto de dados, gerando apenas um valor de erro para cada modelo.

Para comparar duas medidas com erros diferentes, será utilizada a equação de erro padrão (equação 30), para medir o erro associado a estimativa do valor esperado da grandeza (Santoro *et al.*, 2013).

$$\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (30)$$

Onde,

σ – Erro padrão

σ_A – Desvio padrão da medida A

σ_B – Desvio padrão da medida B

Para calcular a compatibilidade entre duas estimativas, a discrepância desse valor será determinada e se for menor que duas vezes o erro padrão é considerada compatível (equação 31). Para valores entre dois e três vezes o erro padrão, será considerada inconclusiva (equação 32) e para valores maiores que três vezes o erro padrão, será incompatível (equação 33).

$$|\bar{x}_A - \bar{x}_B| < 2\sigma \text{ (compatível)} \quad (31)$$

$$2\sigma < |\bar{x}_A - \bar{x}_B| < 3\sigma \text{ (inconclusivo)} \quad (32)$$

$$|\bar{x}_A - \bar{x}_B| > 3\sigma \text{ (incompatível)} \quad (33)$$

Onde,

\bar{x}_A – Estimativa da medida A

\bar{x}_B – Estimativa da medida B

É importante ressaltar que todos as equações de erro padrão populacional, discrepância e erro associado, além das normas de compatibilidade, estão descritas em Santoro *et al.*, 2013.

2.4 Simulações computacionais no COMSOL *multiphysics*

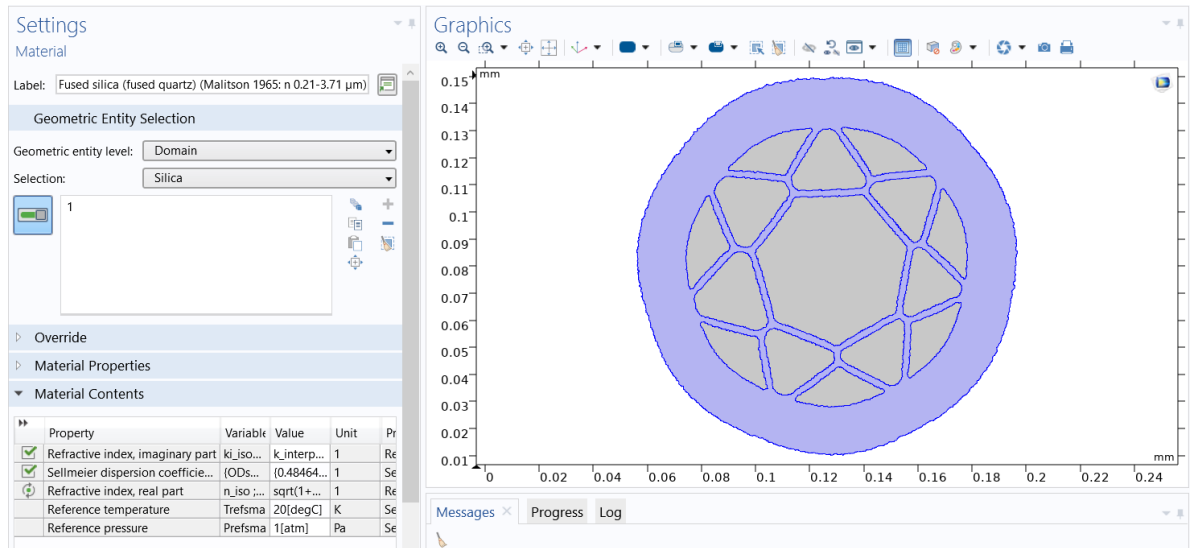
Em seguida a caracterização das PCFs, as simulações computacionais no COMSOL *multiphysics* foram produzidas em um computador com processador Intel Xeon CPU E5-2650 v2 @ 2.60GHz, 62.8 GB RAM. O *software* possui uma interface complexa de funções e exibe ao usuário uma visão 2D da amostra em questão, que é manipulável. É possível criar uma geometria do zero, desenhando a superfície de interesse, ou adicioná-la manualmente com uma imagem em PNG ou em outros formatos.

Como a geometria de uma PCF é complexa, optou-se por usar uma imagem pronta da secção transversal da fibra, em que seja possível detectar suas microestruturas. Por isso, anteriormente foi separado uma imagem de todas as fibras estudadas. Para isso, há uma ferramenta chamada *image to curve* que transforma uma imagem em uma superfície passível de interação. Para essas simulações, foi escolhido o padrão sólido de linha com tolerância zero de curva, dessa forma, as linhas que dividem a região da fibra não serão suavizadas ou modificadas de qualquer modo.

Vale ressaltar que, geralmente, ao produzir simulações com fibras ópticas os usuários desenhavam manualmente a geometria da fibra de interesse. No caso desse trabalho, como foi utilizada uma *slice* adquirida com a micro-CT, o que resulta em uma geometria mais fiel a fibra original utilizada. Isto se deve ao fato de ser mais fácil se manter fiel ao tamanho dos buracos e a grossura das paredes original carregando uma imagem real da fibra do que desenhando manualmente.

Após criar a geometria, o primeiro passo é selecionar os materiais das diferentes regiões delas. No próprio COMSOL há uma biblioteca de materiais onde é possível encontrar propriedades físicas e químicas de inúmeros compostos. Em uma das secções de substâncias, se localiza a de materiais ópticos com a opção da sílica fundida, que é utilizada na produção de fibras, e, além disso, um material que simula o ar. Assim, se relacionou a região da casca com a sílica, Figura 25, e a região dos buracos com o ar, Figura 26.

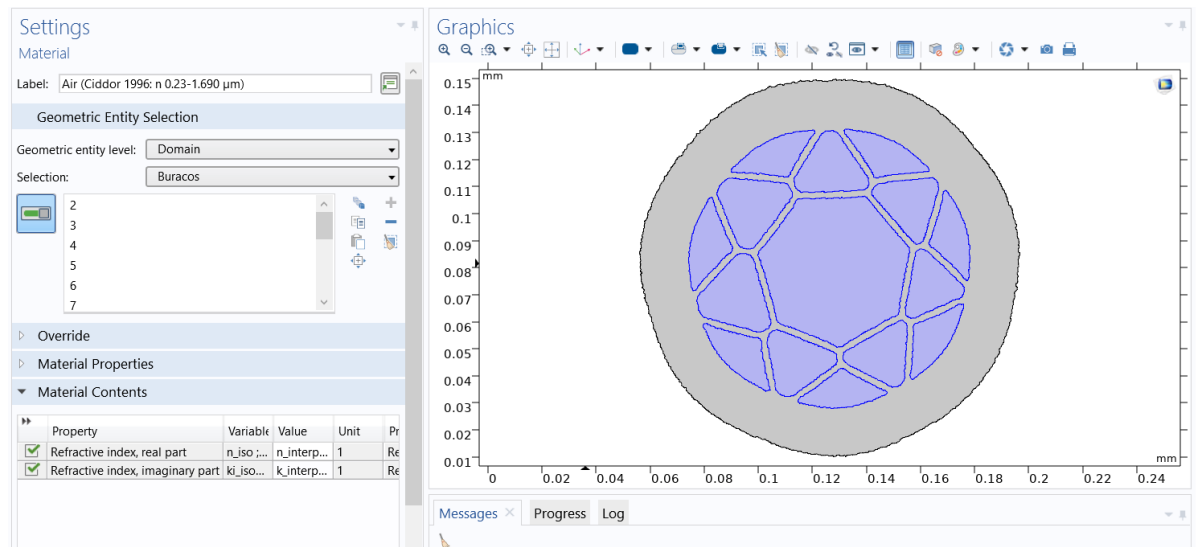
Figura 25 - Seleção da sílica na geometria e suas propriedades no modelo 1 amostra A



Fonte: A autora, 2024.

Figura 26 - Seleção dos buracos de ar na geometria e suas propriedades no modelo 1 amostra

A



Fonte: A autora, 2024.

Com isso finalizado, a próxima etapa é adicionar os parâmetros de comprimento de onda, chamado de lda , e a frequência, chamada de $f0$. Dessa forma, estabelecendo a dependência da frequência e do comprimento de onda por meio da equação 34, que é necessária para inserir posteriormente os comprimentos de onda em que os materiais radioluminescentes escolhidos anteriormente emitem luz.

$$f0 = \frac{v_o}{lda} \quad (34)$$

Onde,

f_0 – Frequência em um determinado comprimento de onda

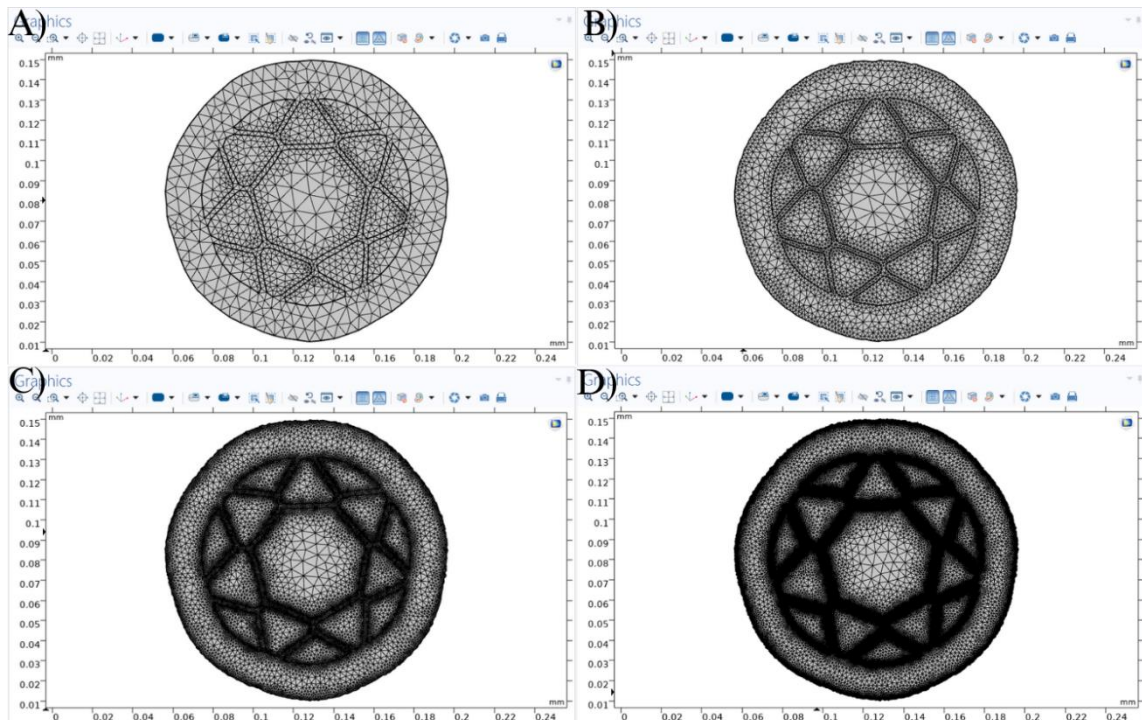
v_0 – Velocidade da luz no vácuo

l_{da} – Comprimento de onda qualquer

Outro parâmetro necessário para o bom funcionamento do programa, é a escolha de *Mesh*. O *Mesh* (malha, em português) é a maneira como o programa analisará a geometria da superfície em questão, permitindo a discretização das microestruturas em pequenas unidades que gerarão mais graus de liberdade. Quanto menor forem as pequenas unidades e mais simples as formas, mais preciso será a resolução dos resultados, porém pode exigir um alto custo computacional, de horas ou dias. Além disso, esse custo pode não ser justificado, pois o resultado gerado por um *mesh* mais fino pode ser igual ou semelhante a outro com um *mesh* mais grosso. Por isso, definir um *mesh* é um passo importante.

O programa conta com nove tipos de *meshes* diferentes, começando do extremamente fina (em inglês, *extremely fine*) até uma malha extremamente grossa (em inglês, *extremely coarse*). Para os programas das PCFs, os *meshes* testados podem ser visto na figura 27. O escolhido foi o *extra coarse* (figura 27 – B), por apresentar uma malha com entrelaçamento mais fino que o *extremely coarse* (Figura 27 – A) sem gerar alto custo computacional. Para as outras duas malhas mais finas, *coarser* (figura 27 – C) e *coarse* (figura 24 – D), o programa exige maior tempo para produzir uma simulação, que não justificou seu uso para esse trabalho pela quantidade de simulações realizadas e pela qualidade das simulações com a malha menos fina.

Figura 27 - Diferentes *meshes* testados no modelo 1 da amostra A



Legenda: Diferentes *meshes* testados na geometria do modelo 1 amostra A, sendo: A) *Extremely coarse*, B) *Extra Coarse*, C) *Coarser* e D) *Coarse*.

Fonte: A autora, 2024.

Por último, antes de rodar o programa, dois parâmetros devem ser ajustados, o *parametric sweep* e o *mode analysis*. Na aba do *parametric sweep* que se escolhe qual, ou quais, comprimentos de onda gerarão luz dentro da geometria escolhida. Sendo assim, os comprimentos de 420 nm e 550 nm foram colocados. Ademais, existem outros pontos que podem ser escolhidos e mudados, contudo, não foram utilizados ao longo desse estudo.

Já o *mode analysis*, é a opção na qual se escolhe a frequência da luz, qual o valor de índice de refração as soluções devem gerar entorno e o número de modos de propagação. Como foi definido inicialmente em outro parâmetro a frequência como f_0 (equação 34), esse termo foi mantido. Já o índice de refração efetivo, foi escolhido como 1,00, pois é o valor do índice de refração do ar onde a luz se propagará na PCF.

O número de modos escolhido de forma arbitrária, inicialmente, foi de oitenta modos de propagação que resolvessem a equação de onda radial (equação 22), por meio das funções de Bessel (equação 23), discutido na secção 1.1.2. Porém, em alguns casos esse número não foi o suficiente para encontrar os modos fundamentais no centro do núcleo. Por isso, o número de modos foi aumentado até encontrar esse modo específico para os dois comprimentos de onda. O número de modos produzidos variou de 80 até 600, a depender do modelo e da amostra.

Com todo o procedimento concluído o programa pode ser rodado e os resultados obtidos. As soluções foram produzidas em um tempo que pode variar de trinta segundos a dez minutos dependendo do número de modos solicitados. O resultado obtido mostra os modos de propagação solicitados, para cada comprimento de onda, em função do índice de refração efetivo do modo de propagação de interesse na fibra, com parte real e imaginária.

Para obter os valores da parte imaginária, foi necessário criar, no próprio programa, um gráfico de comprimento de onda por parte imaginária ($lda \times imag(n_{eff})$) e importar a lista de todos os dados de $imag(n_{eff})$. Assim, a partir do valor da parte imaginária do índice de refração do modo correspondente, e já conhecendo o comprimento de onda da luz, se calculou a perda de confinamento das PCFs no programa Excel de acordo com a equação (25), secção 1.1.3.

Desse modo, foram produzidas doze simulações nas três amostras dos quatro modelos de PCF. Vale ressaltar que a simulação é produzida ao mesmo tempo para os diferentes comprimentos de onda escolhidos. A relação da ordem de realização, modelo e localização da amostra de fibra e *slice* podem ser vistas na tabela 2, abaixo:

Tabela 2 - Ordem de produção das simulações no COMSOL

| Ordem de produção | Modelo de PCF | Amostra de Fibra | Localização da <i>Slice</i> |
|-------------------|---------------|------------------|-----------------------------|
| 1° | Modelo 1 | Amostra A | <i>Slice</i> 1 |
| 2° | Modelo 1 | Amostra B | <i>Slice</i> 1 |
| 3° | Modelo 1 | Amostra C | <i>Slice</i> 1 |
| 4° | Modelo 2 | Amostra A | <i>Slice</i> 1 |
| 5° | Modelo 2 | Amostra B | <i>Slice</i> 1 |
| 6° | Modelo 2 | Amostra C | <i>Slice</i> 1 |
| 7° | Modelo 3 | Amostra A | <i>Slice</i> 1 |
| 8° | Modelo 3 | Amostra B | <i>Slice</i> 1 |
| 9° | Modelo 3 | Amostra C | <i>Slice</i> 1 |
| 10° | Modelo 4 | Amostra A | <i>Slice</i> 1 |
| 11° | Modelo 4 | Amostra B | <i>Slice</i> 1 |
| 12° | Modelo 4 | Amostra C | <i>Slice</i> 1 |

Fonte: A autora, 2024.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desse trabalho estão divididos em duas seções ao longo do capítulo. Na primeira seção encontram-se os dados adquiridos na caracterização geométrica das PCFs no *Avizo* 3D, que será apresentado e discutido. Em sequência, estão as simulações computacionais no *COMSOL multiphysics* nas fibras. Os resultados foram divididos por comprimento de onda de luminescência, 420 nm e 550 nm e discutidos a partir dos critérios empregados nesse estudo.

3.1 Resultado da caracterização das PCFs

O objetivo da caracterização é comparar as amostras do mesmo modelo entre si, tanto os valores da segmentação do núcleo quanto os da fibra inteira, para garantir que tem resultados similares já que provém do mesmo cabo. E, dessa forma, caracterizar cada um dos modelos geometricamente ao medir seus diâmetros, áreas, volumes e espessura das paredes.

Os resultados da segmentação do núcleo e da fibra inteira serão expostos por meio das médias dos dados encontrados realizadas pelo próprio programa, a fim de simplificar a análise e discussão. Com exceção dos resultados de volume e espessura das paredes, que contam com os valores brutos. Por esse motivo, eles foram divididos entre os modelos de fibra e as segmentações núcleo e fibra inteira (tabelas 3 – 10) e estrutura (tabela 11 e Apêndice I), respectivamente, para facilitar a visualização e entendimento. Ademais, a compatibilidade dos resultados das segmentações serão considerados compatíveis se estiverem dentro de 2σ , como foi discutido na seção 2.3.1.

A análise de cada grandeza mensurada se dará da seguinte forma: para os baricentros será feita em duas etapas, primeiramente, analisando a compatibilidade dos dois valores encontrados na mesma amostra. Posteriormente, esse resultado será expandido para uma comparação entre as três amostras, produzindo a compatibilidade entre os seis resultados.

Já para os resultados do diâmetro de Feret, área e volume, serão comparados os resultados das três amostras de um mesmo tipo de segmentação apenas. Por exemplo, os valores da área da segmentação do núcleo das amostras A, B e C serão comparados entre si, e, em seguida, os resultados da segmentação da área da fibra inteira das amostras A, B e C serão analisados separadamente.

Tabela 3 - Resultado do modelo 1 das segmentações Núcleo e Fibra inteira

| Ordem de Segmentação | Diâmetro de Feret médio (μm) | Baricentro X (μm) | Baricentro Y (μm) | Área (μm^2) | Volume (μm^3) |
|----------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--|
| Amostra A | | | | | |
| Núcleo | 60,63 \pm 0,55 | 101,83 \pm 1,99 | 85,54 \pm 0,86 | 2667,03 \pm 9,08 | (1,07 \pm 0,02) \times 10 ⁶ |
| Fibra Inteira | 147,57 \pm 0,30 | 100,14 \pm 1,98 | 85,22 \pm 0,85 | 16909,10 \pm 27,02 | (6,77 \pm 0,01) \times 10 ⁶ |
| Amostra B | | | | | |
| Núcleo | 59,64 \pm 0,53 | 91,34 \pm 1,92 | 82,99 \pm 0,26 | 2553,30 \pm 4,30 | (1,02 \pm 0,02) \times 10 ⁶ |
| Fibra Inteira | 147,62 \pm 0,30 | 92,49 \pm 1,91 | 81,62 \pm 0,25 | 16913,40 \pm 9,09 | (6,77 \pm 0,01) \times 10 ⁶ |
| Amostra C | | | | | |
| Núcleo | 59,61 \pm 0,53 | 88,14 \pm 1,57 | 83,56 \pm 1,17 | 2558,05 \pm 1,97 | (1,02 \pm 0,02) \times 10 ⁶ |
| Fibra Inteira | 147,83 \pm 0,35 | 88,96 \pm 1,57 | 82,01 \pm 1,01 | 16968,90 \pm 4,61 | (6,79 \pm 0,01) \times 10 ⁶ |

Fonte: A autora, 2024.

Para o modelo 1, quando observando cada amostra separadamente, elas apresentam resultados compatíveis para todos os baricentros. As maiores diferenças ocorrem nos baricentros x da amostra A, discrepância de 1,69 μm e erro padrão 2,81 μm , e nos baricentros y da amostra C, discrepância de 1,55 μm e erro padrão de 1,55 μm . Dessa forma, se enquadrando dentro dos erros associados a esses valores.

Já se forem comparadas as segmentações do núcleo e da fibra inteira, entre as três amostras, os baricentros x da amostra A são incompatíveis com a amostra B e C, com discrepâncias mínimas de 10,49 μm e 12,87 μm e os erros padrão 2,76 μm e 2,53 μm , respectivamente. Entre os baricentros x, apenas a amostra B e C são compatíveis entre si, com discrepância de 4,35 μm e erro padrão de 2,48 μm . Para o baricentro y, a amostra A é inconclusiva com as amostras B e C, discrepâncias máximas de 2,55 μm e 3,21 μm e erros padrão de 0,90 μm e 1,33 μm . Contudo, a amostra B é compatível com a C, discrepância máxima de 1,94 μm e erro padrão de 1,20 μm .

O diâmetro de Feret apresentou resultados compatíveis para os dois casos com maior diferença entre a amostra A e C para o núcleo, de 1,02 μm e erro padrão de 0,76 μm , e entre

as amostras A e C para a fibra inteira, de $0,26 \mu m$ e erro padrão de $0,46 \mu m$. Também estando no intervalo de compatibilidade de duas vezes o erro padrão.

Para a área do núcleo, a amostra A é incompatível com a B e C, com discrepâncias de $114,03 \mu m^2$ e $108,98 \mu m^2$ e erros padrão de $10,05 \mu m^2$ e $9,29 \mu m^2$. Porém a amostra B e C são compatíveis entre si. Da mesma forma, para a área da fibra inteira a amostra A é compatível com a B, discrepância de $4,30 \mu m^2$ e erro padrão de $28,68 \mu m^2$, e inconclusiva com a amostra C, discrepância de $59,80 \mu m^2$ e erro padrão de $27,41 \mu m^2$. Já a mostra B é incompatível com a amostra C, discrepância de $55,50 \mu m^2$ e erro padrão de $10,19 \mu m^2$.

Para o volume do núcleo o resultado da amostra A é inconclusivo com B e C, discrepâncias de $45540 \mu m^3$ e $43640 \mu m^3$ e erro associado de $21034 \mu m^3$. Contudo a amostra B é compatível com C, discrepância de $19000 \mu m^3$ e erro associado de $21034 \mu m^3$. Para o volume da fibra inteira, a amostra A é compatível com B discrepância de $1720 \mu m^3$ e erro associado de $10894 \mu m^3$. A amostra C é inconclusiva com A e B, discrepâncias de $23930 \mu m^3$ e $22210 \mu m^3$ e erro associado de $10898 \mu m^3$. Portanto, para o modelo 1, apenas os resultados da *label analysis* de área, volume e alguns baricentros x e y não foram totalmente compatível. Todos os resultados de compatibilidade do Modelo 1 mencionados anteriormente, podem ser observados de maneira resumida na tabela 4.

Tabela 4 - Compatibilidade das medidas do Modelo 1

| Amos- tra | Diâmetro de Feret Núcleo | | | Amos- tra | Diâmetro de Feret Fibra Inteira | | | Amos- tra | Baricentro X | | | Amos- tra | Baricentro Y | | |
|--------------|--------------------------------|----------|----------|--------------|---------------------------------------|----------|----------|--------------|------------------|----------|----------|--------------|-------------------------|---------|---------|
| | A | B | C | | A | B | C | | A | B | C | | A | B | C |
| A | - | Verde | Verde | A | - | Verde | Verde | A | - | Vermelho | Vermelho | A | - | Amarelo | Amarelo |
| B | Verde | - | Verde | B | Verde | - | Verde | B | Vermelho | - | Verde | B | Amarelo | - | Verde |
| C | Verde | Verde | - | C | Verde | Verde | - | C | Vermelho | Verde | - | C | Amarelo | Verde | - |
| Amos- tra | Área Núcleo | | | Amos- tra | Área Fibra Inteira | | | Amos- tra | Volume Núcleo | | | Amos- tra | Volume Fibra Inteira | | |
| A | B | C | A | | B | C | A | | B | C | A | | B | C | |
| A | - | Vermelho | Vermelho | A | - | Verde | Amarelo | A | - | Amarelo | Amarelo | A | - | Verde | Amarelo |
| B | Vermelho | - | Verde | B | Verde | - | Vermelho | B | Amarelo | - | Verde | B | Verde | - | Amarelo |
| C | Verde | Verde | - | C | Amarelo | Vermelho | - | C | Amarelo | Verde | - | C | Amarelo | Amarelo | - |

Legenda: Em verde, os resultados compatíveis, em amarelo, os resultados inconclusivos e, em vermelho, os resultados incompatíveis.

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 5 - Resultado do modelo 2 das segmentações Núcleo e Fibra inteira

| Ordem de Segmentação | Diâmetro de Feret médio (μm) | Baricentro X (μm) | Baricentro Y (μm) | Área (μm^2) | Volume (μm^3) |
|----------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Amostra A | | | | | |
| Núcleo | $29,46 \pm 0,72$ | $84,21 \pm 1,99$ | $79,15 \pm 1,05$ | $610,53 \pm 1,04$ | $(2,44 \pm 0,03) \times 10^5$ |
| Fibra Inteira | $134,60 \pm 0,65$ | $84,44 \pm 1,98$ | $78,71 \pm 1,05$ | $14520,40 \pm 6,25$ | $(6,02 \pm 0,02) \times 10^6$ |
| Amostra B | | | | | |
| Núcleo | $29,27 \pm 0,72$ | $85,61 \pm 1,92$ | $78,65 \pm 0,63$ | $612,86 \pm 7,03$ | $(2,45 \pm 0,03) \times 10^5$ |
| Fibra Inteira | $132,50 \pm 0,57$ | $84,34 \pm 1,91$ | $79,11 \pm 0,63$ | $14300,2 \pm 15,0$ | $(6,03 \pm 0,02) \times 10^6$ |
| Amostra C | | | | | |
| Núcleo | $28,71 \pm 0,69$ | $85,82 \pm 1,57$ | $94,29 \pm 0,94$ | $594,91 \pm 2,18$ | $(2,38 \pm 0,03) \times 10^5$ |
| Fibra Inteira | $138,05 \pm 0,34$ | $83,85 \pm 1,57$ | $93,74 \pm 0,94$ | $14854,5 \pm 5,27$ | $(5,98 \pm 0,06) \times 10^6$ |

Fonte: A autora, 2024.

Para o modelo 2, analisando separadamente cada amostra, elas apresentam resultados compatíveis para todos os baricentros. As maiores diferenças ocorrem nos baricentros x da amostra C, discrepância de $1,97 \mu m$ e erro padrão $2,22 \mu m$, e nos baricentros y da amostra C, discrepância de $0,55 \mu m$ e erro padrão de $1,32 \mu m$. Dessa forma, se enquadrando dentro dos erros associados a esses valores.

Já se forem comparados os baricentros das segmentações do núcleo e da fibra inteira, entre as três amostras, o baricentro x tem todas as amostras compatíveis entre si, com discrepância máxima de $1,96 \mu m$ e os erros padrão de $2,48 \mu m$, respectivamente. Para o baricentro y, a amostra C é incompatível com as amostras A e B, discrepâncias mínimas de $8,12 \mu m$ e $14,63 \mu m$ e erros padrão de $1,41 \mu m$ e $1,13 \mu m$. Por outro lado, a amostra A é compatível com a B, discrepância máxima de $0,50 \mu m$ e erro padrão de $1,22 \mu m$.

O diâmetro de Feret apresentou resultados compatíveis para os núcleos com maior diferença entre a amostra A e C para o núcleo, de $0,75 \mu m$ e erro padrão de $0,79 \mu m$, estando no intervalo de compatibilidade de duas vezes o erro padrão. Entre as amostras da fibra inteira, a amostra A é inconclusiva com a B, discrepância de $2,10 \mu m$ e erro padrão de $0,86 \mu m$. A amostra C é incompatível com A e a B, $5,55 \mu m$ e $3,45 \mu m$ e erros padrão de $0,73 \mu m$ e $0,66 \mu m$.

Para a área do núcleo, a amostra A é incompatível com a C, com discrepância de $15,62 \mu m^2$ e erro padrão de $2,41 \mu m^2$, e as amostras B e C são inconclusivas entre si, discrepância de $17,95 \mu m^2$ e erro padrão de $7,36 \mu m^2$. Ainda, a amostra A é compatível com a B, discrepância de $4,30 \mu m^2$ e erro padrão de $7,10 \mu m^2$. Da mesma forma, para a área da fibra inteira todas as amostras são incompatíveis, com a menor discrepância de $220,20 \mu m^2$ e erro padrão de $15,90 \mu m^2$ entre as amostras A e B.

Para o volume do núcleo, o resultado da amostra A é compatível com B e C, com discrepâncias de $932 \mu m^3$ e $6253 \mu m^3$ e erro associado de $3190 \mu m^3$. Contudo a amostra B é inconclusiva com C, discrepância de $7185 \mu m^3$ e erro associado de $3190 \mu m^3$. Para o volume da fibra inteira, a amostra A é compatível com B e C, com discrepâncias de $11600 \mu m^3$ e $45600 \mu m^3$ com erro associado de $24689 \mu m^3$, respectivamente. A amostra B é inconclusiva com C, discrepância de $57200 \mu m^3$ e erro associado de $24689 \mu m^3$. Assim, para o modelo 2, todas as grandezas apresentaram pelo menos um resultado da *label analysis* inconclusivo ou incompatível. Todos os resultados de compatibilidade do Modelo 2 mencionados anteriormente, podem ser observados de maneira resumida na tabela 6.

Tabela 6 - Compatibilidade das medidas do Modelo 2

| Amos- tra | Diâmetro de Feret Núcleo | | | Amos- tra | Diâmetro de Feret Fibra Inteira | | | Amos- tra | Baricentro X | | | Amos- tra | Baricentro Y | | |
|--------------|--------------------------------|---------|----------|--------------|---------------------------------------|----------|----------|--------------|------------------|---------|---------|--------------|-------------------------|----------|----------|
| | A | B | C | | A | B | C | | A | B | C | | A | B | C |
| A | - | Verde | Verde | A | - | Amarelo | Vermelho | A | - | Verde | Verde | A | - | Verde | Vermelho |
| B | Verde | - | Verde | B | Amarelo | - | Vermelho | B | Verde | - | Verde | B | Verde | - | Vermelho |
| C | Verde | Verde | - | C | Vermelho | Vermelho | - | C | Verde | Verde | - | C | Vermelho | Vermelho | - |
| Amos- tra | Área Núcleo | | | Amos- tra | Área Fibra Inteira | | | Amos- tra | Volume Núcleo | | | Amos- tra | Volume Fibra Inteira | | |
| A | B | C | A | | B | C | A | | B | C | A | | B | C | |
| A | - | Verde | Vermelho | A | - | Vermelho | Vermelho | A | - | Verde | Verde | A | - | Verde | Verde |
| B | Verde | - | Amarelo | B | Vermelho | - | Vermelho | B | Verde | - | Amarelo | B | Verde | - | Amarelo |
| C | Vermelho | Amarelo | - | C | Vermelho | Vermelho | - | C | Verde | Amarelo | - | C | Verde | Amarelo | - |

Legenda: Em verde, os resultados compatíveis, em amarelo, os resultados inconclusivos e, em vermelho, os resultados incompatíveis.

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 7 - Resultado do modelo 3 das segmentações Núcleo e Fibra inteira

| Ordem de Segmentação | Diâmetro de Feret médio (μm) | Baricentro X (μm) | Baricentro Y (μm) | Área (μm^2) | Volume (μm^3) |
|----------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--|
| Amostra A | | | | | |
| Núcleo | 46,37 \pm 1,88 | 136,39 \pm 3,74 | 91,97 \pm 4,78 | 1556,87 \pm 7,18 | (6,23 \pm 0,03) \times 10 ⁵ |
| Fibra Inteira | 140,22 \pm 0,65 | 135,04 \pm 3,75 | 88,08 \pm 4,78 | 15266,7 \pm 10,8 | (6,11 \pm 0,05) \times 10 ⁶ |
| Amostra B | | | | | |
| Núcleo | 46,58 \pm 1,81 | 84,73 \pm 1,26 | 83,85 \pm 0,77 | 1572,37 \pm 2,68 | (6,29 \pm 0,03) \times 10 ⁵ |
| Fibra Inteira | 138,89 \pm 0,49 | 80,86 \pm 1,26 | 85,43 \pm 0,76 | 14961,60 \pm 9,97 | (5,99 \pm 0,05) \times 10 ⁶ |
| Amostra C | | | | | |
| Núcleo | 46,67 \pm 1,74 | 81,60 \pm 3,86 | 88,47 \pm 1,46 | 1574,47 \pm 7,19 | (6,30 \pm 0,03) \times 10 ⁵ |
| Fibra Inteira | 139,33 \pm 0,47 | 82,12 \pm 3,87 | 84,35 \pm 1,46 | 15063,70 \pm 10,50 | (6,03 \pm 0,05) \times 10 ⁶ |

Fonte: A autora, 2024.

Para o modelo 3, analisando separadamente cada amostra, elas apresentam resultados compatíveis para todos os baricentros, exceto as segmentações do baricentro x da amostra B que são inconclusivas, com discrepância de 3,87 μm e erro padrão de 1,78 μm .

Já se forem comparados os baricentros das segmentações do núcleo e da fibra inteira, entre as três amostras, os baricentros x da amostra A são incompatíveis com a amostra B e C, discrepância de 52,92 μm e 50,31 μm e os erros padrão 5,38 μm e 3,96 μm , respectivamente. Entre os baricentros x, apenas a amostra B e C são compatíveis entre si, com discrepância de 3,13 μm e erro padrão de 3,96 μm . Para o baricentro y, a amostra A é compatível com as amostras B e C, discrepâncias máximas de 8,12 μm e 7,62 μm e erros padrão de 4,84 μm e 4,99 μm . Contudo, a amostra B é inconclusiva com a C, discrepância mínima de 4,62 μm e erro padrão de 1,65 μm .

O diâmetro de Feret apresentou resultados compatíveis para os dois casos com maior diferença entre a amostra A e C para o núcleo, de 0,30 μm e erro padrão de 1,93 μm , e, entre as amostras A e B para a fibra inteira, de 1,33 μm e erro padrão de 0,81 μm . Desse modo, estando no intervalo de compatibilidade de duas vezes o erro padrão.

Para a área do núcleo, todas as amostras são compatíveis com maior discrepância e erro padrão, 17,83 μm^2 e 10,16 μm^2 , entre as amostras A e C. Da mesma forma, para a área

da fibra inteira todas as amostras são incompatíveis, com a menor discrepância de $102,10 \mu m^2$ e erro padrão de $14,48 \mu m^2$ entre as amostras B e C.

Para o volume do núcleo, o resultado da amostra A é inconclusivo com B e C, discrepâncias de $6206 \mu m^3$ e $6244 \mu m^3$ e erro associado de $2934 \mu m^3$. Contudo a amostra B é compatível com C, discrepância de $38 \mu m^3$ e erro associado de $4934 \mu m^3$. Para o volume da fibra inteira, a amostra A é inconclusiva com B discrepância de $122160 \mu m^3$ e erro associado de $50776 \mu m^3$. A amostra C é compatível com A e B, discrepâncias de $40840 \mu m^3$ e $81320 \mu m^3$ e erro associado de $50776 \mu m^3$. Logo, para o modelo 3, apenas a *label analysis* da área da fibra inteira obteve resultados incompatíveis. Todos os resultados de compatibilidade do Modelo 3 mencionados anteriormente, podem ser observados de maneira resumida na tabela 8.

Tabela 8 - Compatibilidade das medidas do Modelo 3

| Amos- tra | Diâmetro de Feret Núcleo | | | Amos- tra | Diâmetro de Feret Fibra Inteira | | | Amos- tra | Baricentro X | | | Amos- tra | Baricentro Y | | |
|--------------|--------------------------------|-------|-------|--------------|---------------------------------------|-------|-------|--------------|------------------|----------|----------|--------------|-------------------------|---------|---------|
| | A | B | C | | A | B | C | | A | B | C | | A | B | C |
| A | - | Verde | Verde | A | - | Verde | Verde | A | - | Vermelho | Vermelho | A | - | Amarelo | Verde |
| B | Verde | - | Verde | B | Verde | - | Verde | B | Vermelho | - | Verde | B | Amarelo | - | Verde |
| C | Verde | Verde | - | C | Verde | Verde | - | C | Vermelho | Verde | - | C | Verde | Verde | - |
| Amos- tra | Área Núcleo | | | Amos- tra | Área Fibra Inteira | | | Amos- tra | Volume Núcleo | | | Amos- tra | Volume Fibra Inteira | | |
| A | B | C | A | | B | C | A | | B | C | A | | B | C | |
| A | - | Verde | Verde | A | - | Verde | Verde | A | - | Amarelo | Amarelo | A | - | Verde | Amarelo |
| B | Verde | - | Verde | B | Verde | - | Verde | B | Amarelo | - | Verde | B | Verde | - | Amarelo |
| C | Verde | Verde | - | C | Verde | Verde | - | C | Amarelo | Verde | - | C | Amarelo | Amarelo | - |

Legenda: Em verde, os resultados compatíveis, em amarelo, os resultados inconclusivos e, em vermelho, os resultados incompatíveis.

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 9 - Resultado do modelo 4 das segmentações Núcleo e Fibra inteira

| Ordem de Segmentação | Diâmetro de Feret médio (μm) | Baricentro X (μm) | Baricentro Y (μm) | Área (μm^2) | Volume (μm^3) |
|----------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|---|
| Amostra A | | | | | |
| Núcleo | 91,52 \pm 1,80 | 125,55 \pm 0,23 | 136,01 \pm 1,82 | 3750,23 \pm 6,73 | (1,50 \pm 0,02) \times 10 ⁶ |
| Fibra Inteira | 224,24 \pm 0,50 | 123,28 \pm 0,23 | 136,47 \pm 2,11 | 39225,50 \pm 16,10 | (15,71 \pm 0,05) \times 10 ⁶ |
| Amostra B | | | | | |
| Núcleo | 91,08 \pm 1,12 | 124,4 \pm 0,25 | 127,79 \pm 0,55 | 3735,06 \pm 9,76 | (1,49 \pm 0,02) \times 10 ⁶ |
| Fibra Inteira | 224,01 \pm 0,51 | 122,49 \pm 0,26 | 127,61 \pm 0,55 | 39126,40 \pm 20,83 | (15,67 \pm 0,05) \times 10 ⁶ |
| Amostra C | | | | | |
| Núcleo | 88,54 \pm 0,95 | 124,88 \pm 0,06 | 125,09 \pm 1,90 | 3626,34 \pm 5,66 | (1,45 \pm 0,02) \times 10 ⁶ |
| Fibra Inteira | 223,34 \pm 0,20 | 125,89 \pm 0,01 | 126,74 \pm 1,91 | 38898,20 \pm 15,46 | (15,57 \pm 0,05) \times 10 ⁶ |

Fonte: A autora, 2024.

Para o modelo 4, analisando cada amostra separadamente, elas apresentam resultados incompatíveis para todos os baricentros x, com menor discrepância de 1,01 μm e erro padrão de 0,06 μm . Para os baricentros y, todos tiveram resultados compatíveis, com maior discrepância de 1,65 μm e erro padrão de 2,69 μm .

Já se forem comparados os baricentros das segmentações do núcleo e da fibra inteira, entre as três amostras, os baricentros x os valores de 125,55 μm , 124,40 μm , 124,88 μm e 125,89 μm são compatíveis entre si, e incompatíveis com os outros dois valores encontrados de 123,28 μm e 122,49 μm . Os dois últimos valores também são compatíveis entre si. Para o baricentro y, a amostra A é incompatível com as amostras B e C, discrepâncias mínimas de 8,40 μm e 9,27 μm e erros padrão de 1,90 μm e 2,64 μm . Contudo, a amostra B é compatível com a C, discrepância máxima de 2,70 μm e erro padrão de 1,98 μm .

O diâmetro de Feret apresentou resultados compatíveis para os dois casos com maior diferença entre a amostra A e C para o núcleo, de 2,98 μm e erro padrão de 2,03 μm , e, entre as amostras A e C para a fibra inteira, de 0,90 μm e erro padrão de 0,54 μm . Dessa maneira, estando no intervalo de compatibilidade de duas vezes o erro padrão.

Para a área do núcleo, todas as amostras são incompatíveis com exceção das amostras A e B que são compatíveis entre si, discrepância $15,17 \mu\text{m}^2$ e erro padrão $11,85 \mu\text{m}^2$. Da mesma forma, para a área da fibra inteira todas as amostras são incompatíveis, com a menor discrepância de $99,10 \mu\text{m}^2$ e erro padrão de $26,30 \mu\text{m}^2$ entre as amostras A e B.

Para o volume do núcleo, o resultado da amostra B é compatível com A e C, discrepâncias de $7580 \mu\text{m}^3$ e $43520 \mu\text{m}^3$ e erro associado de $22516 \mu\text{m}^3$. Contudo a amostra A é inconclusiva com C, discrepância de $51100 \mu\text{m}^3$ e erro associado de $22516 \mu\text{m}^3$. Para o volume da fibra inteira, a amostra B é compatível com A e C, discrepâncias de $39700 \mu\text{m}^3$ e $91400 \mu\text{m}^3$ com erro associado de $54891 \mu\text{m}^3$. A amostra A é inconclusiva com C, discrepância de $131100 \mu\text{m}^3$ e erro associado de $54891 \mu\text{m}^3$. Sendo assim, para o modelo 4, apenas a *label analysis* da área da fibra inteira obteve resultados incompatíveis. Todos os resultados de compatibilidade do Modelo 4 mencionados anteriormente, podem ser observados de maneira resumida na tabela 10.

Tabela 10 - Compatibilidade das medidas do Modelo 4

| Amos- tra | Diâmetro de Feret Núcleo | | | Amos- tra | Diâmetro de Feret Fibra Inteira | | | Amos- tra | Baricentro X | | | Amos- tra | Baricentro Y | | |
|--------------|--------------------------------|----------|----------|--------------|---------------------------------------|----------|----------|--------------|------------------|----------|----------|--------------|-------------------------|----------|----------|
| | A | B | C | | A | B | C | | A | B | C | | A | B | C |
| A | - | Verde | Verde | A | - | Verde | Verde | A | - | Vermelho | Vermelho | A | - | Vermelho | Vermelho |
| B | Verde | - | Verde | B | Verde | - | Verde | B | Vermelho | - | Vermelho | B | Vermelho | - | Verde |
| C | Verde | Verde | - | C | Verde | Verde | - | C | Vermelho | Vermelho | - | C | Vermelho | Verde | - |
| Amos- tra | Área Núcleo | | | Amos- tra | Área Fibra Inteira | | | Amos- tra | Volume Núcleo | | | Amos- tra | Volume Fibra Inteira | | |
| A | - | Vermelho | Vermelho | A | - | Vermelho | Vermelho | A | - | Verde | Amarelo | A | - | Verde | Amarelo |
| B | Vermelho | - | Vermelho | B | Vermelho | - | Vermelho | B | Verde | - | Verde | B | Verde | - | Verde |
| C | Vermelho | Vermelho | - | C | Vermelho | Vermelho | - | C | Amarelo | Verde | - | C | Amarelo | Verde | - |

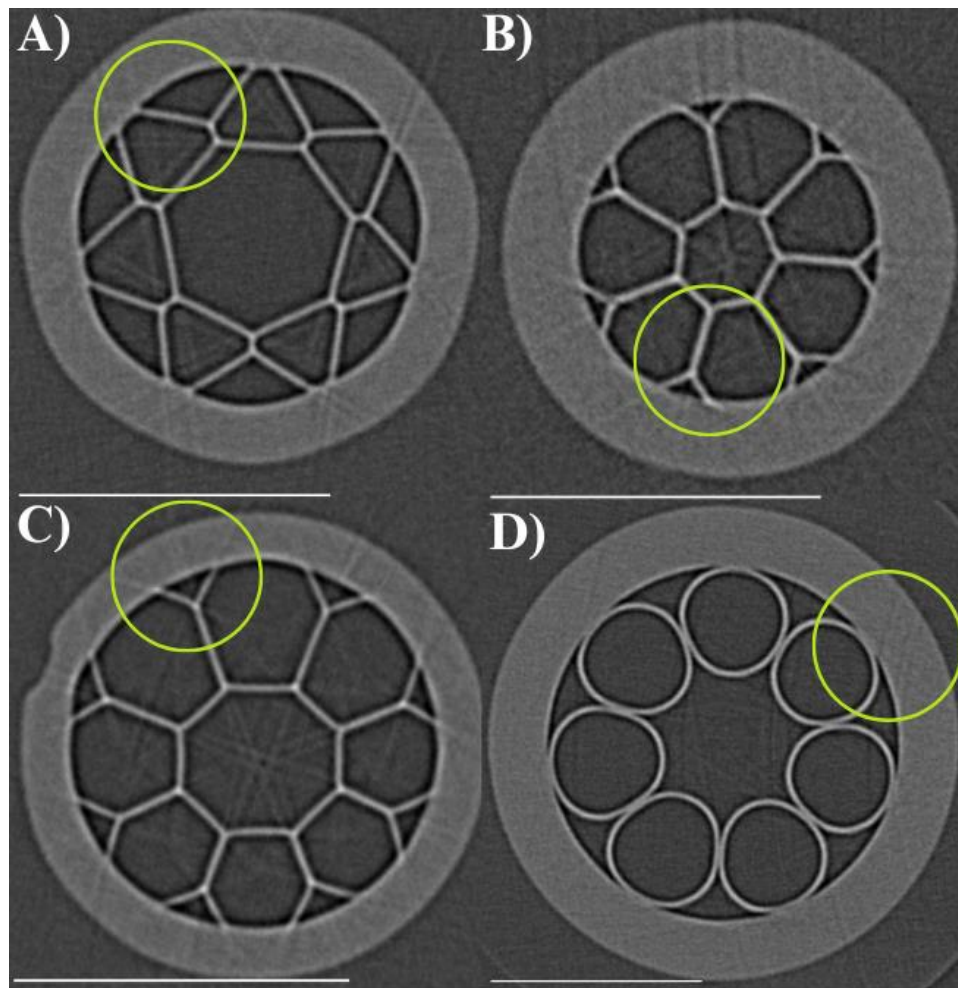
Legenda: Em verde, os resultados compatíveis, em amarelo, os resultados inconclusivos e, em vermelho, os resultados incompatíveis.

Fonte: A autora, 2024.

Analisando os resultados dos quatro modelos de forma geral, fica evidente que uma mesma fibra não produziu resultados iguais, mesmo que as três amostras tenham saído do mesmo cabo. Existiram flutuações nos valores, que podem ter ocorrido por dois motivos, a micro-CT e a segmentação.

Ao obter as imagens por micro-CT e reconstruí-las alguns artefatos podem aparecer nas *slices*, mesmo após utilizar um filtro para retirá-los. Esses artefatos podem ser linhas retas ou anéis, mais claras ou mais escuras que a amostra, como pode ser visto na figura 28, principalmente nos modelos 1 e 3, existem várias linhas na casca da fibra. E nos modelos 2 e 3, pode-se ver artefatos de anel ao longo dela. No modelo 4, esses efeitos aparecem suavizados.

Figura 28 - Artefatos de anel e linha nas *slices*



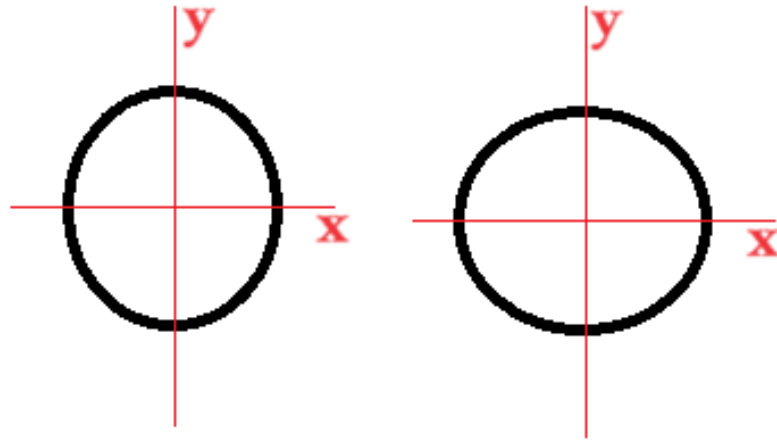
Legenda: Artefatos encontrados em cada modelo de PCF estudado. A) Modelo 1; B) Modelo 2; C) Modelo 3; D) Modelo 4.

Fonte: A autora, 2024.

Esses artefatos geram pontos mais claros ou mais escuros na imagem que podem complicar a segmentação posteriormente. Além disso, durante a segmentação existe a possibilidade de o programa não ter incluído *pixels* que formam a imagem da fibra ou adicionado *pixels* do *background*, principalmente no momento de segmentar as bordas da casca e do núcleo. Isso pode explicar as flutuações nos dados encontrados.

Percebeu-se que as maiores flutuações entre as amostras foram nos baricentros x ou y . Uma possibilidade para explicar esses resultados é a probabilidade de a fibra não ser perfeitamente circular, possuindo bordas mais achatadas ao longo de sua superfície. Levando em consideração que as amostras não foram medidas na mesma posição exata, essas mudanças de localização podem modificar o valor do baricentro dependendo de onde a fibra está. Esse raciocínio está exemplificado de forma exagerada na Figura 29.

Figura 29 - Diferença nos baricentros de acordo com a esfericidade da circunferência



Legenda: Uma circunferência em posições diferentes, mostrando que o tamanho dos seus baricentros não será o mesmo nos dois casos.

Fonte: A autora, 2024.

Por fim, analisando os dados da espessura das paredes internas e cascas, a ferramenta *width* gerou o resultado para a espessura de cada parede, que foram utilizados para produzir a média desse valor. A média foi escolhida para integrar a tabela 7 abaixo, porém o diâmetro de cada parede de cada amostra pode ser visto em uma tabela no Apêndice I desse trabalho.

Tabela 11 - Médias dos diâmetros das paredes internas e casca dos quatro modelos de fibra

| Modelo e amostra de fibra | Média do diâmetro das paredes (μm) | Média do diâmetro da casca (μm) |
|---------------------------|---|--|
| Modelo 1 | | |
| Amostra A | 4,18 | 58,8 |
| Amostra B | 4,29 | 56,4 |
| Amostra C | 4,10 | 60,2 |
| Modelo 2 | | |
| Amostra A | 3,43 | 54,2 |
| Amostra B | 3,24 | 54,6 |
| Amostra C | 3,30 | 55,6 |
| Modelo 3 | | |
| Amostra A | 3,11 | 51,0 |
| Amostra B | 3,23 | 52,6 |
| Amostra C | 3,21 | 45,2 |
| Modelo 4 | | |
| Amostra A | 9,58 | 90,4 |
| Amostra B | 9,76 | 87,8 |
| Amostra C | 9,43 | 85,4 |

Fonte: A autora, 2024.

Primeiramente, observando as médias dos valores das paredes, a diferença entre as medidas foi pequena, em torno de $0,19 \mu m$ no máximo, para o modelo 1 e modelo 2. Para o modelo 3 também foi baixa com uma discrepância de $0,12 \mu m$ e, para o modelo 4, a maior diferença foi de $0,33 \mu m$. Esses valores estão dentro do tamanho de pixel gerado na micro-CT, que é resolução da imagem.

Inicialmente se esperava que o tamanho das paredes internas fossem iguais, por virem do mesmo cabo. Porém, flutuações em seus valores foram encontradas, principalmente ao analisar os dados brutos das tabelas do Apêndice I. As discrepâncias no modelo 1 chegam a $3,83 \mu m$ para as paredes internas e $3,60 \mu m$ para as cascas. Para o modelo 2 são de até $3,22 \mu m$ para as paredes internas e $2,80 \mu m$ para as cascas. O modelo 3 tem a maior diferença sendo de $3,15 \mu m$ para as paredes internas e $4,40 \mu m$ para as cascas. E, por último, o modelo 4 apresentou a maior discrepância de $5,74 \mu m$ para as paredes internas e $4,20 \mu m$ para as cascas.

As flutuações observadas são grandes se comparadas com o tamanho da própria parede, sendo uma com o dobro do valor da outra ou mais. Isto pode ocorrer por dois motivos. O primeiro é a segmentação não ter sido feita da melhor maneira, já que foi realizada de maneira manual. Como o programa não conseguia detectar certos pontos da fibra, foi

necessário realizá-la à mão. Contudo, o operador da segmentação manual também pode não detectar as regiões da melhor forma, distinguindo pixels de tons muito próximos como parte do material ou não, e, assim, incluir ou excluir *pixels*. Esse fato é inerente ao processo de segmentação.

A segunda possibilidade é que essas flutuações sejam regulares para uma fibra PCF, visto que são de poucos micrometros. Na literatura, dificilmente se encontra a margem de erro em que essas fibras são produzidas e apenas resultados aproximados dos valores das paredes. Por isso, não foi possível fazer essa comparação com precisão.

Analisando o resultado das segmentações em um geral, se percebe que medidas em uma dimensão como o diâmetro de Feret apresentam resultados mais próximos do esperado no *Avizo* 3D, considerando as fibras como iguais. Por outro lado, para artefatos pequenos como as paredes o programa já apresenta falhas e é necessário uma segmentação manual, que não é ideal, resultando em uma discrepância alta entre as amostras.

Para a área, o programa também apresentou resultados próximos, apesar de seus erros associados serem pequenos para as medidas serem compatíveis entre si. Já para o volume, os resultados foram compatíveis, em sua maioria, com discrepância relativamente baixas quando comparadas com o valor dos volumes, de 0,4% até 4% dependendo do modelo. Dessa forma, a segmentação se mostra como uma alternativa boa para medir microestruturas, mas falha em pontos com tamanho próximo do *pixel size* da medida.

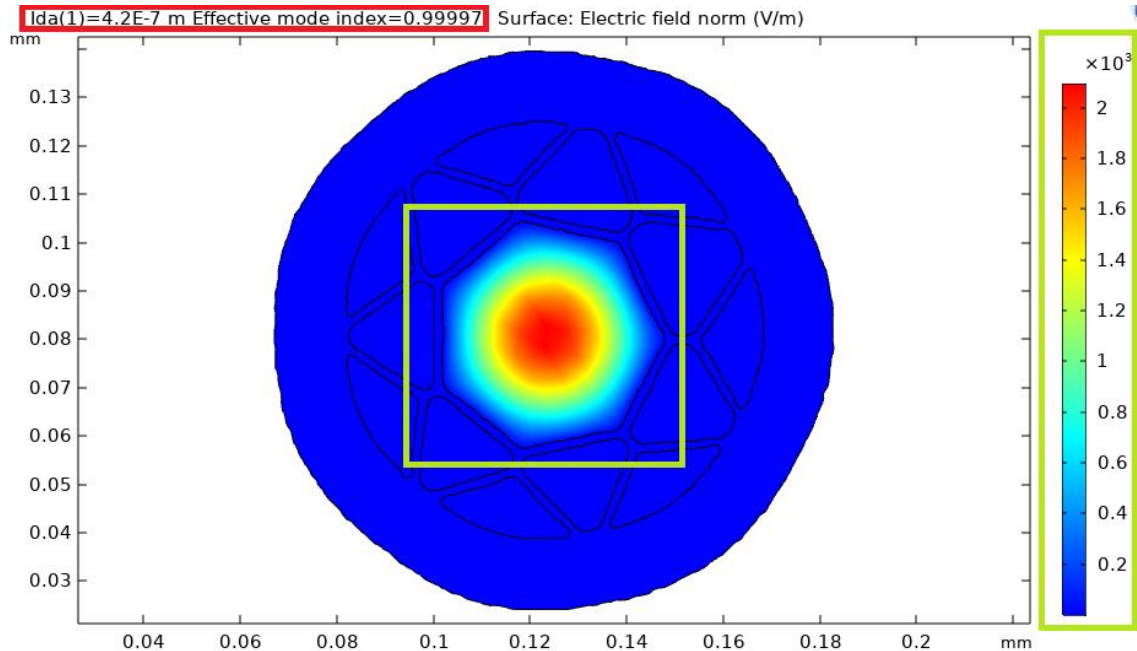
3.2 Resultado das simulações computacionais no COMSOL *multiphysics*

O objetivo da simulação computacional nas fibras é observar o comportamento dos modos de propagação da luz e a perda de confinamento gerada, assim, definindo qual das geometrias é mais adequada para o dispositivo sensor pensado. Isso será feito, identificando qual geometria produz o modo central e fundamental com a maior intensidade luminescente, analisando a intensidade de campo elétrico em volts por metro, V/m , e a menor perda de confinamento, a partir da parte imaginária do índice de refração, calculada com o auxílio da equação (25), secção 1.1.3.

Essa análise é produzida ao identificar, em cada modo, qual o comprimento de onda utilizado, o índice de refração do modo, o buraco da fibra em que a luz se propaga, a intensidade do campo elétrico no buraco e a perda de confinamento. Esse estudo é feito por meio da imagem da geometria (Figura 30), oferecida no próprio *software*, para cada um dos modos

de propagação na fibra e pelo gráfico de comprimento de onda por parte imaginária do índice de refração.

Figura 30 - Pontos analisados durante a simulação exemplificados no modo de propagação fundamental do modelo 1 amostra B



Legenda: Análise de um modo de propagação fundamental do modelo 1 fibra B, onde, no retângulo vermelho, se encontra o comprimento de onda e o índice de refração efetivo específico do modo. E, no quadrado e retângulo verdes, pode-se observar o buraco no qual a luz se propaga, a intensidade de campo elétrico dentro dele e o espectro de intensidades correspondentes ao lado.

Fonte: A autora, 2024.

Para tanto, inicialmente, serão analisados os resultados das três amostras de cada modelo, comparando-os, para observar se uma mesma geometria produz os mesmos resultados de modos de propagação, intensidades de campo elétrico e perda de confinamento. E, também, selecionar o melhor modo de propagação entre elas. Em seguida, esses resultados serão expandidos para uma comparação entre os quatro diferentes modelos propostos, chegando a uma posição final de qual fibra maximizará o funcionamento do sistema ao produzir o melhor modo de propagação, para cada um dos comprimentos de onda propostos.

Os critérios utilizados para definir qual modelo é o melhor candidato ao sensor, em ordem de prioridade, foram os seguintes:

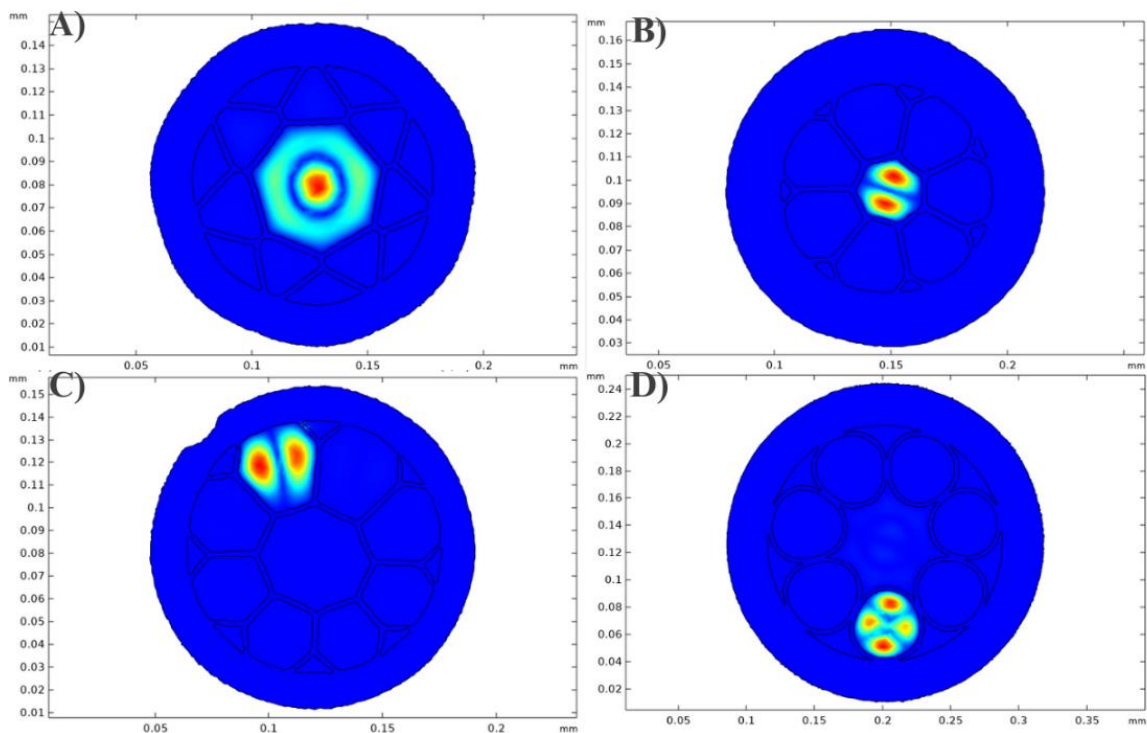
- ✓ Maior intensidade gerada em um modo de propagação fundamental no buraco central
- ✓ Menor perda de confinamento correspondente a esse modo

A opção por selecionar apenas um modo por amostra de fibra se justifica no momento da montagem do sensor, onde é possível utilizar lentes para encontrar um modo específico,

nesse caso, o modo fundamental. Dessa forma, pode-se selecionar o modo com menor perda e maior intensidade, garantindo que a luz se propague pelo maior tempo possível na fibra. Já a escolha de buraco foi feita por existir maior facilidade de propagar a luz em um buraco central em comparação com os demais.

Dentre todos os modelos de fibra foram obtidos vários modos de propagação distintos, tanto nos buracos adjacentes quanto no central. Alguns deles podem ser vistos na figura 31 abaixo. Vale ressaltar que a imagem ilustra apenas alguns das centenas de modos produzidos em cada simulação.

Figura 31 - Alguns dos diferentes modos de propagação gerados na simulação



Legenda: Alguns dos resultados gerados nas simulações A) no modelo 1, B) no modelo 2, C) no modelo 3 e D) no modelo 4.

Fonte: A autora, 2024.

Como foi delimitado que apenas buracos centrais e com o modo fundamental seriam analisados para esse trabalho, todos os modos com as características diferentes do fundamental, como os modos da Figura 31, foram descartados. Essa filtragem reduziu o número de resultados para dois por amostra, que foram comparados e, ao final, um foi escolhido como o melhor modo para a amostra correspondente. Os dados desses modos estão dispostos nas tabelas 8 e 9, junto com a análise dos resultados.

Tabela 12 – Intensidades de campo elétrico e perdas de confinamento dos melhores modos de cada modelo de fibra para 420 nm

| Modelo de Fibra | Localização da Amostra | Intensidade de campo elétrico (V/m) | Menor perda (dB/km) |
|-----------------|------------------------|--|------------------------|
| Modelo 1 | Amostra A | 2500 | $1,64 \times 10^{-8}$ |
| Modelo 1 | Amostra B | 2500 | $2,38 \times 10^{-10}$ |
| Modelo 1 | Amostra C | 2500 | $1,72 \times 10^{-10}$ |
| Modelo 2 | Amostra A | 1600 | $1,42 \times 10^{-9}$ |
| Modelo 2 | Amostra B | 1800 | $3,44 \times 10^{-8}$ |
| Modelo 2 | Amostra C | 2000 | $1,94 \times 10^{-9}$ |
| Modelo 3 | Amostra A | 2500 | $2,75 \times 10^{-8}$ |
| Modelo 3 | Amostra B | 2500 | $4,60 \times 10^{-9}$ |
| Modelo 3 | Amostra C | 2500 | $4,15 \times 10^{-10}$ |
| Modelo 4 | Amostra A | 4000 | $4,50 \times 10^{-8}$ |
| Modelo 4 | Amostra B | 3500 | $9,78 \times 10^{-11}$ |
| Modelo 4 | Amostra C | 4000 | $4,26 \times 10^{-11}$ |

Fonte: A autora, 2024.

Comparando, primeiramente, o mesmo modelo de fibra para 420 nm (Tabela 7), fica evidente que as microestruturas da geometria não são exatamente iguais nos quatro casos. Todas elas geraram resultados diferentes, com modos de propagação distintos, ou seja, com índices de refração efetivos dispares. Alguns desses modos apresentam a mesma intensidade de campo elétrico, modelo 1 e modelo 3, porém como suas perdas de confinamento tem valores diferentes, eles não são iguais.

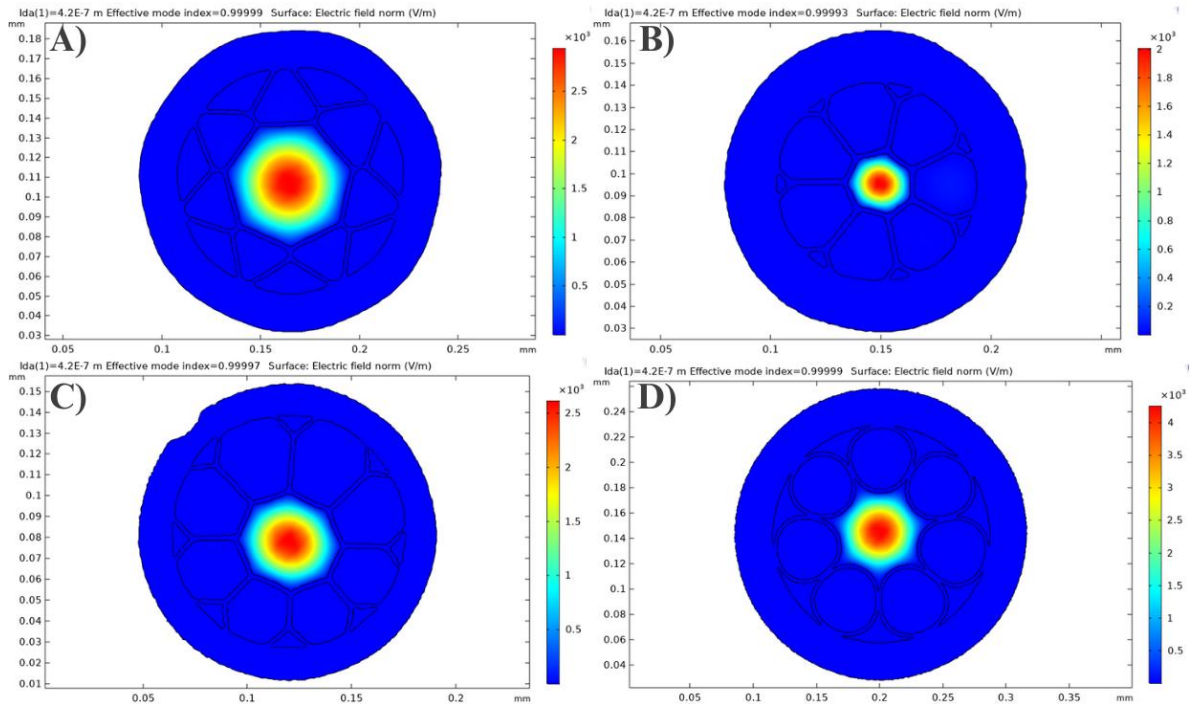
Esperava-se que, se todas as microestruturas fossem exatamente iguais, os modos de propagação gerados fossem os mesmos. Dessa forma, o valor de intensidade de campo elétrico e de perda de confinamento seriam os mesmos para as três amostras de fibra (A, B e C) de cada modelo. Porém, isso não aconteceu para nenhum dos modelos simulados.

Esse resultado corrobora com os dados obtidos na caracterização geométrica, que já indicavam certa diferença entre suas estruturas, principalmente com relação ao centro geométrico, o que pode ocasionar diferenças na forma com que a luz se propaga e alterar os cinquenta modos em que o COMSOL resolveu a equação de Bessel.

Expandindo a análise para as intensidades de campo elétrico apresentadas por cada modelo, observa-se que o melhor modo gerado em qualquer uma das amostras tem intensidade de campo elétrico maior que $1000 V/m$, com perdas na ordem de grandeza de $10^{-8} dB/km$ até $10^{-11} dB/km$. Determinando um modo promissor para cada modelo, o

modelo 1 amostra C, o modelo 2 amostra C, o modelo 3 amostra C e o modelo 4 amostra C se destacam quando comparados apenas entre o mesmo modelo. Esses modos podem ser observados na figura 32, que apresenta as imagens da simulação no COMSOL para cada um deles.

Figura 32 - Melhor modo por modelo de fibra para 420 nm



Legenda: Modo simulado escolhido como o melhor para cada modelo em 420 nm, sendo, A) amostra C do modelo 1, B) amostra C do modelo 2, C) amostra C do modelo 3 e D) amostra C do modelo 4.

Fonte: A autora, 2024.

Porém, comparando esses quatro modos conforme as prioridades determinadas anteriormente, o modelo 4 destaca ao produzir os melhores valores de intensidade de campo elétrico e 4000 V/m e de perda de confinamento $4,26 \times 10^{-11} \text{ dB/km}$.

Além disso, o modelo 4 também se sobressai para uma comparação mais geral com todas as amostras da tabela 7. Todas as suas amostras possuem intensidade entre 3500 V/m e 4000 V/m . Já os outros modelos chegam até 2500 V/m . Outro ponto é que sua perda de confinamento é a menor em duas das três amostras, $9,78 \times 10^{-11} \text{ dB/km}$, e $4,26 \times 10^{-11} \text{ dB/km}$ nas amostras B e C respectivamente. Já os outros modelos contam com perdas em até 10^{-10} dB/km .

Portanto, para 420 nm, o modelo 4 é o melhor candidato para o dispositivo sensor, por produzir o melhor resultado para um modo de propagação, e, também, ter resultados promissores nas três amostras de fibra com as intensidades mais altas e perdas baixas mais

baixas. Elegendo uma entre as três como a melhor, a amostra C tem a maior intensidade e menor perda.

Tabela 13 - Intensidades de campo elétrico e perdas de confinamento dos melhores modos de cada modelo de fibra para 550 nm

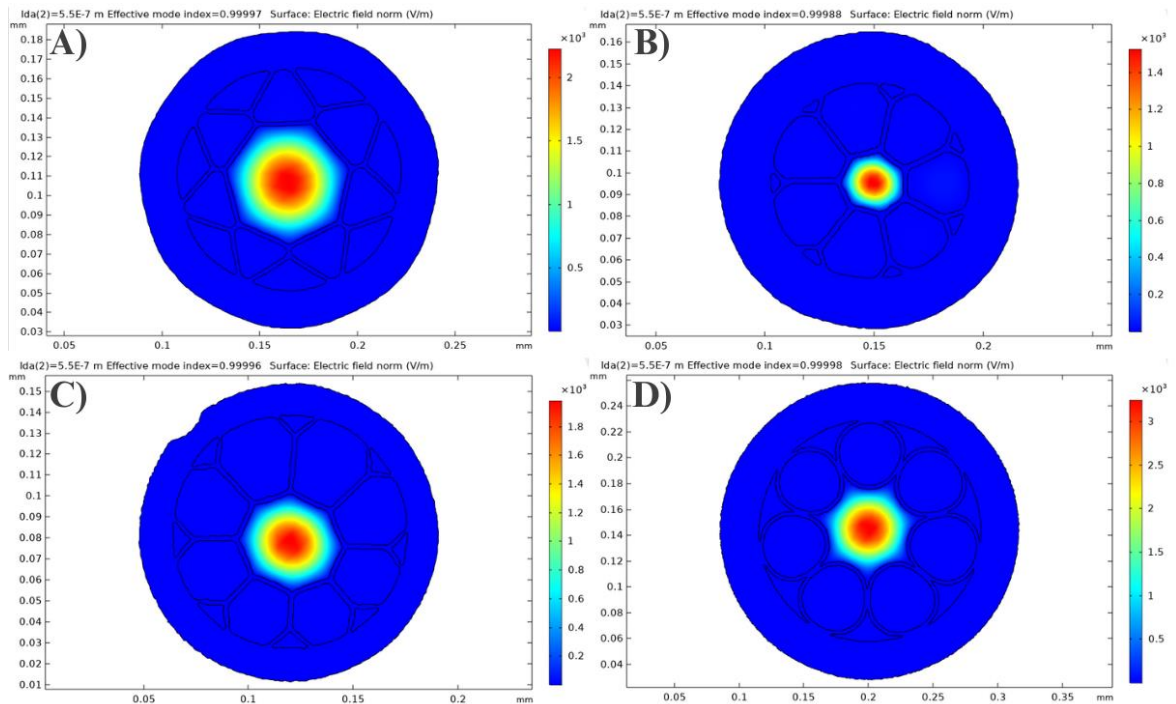
| Modelo de Fibra | Localização da Amostra | Intensidade de campo elétrico (V/m) | Menor perda (dB/km) |
|-----------------|------------------------|--|------------------------|
| Modelo 1 | Amostra A | 2000 | $1,41 \times 10^{-8}$ |
| Modelo 1 | Amostra B | 2000 | $3,04 \times 10^{-10}$ |
| Modelo 1 | Amostra C | 2000 | $7,28 \times 10^{-11}$ |
| Modelo 2 | Amostra A | 1400 | $1,80 \times 10^{-8}$ |
| Modelo 2 | Amostra B | 1000 | $1,90 \times 10^{-9}$ |
| Modelo 2 | Amostra C | 1400 | $2,62 \times 10^{-9}$ |
| Modelo 3 | Amostra A | 2000 | $6,42 \times 10^{-8}$ |
| Modelo 3 | Amostra B | 1800 | $4,97 \times 10^{-10}$ |
| Modelo 3 | Amostra C | 1800 | $1,57 \times 10^{-10}$ |
| Modelo 4 | Amostra A | 3000 | $3,97 \times 10^{-8}$ |
| Modelo 4 | Amostra B | 3000 | $2,52 \times 10^{-10}$ |
| Modelo 4 | Amostra C | 3000 | $1,77 \times 10^{-10}$ |

Fonte: A autora, 2024.

Comparando, inicialmente, as amostras de um mesmo modelo para 550 nm, a mesma constatação feita para 420 nm se confirma nesses resultados. Apesar de alguns modelos produzirem intensidades de campo elétrico iguais, modelo 1 e modelo 4, e outros terem intensidades próximas, as perdas de confinamento tem valores diferentes, portanto são modos diferentes. Indo contra o pensado inicialmente, para as amostras de um modelo, já que são todas provenientes do mesmo cabo.

Ampliando os resultados para os quatro modelos de fibra, se observa que todas geraram modos com intensidade acima de ou igual a 1000 V/m e perdas entre 10^{-8} dB/km até 10^{-11} dB/km. Realizando a escolha de uma amostra promissora por modelo, de acordo com os critérios impostos, temos, o modelo 1 amostra C, modelo 2 amostra C, modelo 3 amostra C e modelo 4 amostra C se destacando como melhores. No modelo 3 a amostra C foi escolhido, porque, apesar de possuir uma intensidade de campo elétrico 2000 V/m menor, tem a perda consideravelmente mais baixa se comparada com a mostra A, que detêm a maior luminescência, $1,57 \times 10^{-10}$ dB/km para a amostra C e $6,42 \times 10^{-8}$ dB/km para a amostra A. Os quatro modos simulados escolhidos como melhores podem ser visto na figura 33.

Figura 33 - Melhor modo por modelo de fibra para 550 nm



Legenda: Modo simulado escolhido como o melhor para cada modelo em 550 nm, sendo, A) amostra C do modelo 1, B) amostra C do modelo 2, C) amostra C do modelo 3 e D) amostra C do modelo 4
 Fonte: A autora, 2024.

Entre os quatro modelos escolhidos (Figura 33), o modelo 4 considerado o melhor em uma comparação de “custo-benefício” envolvendo os dois pontos desse trabalho. Apesar do modelo 1 possuir a perda mais baixa de todas, $7,28 \times 10^{-11} \text{ dB/km}$, o modelo quatro possui uma intensidade de campo elétrico um terço maior com uma perda também baixa, $1,77 \times 10^{-10} \text{ dB/km}$.

Dessa maneira, de modo similar as fibras em 420 nm, a simulação para 550 nm tem o mesmo modelo de fibra se destacando com relação aos outros. O modelo 4 possui resultados melhores em uma comparação com os demais. Principalmente pelas intensidades superiores de campo elétrico em todas as suas amostras, com 3000 V/m , e duas das menores perdas se comparadas com todos os modelos, $2,52 \times 10^{-10} \text{ dB/km}$ para a amostra B e $1,77 \times 10^{-10} \text{ dB/km}$ para a amostra C.

Logo, para 550 nm, o modelo 4 é o melhor candidato para o dispositivo sensor, por ter o melhor resultado para um modo de propagação, e, também, produz resultados promissores nas três amostras de fibra com as maiores intensidades e perdas baixas. Com a amostra C sendo a mais promissora por ter a maior intensidade e menor perda.

Além das análises separadas dos modos de propagação por comprimento de onda, pode-se fazer um estudo com respeito aos materiais radioluminescentes, com objetivo de

constatar qual melhor substância se adequa às PCFs para o dispositivo sensor. Isto pode ser feito ao comparar o melhor modo de propagação e a melhor perda para cada um dos modelos nos dois comprimentos de onda (Tabela 10).

Tabela 14 - Melhores modos, com maior intensidade e sua respectiva perda, por modelo de fibra para os comprimentos de 420 *nm* e 550 *nm*

| Modelo de Fibra | Localização da Amostra | Intensidade de campo elétrico (<i>V/m</i>) | Menor perda (<i>dB/km</i>) | Comprimento de onda (<i>nm</i>) |
|-----------------|------------------------|--|------------------------------|-----------------------------------|
| Modelo 1 | Amostra C | 2500 | $1,72 \times 10^{-10}$ | 420 |
| Modelo 1 | Amostra C | 2000 | $7,28 \times 10^{-11}$ | 550 |
| Modelo 2 | Amostra C | 2000 | $1,94 \times 10^{-9}$ | 420 |
| Modelo 2 | Amostra C | 1400 | $2,62 \times 10^{-9}$ | 550 |
| Modelo 3 | Amostra C | 2500 | $4,15 \times 10^{-10}$ | 420 |
| Modelo 3 | Amostra C | 1800 | $2,52 \times 10^{-10}$ | 550 |
| Modelo 4 | Amostra C | 4000 | $4,26 \times 10^{-11}$ | 420 |
| Modelo 4 | Amostra C | 3000 | $1,77 \times 10^{-10}$ | 550 |

Fonte: A autora, 2024.

Com relação a intensidade de campo elétrico, todos os modelos produzem valores maiores ou iguais para 420 *nm* em comparação com 550 *nm*. Além disso, o maior valor de intensidade também é produzido nesse comprimento, com 4000 *V/m*. Se for observada a perda de confinamento relacionada a esses dois comprimentos de onda, percebe-se que os dois comprimentos de onda geram perdas em torno de 10^{-9} *dB/km* até 10^{-11} *dB/km*.

Diante disso, o material radioluminescente de 420 *nm*, a Alumina dopada com Carbono, é a escolha mais adequada de material. Principalmente por produzir intensidades de campo elétrico mais altas, já que a perda de confinamento foi similar para dos dois comprimentos de onda. Por isso, se destaca como o melhor candidato para material radioluminescente com o uso das PCFs no dispositivo sensor.

Como para os dois comprimentos de onda, o modelo 4 de fibra produz resultados mais eficientes, isso mostra que provavelmente a geometria desse modelo propicia perdas menores no geral, portanto, é a mais adequada para a construção do sensor, independente do material utilizado. Contudo, existe um material que produz melhores resultados e deve ser priorizado nas próximas etapas de construção.

No que diz respeito a magnitude das perdas encontradas no COMSOL, que estão em torno de 10^{-8} *dB/km* até 10^{-11} *dB/km*, em comparação com outros trabalhos, na literatura se encontram resultados variando de 10^{-3} *dB/km* até 10^{-9} *dB/km* a depender do tipo de

PCF e geometria. Entretanto, dificilmente esses trabalhos com PCFs utilizam comprimentos de onda na faixa do visível, a maioria opera em 1550 nm, no infravermelho.

Em Haxha; Ademgil, 2008, a perda para 500 nm é menor que 10^{-7} dB/km, e em Aoni *et al.*, 2013 a perda é menor que 10^{-8} dB/km para 1200 nm, e em Hossain; Maniruzzaman, 2015, para 800 nm a perda é da ordem de 10^{-9} dB/km, os três para de núcleo sólido. Para PCFs *hollow core*, em Zheng *et al.*, 2021, a perda gira em torno de 10^{-2} dB/km para 1200 nm e para Debord *et al.*, 2013, a perda chega a 10^{-3} dB/km de 500 nm até 400 nm.

Além disso, com relação a diferença encontrada nos modos para os dois comprimentos de onda, esse resultado pode ser explicado, pelas segmentações. A imagem utilizada para as simulações é de uma *slice* segmentada e o resultado da caracterização mostrou que apesar de parecidas, as amostras não têm exatamente as mesmas medidas. Isso, possivelmente, gerou modos com a mesma intensidade ou intensidades próximas, mudando apenas o valor da perda.

Provavelmente esses resultados se devem a pequenas flutuações, mas não irrelevantes para o cálculo do índice de refração efetivo na parte imaginária do modo. Entretanto, esse entrave não desqualifica os resultados obtidos, pois todas as amostras demonstraram bons valores de intensidade de campo elétrico e perdas baixas coerentes com a literatura, apesar de distintos.

No geral, as simulações produziram bons resultados, principalmente com perdas baixas de acordo com a literatura. Assim, tornando seus dados valiosos para o próximo passo na construção do sensor de radiação, com material radioluminescente e modelo de PCF escolhidos.

CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi apresentado o estudo das fibras PCFs visando o desenvolvimento de sensores de radiação. As amostras utilizadas foram quatro modelos de PCFs divididos em três, gerando doze amostras no total. Esse estudo foi realizado em duas etapas, a de caracterização geométrica e de simulação dos modos de propagação.

A caracterização se deu a partir da técnica de micro-CT com três etapas: aquisição das imagens, reconstrução e segmentação. Dessa forma, chegando a uma segmentação tridimensional das fibras onde foi possível medir diâmetro de Feret, Baricentros X e Y, área e volume no programa Avizo 3D. Já as simulações foram produzidas no programa COMSOL *Multiphysics*, gerando simulações de modos de propagação, onde foi observada a distribuição geométrica da luz na fibra e, adicionalmente, calculada a perda de confinamento em cada um dos modelos.

O processo de microtomografia computadorizada e reconstrução das imagens foi produzido com sucesso, gerando imagens nítidas. Dessa forma, o processo de segmentação no *Avizo* 3D foi simplificado, produzindo com êxito a separação das regiões desejadas. Desse modo, foi executável calcular todos os parâmetros bidimensionais, diâmetro de Feret, baricentro x e y e área, em mil slices diferentes. Os grupos de dados geraram resultados consistentes, para quase todos os parâmetros, sobre cada um dos modelos de PCF.

Esse método auxiliou e facilitou o processo de obtenção das características geométricas da fibra, poupando horas de trabalho se comparado com outros recursos como o MEV. Com isso, a investigação de quatro modelos com três amostra cada, foi facilitada e viabilizada de forma mais simples e descomplicada.

Além disso, por meio das simulações em COMSOL *Multiphysics* foi possível identificar todos os modos de propagação requisitados que resolvem as equações de Bessel, observando a intensidade de campo elétrico nos buracos das PCFs e calcular a perda de confinamento associada a cada um deles. Consequentemente, encontrou-se o modo fundamental propagado no buraco central de cada fibra e comparou-se os quatro modelos e suas amostras entre si, chegando à conclusão de qual das PFCs é a melhor candidata ao papel de porta amostra e guia de luz e qual o material radioluminescente mais indicado para o sensor.

Para 420 nm , o melhor modo encontrado tem intensidade de campo elétrico e de perda de confinamento de 4000 V/m e $4,26 \times 10^{-11}\text{ dB/km}$, na amostra C do modelo 4. Em 550 nm , o melhor modo possui de intensidade de campo elétrico e de perda de confinamento de 3000 V/m e $1,77 \times 10^{-10}\text{ dB/km}$, na amostra C do modelo 4. Portanto, o

resultado apontou para o mesmo modelo tanto em 420 nm quanto em 550 nm , o modelo 4 foi escolhido por produzir os melhores resultados para os dois quesitos propostos, maior intensidade de campo elétrico e menor perda de confinamento.

Ademais, o material radioluminescente indicado para esse projeto, entre os dois estudados, seria o que luminesce no comprimento de onda de 420 nm , a Alumina dopada com Carbono. Visto que apresentou um resultado mais relevantes para a maioria dos modelos de fibra, quando comparado o melhor modo de propagação de cada amostra.

Porém, como o esperado era que o mesmo modelo de fibra possuísse o mesmo valor das grandezas segmentadas e de modos de propagação nas simulações, e todos esses dados foram distintos entre eles, provavelmente existem incertezas associadas que modificaram o resultado do trabalho. As PCFs podem ter variações nas microestruturas, mas não o suficiente para modificar os modos de propagação ao longo de um mesmo cabo.

Desse modo, o principal entrave pode ter ocorrido devido ao processo de micro-CT, não conseguiu detectar as estruturas da melhor maneira possível. Isso talvez possa ser contornado ao medir as fibras em outro tomógrafo com maior resolução ou em um esquema diferente do produzido nesse trabalho.

Outro ponto importante é a segmentação das fibras produzida de forma semiautomática, onde o programa seleciona a área de interesse a partir dos pixels de um ponto da imagem selecionado pelo usuário. Isto pode produzir segmentações com ou sem alguns pixels que compõe a imagem, principalmente nas paredes dos buracos internos.

Esse processo dificilmente pode ser corrigido manualmente pelo usuário por se tratar de frações muito pequenas da imagem com tons parecidos para o olho humano distinguir apenas visualmente. Uma solução seria utilizar outro software ou uma segmentação automatizada. Logo, essas incertezas podem gerar uma propagação de erros até o momento da simulação, causando resultados diferentes para os modos de propagação entre um mesmo modelo de PCF.

Apesar disso, esse estudo se faz muito útil ao utilizar uma nova e mais completa técnica para caracterização de fibras ópticas. Onde, se tornou possível obter resultados com uma gama maior de grandezas para as microestruturas da fibra, otimizando tempo de produção e caracterização.

As simulações em PCFs também se mostraram como uma maneira rápida e descomplicada de observar o comportamento da luz dentro da geometria e obter sua perda de confinamento. Dessa maneira, possibilitando a constatação de quais materiais se adaptarão

melhor ao sistema e efetivamente devem ser adquiridos antes de iniciar o experimento físico, poupando tempo e recursos com tentativas e erros.

Logo, conclui-se as PCFs são candidatas em potencial para servirem como porta amostra e guia de luz na construção de um sensor, pois independente do modelo, as simulações mostraram que todas podem guiar a luz produzida pelos materiais radioluminescentes com perdas baixas, em especial se o material for a Alumina dopada com Carbono.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Entre as perspectivas futuras desse trabalho estão várias etapas da construção do dispositivo sensor e sugestões para melhorar a caracterização das fibras PCF. Com o objetivo de validar os resultados das segmentações, pode-se produzir uma imagem no MEV das PCFs para compará-las com os resultados obtidos de diâmetro de Feret e Baricentros X e Y na micro-CT, a fim de detectar a discrepância entre elas. Além disso, produzir uma nova micro-CT desses mesmos modelos com um nanotomógrafo que possua resolução maior que o utilizado ou com esquema diferente, com outro tipo de feixe de raios X por exemplo.

Posteriormente, o que se espera é a continuidade desse trabalho ao criar o sensor de radiação ionizante descrito ao longo do trabalho. Primeiramente será necessário adquirir o material radioluminescente escolhido, ou, possivelmente, testar outros materiais não selecionados anteriormente por meio do método criado nesse trabalho, no *COMSOL multiphysics*.

Em seguida, acontecerá a confecção do dispositivo com as PCFs e o material radioluminescente, sendo necessário um estudo de como o material radioluminescente será depositado dentro de um ou mais buracos da PCF, quantidade de material e entre outros. Por fim, com o dispositivo em funcionamento, serão realizados testes para garantir o bom funcionamento do sensor idealizado.

Além disso, esse estudo pode auxiliar muitos outros no que diz respeito ao uso da técnica de micro-CT e dos *softwares Avizo 3D* e *COMSOL multiphysics* para as fibras ópticas. Seja para a construção de um dispositivo sensor ou apenas para estudos de geometria e simulações de modos de propagação e perda de confinamento, como uma orientação ou guia.

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, T.; RAY, A. K. **Image processing, principles and applications**. New Jersey: Willey-Interscience, 2005.
- ACOSTA PÉREZ, M. A.; SUÁREZ CASTRILLÓN, A.; SUÁREZ CASTRILLÓN, A. M.; Desarrollo y ensayo de um sensor qupimico de fibra óptica para la medición de concentraciones de dióxido de carbono. **Tecnura**, [S. l.], v. 20, n. 50, p. 29–42, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a02>. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2016000400002 . Acesso em: 17 set. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (BRASIL). Resolução da Diretoria Colegiada nº 611 de 9 de março de 2022. Estabelece os requisitos sanitários para a organização e o funcionamento de serviços de radiologia diagnóstica ou intervencionista e regulamenta o controle das exposições médicas, ocupacionais e do público decorrentes do uso de tecnologias radiológicas diagnósticas ou intervencionistas. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 mar. 2022.
- AGRAWAL, G. P. **Fiber-optic communication systems**. 3. ed. New York: Wiley-Interscience, 2002.
- AGRAWAL, G. P. **Nonlinear fiber optics**. 3. ed. California: Academic Press, 2001.
- AKSELROD, M. S.; KORTOV, V. S.; GORELOVA, E. A. Preparation and properties of Alpha-Al₂O₃:C. **Radiation Protection Dosimetry**, [S. l.], v. 47, n. 1–4, p. 159–164, 1993. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a081723. Disponível em: <https://academic.oup.com/rpd/article-lookup/doi/10.1093/oxfordjournals.rpd.a081723>. Acesso em: 17 set. 2024.
- AONI, R. A.; AHMED, R.; ALAM, Md. M.; RAZZAK, S. M. A. Optimum design of a nearly zero ultra-flattened dispersion with lower confinement loss photonic crystal fibers for communication systems. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 4, 2013.
- AVIZO USER'S GUIDE. **Avizo User's Guide**. [S. l.: s. n.], 2022.
- BANDYOPADHYAY, H. **An introduction to image segmentation: deep learning vs. traditional [+Examples]**. 2021. Disponível em: <https://www.v7labs.com/blog/image-segmentation-guide>. Acesso em: 17 set. 2024.
- BIRKS, J. B. **The theory and practice of scintillation counting**. London: Pergamon Press, 1964.
- BLINN, J. F. What is a pixel? **IEEE Computer Graphics and Applications**, [S. l.], v. 25, n. 5, p. 82–87, 2005. DOI: 10.1109/MCG.2005.119. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1510545/>. Acesso em: 17 set. 2024.

BRUKER CORPORATION MICROCT. **An overview of NRecon**: reconstructing the best images from your microCT scan. 2014. Disponível em: https://www.foa.unesp.br/Home/pesquisa/escritoriodeapoioapesquisa/mn062_nreconoverview.pdf. Acesso em: 24 jul. 2024.

BRUKER MICROCT. **SkyScan 1272 User Manual**. 2018. Disponível em: https://research.rutgers.edu/sites/default/files/2022-02/1272_UserManual_v1_2.pdf. Acesso em: 10 jul. 2024.

BUCZYNSKI, R. Photonic crystal fibers. **Acta Physica Polonica A**, [S. l.], v. 106, n. 2, p. 141–167, 2004. DOI: 10.12693/APhysPolA.106.141. Disponível em: <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/106/a106z216.pdf>. Acesso em: 17 set. 2024.

COLAÇO, M. V.; CAMARA, A. R.; NOGUEIRA, L. P.; CARVALHO, I. C. S.; MARGULIS, W.; BARROSO, R. C. Characterization of the microstructures of specialty optical fibers for electric-field sensing by propagation-based xray phase-contrast microtomography. **Measurement Science and Technology**, [S. l.], v. 32, n. 6, p. 065401, 2021. DOI: 10.1088/1361-6501/abd365. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/abd365>. Acesso em: 17 set. 2024.

COMSOL MULTIPHYSICS. **COMSOL Multiphysics**: Reference Manual. , 2019. Disponível em: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

CRISP, J. **Introduction to fiber optics**. 2. ed. Oxford: Newnes, 2001.

DAS, S.; SEN, R. Design of photonic crystal fiber for 5G communication using COMSOL Multiphysics. In: INTERNATIONAL ELECTRONIC CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES, 4., 2023, Basel. **Anais [...]**. Basel: MDPI, 2023. p. 153. DOI: 10.3390/ASEC2023-16309. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4591/56/1/153>. Acesso em: 17 set. 2024.

DE, M.; GANGOPADHYAY, T. K.; SINGH, V. K. Prospects of photonic crystal fiber as physical sensor: an overview. **Sensors**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 464, 2019. DOI: 10.3390/s19030464. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/464>. Acesso em: 17 set. 2024.

DEBORD, B.; ALHARBI, M.; BRADLEY, T.; FOURCADE-DUTIN, C.; WANG, Y. Y.; VINCETTI, L.; GÉRÔME, F.; BENABID, F. Hypocycloid-shaped hollow-core photonic crystal fiber Part I: Arc curvature effect on confinement loss. **Optics Express**, [S. l.], v. 21, n. 23, p. 28597, 2013. DOI: 10.1364/OE.21.028597. Disponível em: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-21-23-28597>. Acesso em: 17 set. 2024.

DIONISIO, F. C. F.; OLIVEIRA, L. S.; HERNANDES, M. A.; ENGEL, E. E.; AZEVEDO-MARQUES, P. M.; NOGUEIRA-BARBOSA, M. H. Manual versus semiautomatic segmentation of soft-tissue sarcomas on magnetic resonance imaging: evaluation of similarity and comparison of segmentation times. **Radiologia Brasileira**, [S. l.], v. 54, n. 3, p. 155–164, 2021. DOI: 10.1590/0100-3984.2020.0028. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-39842021000300155&tlng=en. Acesso em: 17 set. 2024.

FERREIRA, T.; RASBAND, W. **The ImageJ User Guide — Version 1.44**. [S. l.: s. n.], 2011.

HASANUZZAMAN, G. K. M.; IEZEKIEL, S.; MARKOS, C.; HABIB, Md. S. Hollow-core fiber with nested anti-resonant tubes for low-loss THz guidance. **Optics Communications**, [S. l.], v. 426, p. 477–482, 2018. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.05.071. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030401818304620>.

HAXHA, S.; ADEMGIL, H. Novel design of photonic crystal fibres with low confinement losses, nearly zero ultra-flatted chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area. **Optics Communications**, [S. l.], v. 281, n. 2, p. 278–286, 2008. DOI: 10.1016/j.optcom.2007.09.041. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030401807009571>. Acesso em: 17 set. 2024.

HECHT, E. **Optics**. 4th. ed. San Francisco: Pearson Education, 2002.

HOSEINIAN, M. S.; BOLORIZADEH, M. A. Design and simulation of a highly sensitive spr optical fiber sensor. **Photonic Sensors**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 33–42, 2019. DOI: 10.1007/s13320-018-0508-7. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13320-018-0508-7>. Acesso em: 17 set. 2024.

HOSSAIN, Md. B.; BULBUL, A. A.M.; MUKIT, M. A.; PODDER, E. Analysis of optical properties for square, circular and hexagonal photonic crystal fiber. **Optics and Photonics Journal**, [S. l.], v. 07, n. 11, p. 235–243, 2017. DOI: 10.4236/opj.2017.711021. Disponível em: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/opj.2017.711021>. Acesso em: 17 set. 2024.

HOSSAIN, Md. M.; MANIRUZZAMAN, Md. Study of confinement loss in photonic crystal fiber. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS, ELECTRONICS & INFORMATION ENGINEERING, 2015, Rajshahi. [**Proceedings ...**] . Rajshani, 2015.

LANDIS, E. N.; KEANE, D. T. X-ray microtomography. **Materials Characterization**, [S. l.], v. 61, n. 12, p. 1305–1316, 2010. DOI: 10.1016/j.matchar.2010.09.012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044580310002706>. Acesso em: 17 set. 2024.

LIMA, I.; APPOLONI, C.; OLIVEIRA, L.; LOPES, R. T. Caracterização de materiais orgânicos através da microtomografia computadorizada 3D. **Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação**, [S. l.], v. 1, n. (2), p. 22–27, 2007. Disponível em: <https://www.uel.br/grupos/gfna/micromat.pdf>. Acesso em: 17 set. 2024.

LIU, Z.; TAM, H. Y. Fabrication and sensing applications of special microstructured optical fibers. In: XU, F.; MOU, C. (Eds.). **Selected topics on optical fiber technologies and applications**. [S. l.] : InTech, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.70755. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/selected-topics-on-optical-fiber-technologies-and-applications/fabrication-and-sensing-applications-of-special-microstructured-optical-fibers>. Acesso em: 17 set. 2024.

MENIN, O. H.; ARTIOLI, V. R. Tomografia de impedância elétrica: uma nova técnica de imageamento em medicina. **Revista Iluminart**, São Paulo, n. 5, 2010. Disponível em: <http://revistailuminart.ti.srt.ifsp.edu.br/index.php/iluminart/article/view/95>. Acesso em: 17 set. 2024.

MESCIA, L.; PRUDENZANO, F. Advances on Optical Fiber Sensors. **Fibers**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 1–23, 2013. DOI: 10.3390/fib2010001. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6439/2/1/1>. Acesso em: 17 set. 2024.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

PAL, N. R.; PAL, S. K. A review on image segmentation techniques. **Pattern Recognition**, [S. l.], v. 26, n. 9, p. 1277–1294, 1993. DOI: 10.1016/0031-3203(93)90135-J. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/003132039390135J>. Acesso em: 17 set. 2024.

PENDÃO, C.; SILVA, I. Optical fiber sensors and sensing networks: overview of the main principles and applications. **Sensors**, [S. l.], v. 22, n. 19, p. 7554, 2022. DOI: 10.3390/s22197554. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/19/7554>. Acesso em: 17 set. 2024.

PORTOSI, V.; LANEVE, D.; FALCONI, M. C.; PRUDENZANO, F. Advances on Photonic Crystal Fiber Sensors and Applications. **Sensors**, [S. l.], v. 19, n. 8, p. 1892, 2019. DOI: 10.3390/s19081892. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1892>. Acesso em: 17 set. 2024.

RODET, T.; NOO, F.; DEFRISE, M. The cone-beam algorithm of Feldkamp, Davis, and Kress preserves oblique line integrals. **Medical Physics**, [S. l.], v. 31, n. 7, p. 1972–1975, 2004. DOI: 10.1118/1.1759828. Disponível em: <https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1118/1.1759828>. Acesso em: 17 set. 2024.

RUSSELL, P. Photonic crystal fibers. **Science**, [S. l.], v. 299, n. 5605, p. 358–362, 2003. DOI: 10.1126/science.1079280. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1079280>. Acesso em: 17 set. 2024.

SALDANHA, M. F. S.; FREITAS, C. **Segmentação de imagens digitais: uma revisão**. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/mtcm18@80/2010/06.22.18.13/doc/106003.pdf>. Acesso em: 17 set. 2024.

SANTORO, A.; MAHON, J. R.; OLIVEIRA, J. U. C. L.; MUNDIM FILHO, L. M.; OGURI, V.; SILVA, W. L. P. **Estimativas e erros em experimentos de física**. 3. ed. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2013.

SENIOR, J. M.; JAMRO, M. Y. **Optical fiber communications principles and practice**. 3. ed. London: Pearson, 2009.

SOGHRA, G.; JAMAL, B.; BAHAR, M. Design and analysis of surface plasmon resonance based photonic crystal fiber sensor employing gold nanowires. **Optik**, [S. l.], v. 260, p. 169026, 2022. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.169026. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402622003965>. Acesso em: 17 set. 2024.

SOUZA, L. F. **Produção e caracterização de compostos à base de MgB4O7 para aplicação em dosimetria**. 2016. Tese (Pós-Graduação em Física) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/5244>. Acesso em: 17 set. 2024.

TAUHATA, L.; SALATI, I.; PRINZIO, R.; PRINZIO, A. R. Detectores de radiação. In: **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 9. ed. Rio de Janeiro: CNEN, 2013. P. 181–233. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073465.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

TEMKINA, V.; MEDVEDEV, A.; MAYZEL, A. Computer simulation of the fiber optic electric field sensor. **Journal of Physics: Conference Series**, [S. l.], v. 1236, n. 1, p. 012031, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012031. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1236/1/012031>. Acesso em: 17 set. 2024.

THERMO FISHER SCIENTIFIC. **TLD-100TM Thermoluminescent Dosimetry Material**. Disponível em: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/br/pt/SNO10106>. Acesso em: 17 set. 2024.

UNIVERSITY OF OSLO. **University of Oslo – UiO Hub**. Disponível em: <https://www.next.uio.no/hubs-and-capacities/uio-hub/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

VÁSÁRHELYI, L.; KÓNYA, Z.; KUKOVECZ, Á.; VAJTAI, R. Microcomputed tomography-based characterization of advanced materials: a review. **Materials Today Advances**, [S. l.], v. 8, p. 100084, 2020. DOI: 10.1016/j.mtadv.2020.100084. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S259004982030031X>.

VELAMURI, A.; PATEL, K.; GUPTA, S.; SHARMA, I.; KRISHNAMURTHY, P. K. Study of Bending Losses in Optical Fibers using COMSOL. **COMSOL Conf.**, Bangalore, India, p. 1–5, 2018.

ZHENG, W.; QIN, Y.; XU, O.; XIANG, M.; PENG, Di; FU, S.; LI, J. Wideband low confinement loss anti-resonant hollow core fiber with nested Ushape tube. **Optics Express**, [S. l.], v. 29, n. 15, p. 24182, 2021. DOI: 10.1364/OE.434015. Disponível em: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=oe-29-15-24182>. Acesso em: 17 set. 2024.

ZOLLA, F.; RENVERSEZ, G.; NICOLET, A.; KUHLMEY, B.; GUENNEAU, S.; FELBACQ, D. **Foundations of photonic crystal fibres**. [S. l.] :Imperial College Press, 2005. DOI: 10.1142/p367. Disponível em: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/p367>. Acesso em: 17 set. 2024.

ZUBAIR, H. T. et al. Real-time radiation dosimetry using P-doped sílica optical fiber. **Measurement**, [S. l.], v. 146, p. 119-124, 2019. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.06.010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224119305767>. Acesso em: 17 set. 2024.

APÊNDICE A – TABELAS COM OS RESULTADOS DA SEGMENTAÇÃO PAREDES DA FIBRA

Tabela 15 - Espessura das paredes do Modelo 1 para as três amostras

| Nº das paredes | Amostra A (μm) | Amostra B (μm) | Amostra C (μm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 2,40 | 4,40 | 3,21 |
| 2 | 3,60 | 3,20 | 2,80 |
| 3 | 5,68 | 4,00 | 4,57 |
| 4 | 5,13 | 5,01 | 4,80 |
| 5 | 3,59 | 5,14 | 3,20 |
| 6 | 3,43 | 4,13 | 3,91 |
| 7 | 4,79 | 3,51 | 3,20 |
| 8 | 3,06 | 5,86 | 4,87 |
| 9 | 3,79 | 3,70 | 3,49 |
| 10 | 4,00 | 5,54 | 5,16 |
| 11 | 4,52 | 6,23 | 4,02 |
| 12 | 4,60 | 2,40 | 4,07 |
| 13 | 5,52 | 3,49 | 4,26 |
| 14 | 3,60 | 3,66 | 4,68 |
| 15 | 4,10 | 4,91 | 4,80 |
| 16 | 5,47 | 3,60 | 3,37 |
| 17 | 3,69 | 3,49 | 5,08 |
| 18 | 3,06 | 6,10 | 3,90 |
| 19 | 4,80 | 4,20 | 4,00 |
| 20 | 5,72 | 3,60 | 3,07 |
| 21 | 3,34 | 3,95 | 5,73 |

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 16 - Espessura da casca do Modelo 1 para as três amostras

| Medidas da casca | Amostra A (μm) | Amostra B (μm) | Amostra C (μm) |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 58,8 | 56,4 | 58,4 |
| 2 | 58,8 | 58,0 | 62,0 |

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 17 - Espessura das paredes do Modelo 2 para as três amostras

| N° das paredes | Amostra A (μm) | Amostra B (μm) | Amostra C (μm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 5,63 | 4,35 | 3,86 |
| 2 | 2,40 | 3,38 | 4,90 |
| 3 | 2,80 | 4,53 | 3,63 |
| 4 | 4,40 | 3,81 | 3,00 |
| 5 | 3,14 | 3,01 | 2,00 |
| 6 | 3,26 | 2,76 | 2,40 |
| 7 | 2,77 | 3,00 | 3,00 |
| 8 | 3,03 | 2,40 | 2,40 |
| 9 | 5,20 | 2,40 | 2,77 |
| 10 | 2,56 | 2,94 | 2,80 |
| 11 | 2,40 | 2,94 | 3,58 |
| 12 | 3,47 | 3,06 | 5,05 |
| 13 | 2,73 | 2,91 | 2,94 |
| 14 | 3,27 | 2,85 | 3,85 |
| 15 | 3,20 | 4,00 | 2,41 |
| 16 | 3,82 | 2,85 | 2,50 |
| 17 | 4,00 | 2,80 | 3,00 |
| 18 | 3,59 | 3,00 | 3,30 |
| 19 | 3,59 | 2,80 | 3,60 |
| 20 | 2,93 | 2,90 | 3,28 |
| 21 | 3,62 | 3,08 | 2,62 |
| 22 | 3,71 | 2,80 | 3,00 |
| 23 | 2,40 | 4,80 | 5,19 |
| 24 | 3,39 | 2,40 | 4,99 |
| 25 | 3,82 | 3,05 | 2,77 |
| 26 | 3,79 | 3,90 | 2,40 |
| 27 | 3,24 | 2,89 | 3,06 |
| 28 | 3,98 | 5,18 | 4,07 |

Fonte: A Autora, 2024.

Tabela 18 - Espessura da casca do Modelo 2 para as três amostras

| Medidas da casca | Amostra A (μm) | Amostra B (μm) | Amostra C (μm) |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 53,6 | 53,2 | 56,0 |
| 2 | 54,8 | 56,0 | 55,2 |

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 19 - Espessura das paredes do Modelo 3 para as três amostras

| N° das paredes | Amostra A (μm) | Amostra B (μm) | Amostra C (μm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 3,54 | 3,61 | 2,00 |
| 2 | 2,40 | 3,21 | 2,40 |
| 3 | 3,28 | 3,50 | 2,80 |
| 4 | 3,95 | 2,40 | 4,89 |
| 5 | 2,43 | 4,73 | 5,16 |
| 6 | 3,68 | 3,15 | 2,97 |
| 7 | 3,08 | 2,83 | 2,40 |
| 8 | 2,59 | 3,20 | 3,00 |
| 9 | 2,95 | 2,67 | 3,76 |
| 10 | 2,43 | 2,96 | 3,60 |
| 11 | 4,04 | 3,23 | 2,00 |
| 12 | 2,68 | 3,80 | 3,24 |
| 13 | 3,26 | 2,94 | 3,88 |
| 14 | 2,70 | 2,91 | 2,80 |
| 15 | 3,65 | 3,15 | 3,50 |
| 16 | 3,11 | 3,07 | 3,47 |
| 17 | 2,40 | 2,80 | 2,80 |
| 18 | 4,02 | 2,67 | 2,40 |
| 19 | 3,11 | 2,94 | 3,30 |
| 20 | 2,95 | 3,06 | 2,40 |
| 21 | 3,38 | 3,53 | 3,21 |
| 22 | 2,40 | 2,82 | 2,98 |
| 23 | 2,90 | 2,80 | 2,80 |
| 24 | 3,85 | 3,12 | 4,25 |
| 25 | 2,64 | 2,95 | 2,40 |
| 26 | 3,11 | 3,28 | 2,40 |
| 27 | 3,08 | 4,93 | 4,33 |
| 28 | 3,49 | 3,38 | 3,39 |
| 29 | 4,12 | 2,88 | 4,24 |
| 30 | 2,40 | 3,86 | 3,37 |
| 31 | 2,95 | 3,68 | 2,62 |
| 32 | 2,86 | 3,20 | 4,02 |

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 20 - Espessura da casca do Modelo 3 para as três amostras

| Medidas da casca | Amostra A (μm) | Amostra B (μm) | Amostra C (μm) |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 48,8 | 52,0 | 46,8 |
| 2 | 53,2 | 53,2 | 43,6 |

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 21 - Espessura das paredes do Modelo 4 para as três amostras

| N° das paredes | Amostra A (μm) | Amostra B (μm) | Amostra C (μm) |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 10,40 | 14,54 | 8,40 |
| 2 | 8,34 | 8,12 | 8,50 |
| 3 | 11,64 | 8,14 | 11,98 |
| 4 | 11,21 | 8,40 | 9,47 |
| 5 | 9,37 | 12,29 | 8,26 |
| 6 | 11,60 | 12,58 | 12,00 |
| 7 | 8,01 | 7,56 | 9,63 |
| 8 | 8,96 | 11,28 | 6,91 |
| 9 | 11,30 | 9,94 | 10,54 |
| 10 | 8,96 | 7,60 | 7,65 |
| 11 | 9,04 | 8,95 | 8,68 |
| 12 | 9,18 | 8,67 | 7,73 |
| 13 | 9,36 | 7,73 | 12,64 |
| 14 | 8,80 | 7,49 | 7,20 |
| 15 | 8,40 | 10,93 | 12,01 |
| 16 | 11,67 | 8,80 | 6,80 |
| 17 | 12,39 | 10,52 | 8,21 |
| 18 | 8,89 | 11,03 | 8,52 |
| 19 | 12,64 | 8,57 | 12,01 |
| 20 | 10,64 | 10,55 | 12,53 |
| 21 | 9,33 | 11,20 | 8,37 |

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 22 - Espessura da casca do Modelo 4 para as três amostras

| Medidas da casca | Amostra A (μm) | Amostra B (μm) | Amostra C (μm) |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 90,0 | 90,4 | 85,2 |
| 2 | 90,8 | 85,2 | 85,6 |

Fonte: A autora, 2024.