



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

HENRIQUE PATRIOTA ALVES

FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D: fabricação e aplicações em sensoriamento

Recife
2020

HENRIQUE PATRIOTA ALVES

FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D: fabricação e aplicações em sensoriamento

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fotônica.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Jehan Fonseca do Nascimento.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

A474f	Alves, Henrique Patriota. Fibra óptica com perfil D: fabricação e aplicações em sensoriamento / Henrique Patriota Alves. - 2020. 171 folhas, il., gráfs., tabs. Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho. Coorientador: Prof. Dr. Jehan Fonseca do Nascimento. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020. Inclui Referências e Apêndices. 1. Engenharia Elétrica. 2. Fibra óptica de perfil D. 3. Sensores. 4. Polimento. 5. Modelagem. 6. Índice de refração. 7. Corrosão. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira (Orientador). II. Nascimento, Jehan Fonseca do (Coorientador). III. Título UFPE 621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2021-32
-------	---

HENRIQUE PATRIOTA ALVES

FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D: fabricação e aplicações em sensoriamento

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 18 / 12 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jehan Fonseca do Nascimento (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Renato Evangelista de Araujo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo Fontana (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Hypólito José Kalinowski (Examinador Externo)
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Sérgio Campello Oliveira (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Dedico esta Tese de Doutorado às pessoas que são essenciais em minha vida. Em especial, à minha amada Avó, Dulcineia, que é meu maior tesouro e que sempre me apoiou na minha jornada em busca de conhecimento. É uma dádiva de Deus ter você em minha vida. Essa conquista é nossa.

À minha Mãe, Aldira, por sempre me mostrar que o caminho de luz é aquele guiado pela Fé.

À minha Noiva, Paula Julianne, que é minha fonte de inspiração, que com sua delicadeza e amor torna minha vida mais leve e completa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre iluminar meus caminhos.

Ao meu orientador, Professor Joaquim Ferreira Martins Filho, que sempre me direcionou para os melhores caminhos na Pós-Graduação e pela honra de partilhar da sua experiência e fazer parte do Grupo de Sensores e Instrumentação.

Ao meu coorientador, Professor Jehan Fonseca Nascimento, que participou ativamente da minha formação de pesquisador, pelo apoio em cada passo dado desde o meu ingresso no PPGEE e pela confiança que deposita em mim a cada trabalho que realizamos.

Ao Professor Eduardo Fontana, que sempre contribuiu para minha formação de pesquisador e para a realização desta Tese, desde as disciplinas até o acesso ao seu laboratório e equipamentos que contribuíram para fabricação de perfil D em fibras óptica.

Ao Professor Renato Evangelista de Araújo e seu aluno de Doutorado, Túlio de Lima Pedrosa, que contribuíram com a microscopia óptica da superfície polida as amostras de fibra com perfil D, que foi essencial para o enriquecimento dos resultados desta Tese.

Ao Daniel Lucas, estudante de Engenharia Eletrônica no DES, que em sua Iniciação Científica colaborou com o processo de automação da fabricação de fibras com perfil D.

Aos amigos que a Pós-Graduação me presenteou: Marcio, Marianne, Hebio, Valdemir, Allamys e Raoni, pelo apoio e parcerias nos trabalhos e pelos momentos descontraídos regados com muito café.

Aos amigos que ganhei ao longo da minha jornada na UFPE: Paulo Peixoto, Giovana Siracura, Maylson, Mozart, Felipe, Edgar, Aristóteles e Lizandra.

À minha família, por todo apoio e motivação dado ao longo dessa jornada.

Aos meus amigos de infância, Lêdson e André, pela torcida de sempre e todos os momentos de descontração.

À minha vizinha, Maria Madalena, pelo carinho de sempre e por todos os momentos em que orou por mim.

À FACEPE, pela bolsa de Doutorado.

À Secretária Andréa Tenório, pelo seu comprometimento com PPGEE, e que sempre contribuiu para minha participação em conferências nacionais e internacional.

Ao CNPq, à CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPE pelo suporte financeiro.

RESUMO

Esta Tese apresenta um processo de fabricação de perfil D em fibras ópticas e suas aplicações em sensoriamento. A técnica de polimento empregada resultou na fabricação de fibras ópticas de perfil D com diferentes valores *rms* de rugosidade de superfície, que são os valores de altura média quadrática que caracterizam a superfície rugosa. Essas fibras foram usadas em um sensor de índice de refração. Os resultados obtidos com esse sensor, fazendo uso de uma fibra de perfil D com baixo valor *rms* de rugosidade, apresentam comportamento semelhante ao observado para uma fibra de perfil D de uso comercial. Os resultados obtidos para o sensor à base de fibras de perfil D rugoso indicam que a rugosidade de superfície contribuiu positivamente para a resposta do sensor de índice de refração, mostrando que, com uma estrutura simples, é possível obter um sensor com figuras de mérito semelhantes às exibidas por elementos sensores com estruturas mais complexas, descritos na literatura. A rugosidade de superfície das fibras de perfil D foi caracterizada a partir de imagens de microscopia óptica, que permitiram obter suas representações topológicas e seus valores *rms*. Um modelo computacional, que aproxima a rugosidade por um fractal de ordem três, foi implementado no COMSOL *Multiphysics*, para complementar as análises dos resultados experimentais. Dois tipos de sensores de corrosão à fibra de perfil D também são propostos e implementados no COMSOL. Os resultados da modelagem computacional mostram que, com uma arquitetura simples, é possível construir um sensor de corrosão com duas faixas de detecção e, com uma arquitetura complexa, é possível construir um sensor de corrosão com cinco faixas de detecção, em que ambos permitem medir a taxa de corrosão. O desempenho desses sensores é comparado ao de outros sensores da literatura e apresentam vantagens, devido suas amplas faixas de detecção para a corrosão.

Palavras-chave: Fibra óptica de perfil D. Sensores. Polimento. Modelagem. Índice de refração. Corrosão.

ABSTRACT

This Thesis presents a manufacturing process of D-shape in optical fibers and its applications in sensing. The polishing technique employed resulted in the manufacture of D-shaped optical fibers with different surface roughness rms values, which are the values of mean square height that characterize the rough surface. These fibers were used in a refractive index sensor. The results obtained with this sensor, using a D-shaped optical fiber with a low rms value of roughness, present a behavior similar to that observed for a D-shaped optical fiber of commercial use. The results obtained for the rough D-shaped optical fiber sensor indicate that the surface roughness contributed positively to the response of the refractive index sensor, showing that with a simple structure, it is possible to obtain a sensor having figures of merit similar to those shown by sensor elements with more complex structures, described in the literature. The surface roughness of the D-shaped fibers was characterized by optical microscopy images, which allowed obtaining their topological representations and their rms values. A computational model that approach roughness by a fractal of order three was implemented in COMSOL Multiphysics to complement the analysis of experimental results. Two types of corrosion sensors based on D-shaped optical fiber are also proposed and implemented in COMSOL. The results of the computational modeling show that, with a simple architecture, it is possible to build a corrosion sensor with two detection ranges and, with a complex architecture, it is possible to build a corrosion sensor with five detection ranges, in which both allow to measure the corrosion rate. The performance of these sensors is compared to that of other sensors in the literature and have advantages, due to their wide detection ranges for corrosion.

Keywords: D-shaped optical fiber. Sensors. Polishing. Modeling. Refractive index. Corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	(a) Seção longitudinal de uma fibra óptica com perfil D; (b) Seção transversal do perfil D.....	30
Figura 2 –	Esquema da luz guiada por reflexão interna total, modos de propagação e onda evanescente numa (a) fibra óptica monomodo; (b) fibra óptica com perfil D	32
Figura 3 –	Estrutura genérica de elemento sensor baseado no efeito de RPS em fibra óptica com perfil D metalizado. (b) Curva genérica do espectro refletido de um sensor à base de RPS	35
Figura 4 –	Elemento sensor com perfil D metalizado em cascata	36
Figura 5 –	Grade metálica sobre o perfil D de uma SMF	37
Figura 6 –	PWG acoplado no perfil D de uma SMF	39
Figura 7 –	Perfil D em uma FBG para construção do elemento sensor	40
Figura 8 –	MZI à base de fibra óptica com perfil D e grade de Bragg	40
Figura 9 –	Elemento sensor com grade de Bragg construída sobre o perfil D	41
Figura 10 –	Perfil D em uma PCF para construção do elemento sensor	42
Figura 11 –	(a) Elemento sensor baseado em fibra óptica com perfil D encapsulado. (b) Sistema de monitoramento de campo magnético	43
Figura 12 –	Configuração experimental para deposição do óxido de grafeno no perfil D de uma SMF. (b) Imagem de microscopia do óxido de grafeno depositado sobre o perfil D da SMF	44
Figura 13 –	(a) Representação esquemática da estrutura do sensor de corrosão à base de FBG. (b) Sistema de detecção da corrosão ...	50
Figura 14 –	Esquema de funcionamento do sensor de corrosão proposto por Benett e McLaughlin	53
Figura 15 –	(a) Filme de Fe-C depositado na superfície lateral do núcleo da fibra óptica; (b) aparato experimental para monitoramento da corrosão	54
Figura 16 –	Diagrama esquemático do sensor multiponto de corrosão	54
Figura 17 –	(a) Traço do OTDR correspondente à intensidade da luz	

	refletida como uma função da distância do longo da fibra. Os números das cabeças sensoras são mostrados. (b) Intensidade relativa como função do tempo de corrosão	55
Figura 18 –	Sistema amplificado para monitoramento multiponto da corrosão	56
Figura 19 –	(a) Estrutura SMS do elemento sensor. (b) Sistema de monitoramento da corrosão	57
Figura 20 –	(a) Esquema do polarizador à fibra óptica. (b) Sistema de detecção da corrosão	58
Figura 21 –	(a) Preparação de fibra óptica em substrato com <i>v-groove</i> para fabricação do perfil D. (b) Seção transversal da fibra óptica inserida no <i>v-groove</i> . (c) Arranjo experimental	61
Figura 22 –	(a) Preparação de fibra óptica em substrato com <i>circular-groove</i> para fabricação de perfil D com comprimento reduzido. (b) Seção transversal do perfil D no <i>circular-groove</i>	62
Figura 23 –	Configuração experimental para produção de perfil D em fibras ópticas (a) obtida em Ref. [38]; (b) obtida em Ref. [42]	64
Figura 24 –	Configuração experimental para produção de perfil D em fibras ópticas por corrosão com HF	66
Figura 25 –	Configuração experimental pra produção de perfil D em fibra óptica usando laser de alta potência	68
Figura 26 –	Estimativa dos métodos de obtenção de fibras ópticas com perfil D observados nas aplicações obtidas na literatura	69
Figura 27 –	(a) Arranjo para fixar o trecho de fibra óptica a ser polido. (b) Esquema da seção transversal da fibra óptica fixada no substrato. (c) Esquema completo do arranjo experimental	75
Figura 28 –	Estrutura de polimento do aparato experimental	76
Figura 29 –	Potência relativa em função do tempo	78
Figura 30 –	Potência relativa em função do tempo para a (a) amostra D1; (b) amostra D2; (c) amostra D3	79
Figura 31 –	Potência relativa em função do tempo para a amostra D4	81
Figura 32 –	Imagem de microscopia óptica da seção polida da amostra D4 de fibra óptica com perfil D	82

Figura 33 –	Aparato experimental do sensor de índice de refração	85
Figura 34 –	Seção transversal da fibra óptica com perfil D modelada no COMSOL <i>Multiphysics</i>	87
Figura 35 –	Potência transmitida relativa em função do índice de refração do meio externo. Resultados experimentais (pontos) e computacionais (linha)	89
Figura 36 –	Distribuição de potência óptica na seção transversal do perfil D inserido no (a) óleo isolante (b) ar	91
Figura 37 –	Sensibilidade em função (a) do comprimento do perfil D (b) da espessura da casca residual	92
Figura 38 –	Curvas de nível para a sensibilidade em função do comprimento do perfil D e da espessura da casca residual	92
Figura 39 –	Esquema para uma rugosidade definida por vales e picos e os parâmetros estatísticos calculados pelo Gwyddion	94
Figura 40 –	Morfologia da rugosidade de superfície modelada pela função $R(s)$	96
Figura 41 –	Geometria 2D do modelo computacional	97
Figura 42 –	Imagens de microscopia óptica da superfície polida das amostras (a) F1 (b) F2 (c) F3. Morfologia 3D da rugosidade de superfície na região central (indicada no retângulo tracejado) das amostras (d) F1 (e) F2 (f) F3	100
Figura 43 –	Topologia da superfície rugosa obtida através das imagens de microscopia óptica processadas no Gwyddion (curva vermelha) e sua representação pela função rugosidade (curva preta), para as amostras (a) F1 (b) F2 (c) F3	101
Figura 44 –	Potência relativa transmitida como função do índice de refração do meio externo, obtida experimentalmente (pontos) e através da modelagem numérica (linhas)	103
Figura 45 –	Sensibilidade, em dB/UIR e Resolução, em UIR (Unidades de Índice de Refração), como função do índice de refração do meio externo, obtida a partir do modelo numérico para os três perfis de rugosidade de superfície	107
Figura 46 –	Densidade de potência óptica para as amostras (a) F1 (b) F2 (c)	

	F3	108
Figura 47 –	Esquema simplificado do sensor tipo I	113
Figura 48 –	Esquema do sistema de monitoramento da corrosão	114
Figura 49 –	Geometria 2D do modelo computacional para o sensor tipo I	115
Figura 50 –	Geometria 3D do modelo computacional para o sensor tipo I	120
Figura 51 –	Discretização do modelo 3D para o elemento sensor tipo I	121
Figura 52 –	Esquema do elemento sensor tipo I para auxiliar o modelo analítico	122
Figura 53 –	Reflectância em função da espessura total dos transdutores do sensor tipo I	126
Figura 54 –	Influência do comprimento do perfil D metalizado na resposta do sensor tipo I	128
Figura 55 –	Influência da espessura da casca residual na resposta do sensor tipo I	129
Figura 56 –	Curvas de nível para a variação total da reflectância ΔR em função do comprimento do perfil D metalizado e da espessura da casca residual	130
Figura 57 –	Distribuição de potência óptica (a) para o modelo 3D; (b) para o modelo 2D	131
Figura 58 –	Esquema simplificado do sensor tipo II	132
Figura 59 –	Geometria 2D para o modelo computacional do sensor de corrosão tipo II	133
Figura 60 –	Reflectância em função da espessura para o sensor tipo I (pontos em preto) e tipo II (pontos em vermelho)	136
Figura 61 –	Reflectância em função da espessura para o sensor tipo II com diferentes transdutores metálicos	138
Figura 62 –	Reflectância em função da espessura para o sensor tipo II para estruturas de escada com três (curva preta), quatro (curva azul) e cinco (curva vermelha) degraus	140
Figura 63 –	Reflectância em função da espessura para o sensor tipo II para estruturas de escada com degraus de diferentes alturas	141
Figura 64 –	Reflectância em função da espessura para o sensor tipo II para estruturas de escada com degraus com 1 mm de comprimento	

	(curva preta) e 2 mm de comprimento (curva vermelha)	142
Figura 65 –	Curvas de reflectância em função da espessura obtidas através de sinais ópticos com polarização P (curva preta), polarização S (curva vermelha) e não-polarizado (curva azul)	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Parâmetros qualitativos dos elementos sensores	46
Tabela 2 –	Classificação dos elementos sensores quanto às aplicações	47
Tabela 3 –	Caracterização dos sensores de índice de refração	48
Tabela 4 –	Parâmetros qualitativos dos sensores de corrosão	59
Tabela 5 –	Parâmetros qualitativos para comparação dos métodos de fabricação de perfil D em fibra óptica	71
Tabela 6 –	Parâmetros quantitativos para comparação dos métodos de fabricação de perfil D em fibra óptica	72
Tabela 7 –	Perda de transmissão para as amostras F1 à F10	82
Tabela 8 –	Sensibilidade dos sensores construídos e modelados	90
Tabela 9 –	Parâmetros que caracterizam a superfície rugosa das amostras de fibra óptica com perfil D	102
Tabela 10 –	Parâmetros da função rugosidade	105
Tabela 11 –	Parâmetros que caracterizam a rugosidade de superfície modelada no COMSOL	106
Tabela 12 –	Figuras de mérito dos sensores de índice de refração à fibra óptica com perfil D	111
Tabela 13 –	Parâmetros usados na modelagem computacional	118
Tabela 14 –	Faixa de operação do sensor de corrosão tipo I	127
Tabela 15 –	Coeficiente de absorção, comprimento de penetração e variação da reflectância para diferentes transdutores metálicos do sensor tipo II	139
Tabela 16 –	Performance dos sensores de corrosão à fibra óptica	145

LISTA DE SIGLAS

AFM	Atomic Force Microscopy
BBS	BroadBand Source
DAQ	Data Acquisition System
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EWBE	Eletromagnetic Waves Beam Envelopes
EWFD	Electromagnetic Waves Frequency Domain
FBG	Fiber Bragg Grating
IR	Índice de Refração
ITO	Indium Tin Oxide
LED	Light Emitter Diode
LMR	Lossy Mode Resonance
LPFG	Long Period Fiber Grating
LPG	Long Period Grating
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MMF	Multi-Mode Fiber
MO	Microscopia Óptica
MP	Medidor de Potência
MPE	Mapeamento Paramétrico Estatísticos
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
OFDR	Optical Frequency-Domain Reflectometry
OSA	Optical Spectrum Analyzer
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometry
PCF	Photonic Cristal Fiber
PCI	Placa de Circuito Impresso
PMCS	Programmable Motion Control System
POF	Plastic Optical Fiber
PS	Plásmon de Superfície
PWG	Planar Waveguide
RMS	Root-Mean-Square
RPS	Ressonância de Plásmon de Superfície

SMF	Single-Mode Fiber
SMS	Single Mode-multimode-Single mode
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic
UA	Unidade de Absorbância
UIR	Unidade de Índice de Refração
UR	Umidade Relativa
UV	UltraVioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Frequência normalizada dos modos de propagação
π	Número Pi
r_{eff}	Raio efetivo da fibra óptica com perfil D
λ	Comprimento de onda
n_{core}	Índice de refração do núcleo da fibra óptica
n_{clad}	Índice de refração da casca da fibra óptica
d_p	Profundidade de penetração da onda evanescente na casca da fibra óptica
θ_{in}	Ângulo de incidência na interface núcle/casca
$k_{ }$	Componente do vetor de onda paralela à interface perfil D/filme metálico
k_{PS}	Número de onda do plásmom de superfície
k_0	Número de onda no vácuo
ϵ_m	Permissividade elétrica relativa do metal
ϵ_d	Permissividade elétrica relativa do meio dielétrico
θ	Ângulo de incidência
ϵ'	Parte real da permissividade elétrica relativa do metal
ϵ''	Parte imaginária da permissividade elétrica relativa do metal
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
n_{eff}	Índice de refração efetivo
Λ_{FBG}	Periodicidade da grade de Bragg
λ_i	Comprimento de onda dos modos de casca da LPFG
Λ_{LPG}	Periodicidade da grade de período longo
D_{core}	Diâmetro do núcleo da fibra óptica
D_{clad}	Diâmetro da casca da fibra óptica
w_D	Largura da região plana do perfil D
d	Espessura da casca residual medida experimentalmente
S	Sensibilidade
ΔP_{op}	Variação na potência óptica
Δn_{ext}	Variação no índice de refração do meio externo
n_{ext}	Índice de refração do meio externo

T	Transmitância
L_D	Comprimento da região plana do perfil D
(x,y,z)	Coordenadas cartesianas
R_q	Rugosidade RMS
λ_q	Periodicidade RMS da rugosidade
N	Amostragem do número de picos
$R(s)$	Função rugosidade
A_i	Amplitude de i -ésima ordem da função rugosidade
Λ_i	Periodicidade de i -ésima ordem da função rugosidade
B	Espessura da casca residual definida na modelagem computacional
η	Fator de escada da função rugosidade
s	Parâmetro de varredura da função rugosidade
S_{2l}	Parâmetro de espalhamento (coeficiente de transmissão)
$\mathbf{E}_e$	Vetor campo elétrico do sinal óptico emitido
$\mathbf{E}_t$	Vetor campo elétrico do sinal óptico transmitido
L_{ext}	Espessura da camada que representa o meio externo
D_{ext}	Largura da camada que representa o meio externo
$\mathbf{E}$	Vetor campo elétrico medido pela porta numérica
$\mathbf{E}_0$	Vetor campo elétrico emitido pela porta numérica
S_{1l}	Parâmetro de espalhamento (coeficiente de reflexão)
n_{Ni}	Índice de refração do níquel
n_{Al}	Índice de refração do alumínio
n_{Zn}	Índice de refração do zinco
n_{Fe-C}	Índice de refração do aço-carbono
E_0^x	Componente x do campo elétrico
E_0^y	Componente y do campo elétrico
E_0^z	Componente z do campo elétrico
$\tilde{\mathbf{E}}_0$	Matriz coluna para o vetor campo elétrico definido no modelo 3D
$\mathbf{E}_1$	Vetor campo elétrico para a equação de onda do submódulo EWBE
ϕ_l	Função de fase
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
ε_0	Permissividade elétrica do vácuo
ε_r	Permissividade elétrica relativa

w	Frequência angular da onda eletromagnética
σ	Condutividade elétrica
$\mathbf{k}$	Vetor de onda
t_1	Espessura do transdutor metálico sobre o perfil D (Sensor Tipo I)
t_2	Espessura do transdutor metálico na face clivada da fibra óptica (Sensor Tipo I)
r	Coordenada cilíndrica
w_0	Raio modal do feixe gaussiano
t_m	Espessura do filme metálico
ϵ_{core}	Permissividade elétrica relativa do núcleo da fibra óptica
ϵ_{clad}	Permissividade elétrica relativa da casca da fibra óptica
ϵ_{ext}	Permissividade elétrica relativa do meio externo
I_{R1}	Intensidade do feixe refletido no sistema multicamadas do perfil D metalizado
R_1	Reflectância do sistema multicamadas que representa o perfil D metalizado
I_0	Intensidade do feixe incidente
I_{R2}	Intensidade do feixe refletido do sistema multicamadas da face clivada metalizada
R_2	Reflectância do sistema multicamadas que representa a face clivada metalizada
ρ	Número de reflexões atenuadas
I_f	Intensidade final do feixe refletido nos sistemas de multicamadas em cascata
R_f	Reflectância para os sistemas de multicamadas em cascata
r_{1234}	Coefficiente de reflexão do sistema de multicamadas do perfil D
r_{ij}	Coefficiente de reflexão nas interfaces simples i/j
k_{zi}	Componente do vetor de onda na i -ésima camada paralela à interface
r_{123}	Coefficiente de reflexão do sistema de multicamada da face clivada metalizada
ΔR	Variação na reflectância
L_S	Comprimento dos degraus
h_i	Altura do i -ésimo degrau

n	Número de degraus
R_{pol}	Reflectância para um sinal óptico polarizado
R_P	Reflectância para o sinal óptico com polarização P
R_S	Reflectância para o sinal óptico com polarização S
ε_{Fe-C}	Permissividade elétrica relativa da liga de Fe-C
f	Fração de carbono na liga de Fe-C
ε_{Fe}	Permissividade elétrica relativa do ferro
ε_C	Permissividade elétrica relativa do carbono
ΔW_{total}^{II}	Variação de espessura detectável pelo sensor de corrosão tipo II
ΔW_{total}^I	Variação de espessura detectável pelo sensor de corrosão tipo I
α	Coefficiente de absorção
α_{Fe-C}	Coefficiente de absorção da luz no aço-carbono
α_{Ni}	Coefficiente de absorção da luz no níquel
α_{Al}	Coefficiente de absorção da luz no alumínio
α_{Zn}	Coefficiente de absorção da luz no zinco
λ_p	Comprimento de penetração da luz no metal
ΔR_{escada}	Variação da reflectância devido à corrosão do filme fino estruturado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	MOTIVAÇÃO	24
1.2	ORGANIZAÇÃO DA TESE DE DOUTORADO	27
2	SENSORES DE ONDA EVANESCENTE E DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1	SENSORES DE ONDA EVANESCENTE À BASE DE FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D	29
2.1.1	Estrutura dos Elementos Sensores	32
2.1.1.1	Perfil D Exposto	
2.1.1.2	Perfil D com Filmes Metálicos	
2.1.1.3	Perfil D com Materiais Não-metálicos	
2.1.1.4	Perfil D Acoplado com Guia de Onda Planar	
2.1.1.5	Perfil D com Estruturas de Grade	
2.1.1.6	Perfil D com Fibra de Cristal Fotônico	
2.1.1.7	Perfil D Encapsulado	
2.1.1.8	Perfil D com Grafeno	
2.1.2	Classificação dos Sensores à Fibra Óptica com Perfil D	45
2.2	SENSORES DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA.....	49
2.2.1	Sensoriamento à Base de FBGs e LPFGs	49
2.2.2	Sensoriamento com Alternativas às Estruturas de Grades	52
2.2.3	Análise Qualitativa dos Sensores de Corrosão	58
3	MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D	60
3.1	FABRICAÇÃO DE PERFIL D EM FIBRA ÓPTICA ATRAVÉS DE POLIMENTO	60
3.2	FABRICAÇÃO DE PERFIL D EM FIBRA ÓPTICA POR CORROSÃO	65
3.3	FABRICAÇÃO DE PERFIL D EM FIBRA ÓPTICA POR ABLAÇÃO	
	COM LASER DE ALTA POTÊNCIA	67
3.4	ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DOS MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DO PERFIL D	68
3.5	MÉTODO PROPOSTO	75
3.6	RESULTADOS	77

4	SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO À FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D	84
4.1	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	84
4.2	MODELO COMPUTACIONAL SEM RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE	86
4.3	RESULTADOS PARA O SENSOR À FIBRA DE PERFIL D	88
4.3.1	Explorações da Modelagem Computacional	90
4.4	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE NA SENSIBILIDADE DO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO	93
4.4.1	Caracterização da Rugosidade de Superfície no Gwyddion	93
4.4.2	Abordagem para a Rugosidade de Superfície por Fractais	95
4.4.3	Modelo computacional com Rugosidade de Superfície	96
4.5	RESULTADOS PARA O SENSOR À FIBRA DE PERFIL D COM RUGOSIDADE	98
4.5.1	Morfologia da Rugosidade de Superfície	98
4.5.2	Desempenho do Sensor de Índice de Refração	102
5	MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SENSOR DE CORROSÃO BASEADO EM FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D	112
5.1	SENSOR TIPO I – FILME FINO LAMINAR	112
5.1.1	Modelo Numérico 2D	114
5.1.2	Modelo Numérico 3D	118
5.1.3	Modelo Analítico	122
5.2	RESULTADOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SENSOR DE CORROSÃO TIPO I	124
5.2.1	Explorações Adicionais	127
5.3	SENSOR TIPO II – FILME FINO ESTRUTURADO	131
5.3.1	Modelagem Computacional para o Sensor Aprimorado	132
5.4	RESULTADOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SENSOR DE CORROSÃO APRIMORADO	135
5.4.1	Performance do Sensor Aprimorado para Diferentes Metais	137
5.4.2	Influência dos Parâmetros Geométricos da Estrutura em Escada	139
5.4.3	Influência da Polarização na Resposta do Sensor de Corrosão Aprimorado	143
6	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS	146

6.1	CONTRIBUIÇÕES DA TESE DE DOUTORADO	147
6.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	149
	REFERÊNCIAS	151
	APÊNDICE A – LISTA DE PUBLICAÇÕES	165
	APÊNDICE B – DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE	
	CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS	168
	APÊNDICE C – DEDUÇÃO DA EXPRESSÃO PARA A ESPESSURA	
	DA CASCA RESIDUAL	170

1 INTRODUÇÃO

Na década de 60, duas grandes invenções revolucionaram as telecomunicações: em 1960, a do *laser* e em 1966, a das fibras ópticas [1]. Uma década após essas invenções, em 1970, os primeiros experimentos com *lasers* e fibras ópticas de baixa perda já eram realizados em laboratórios de telecomunicações [1]. Os avanços nas pesquisas em *lasers* e fibras ópticas [1] impulsionaram a idealização e desenvolvimento de sensores à fibra óptica para diversas aplicações. Muitas publicações da época contemplaram os desafios e potencialidades dos dispositivos sensores à base de fibra óptica [2], onde eram destacadas as possíveis formas de monitoramento por fibra óptica de grandezas como temperatura e pressão, aceleração e vibração, nível de poluição, escoamento, nível de líquidos e campo magnético [2]. Além disso, as aplicações de sensores à fibra óptica nas pesquisas em medicina também eram vislumbradas [2].

Atualmente, os sensores à fibra óptica são obtidos nas mais diversas configurações, fazendo uso dos mais diversos tipos de fibras ópticas: monomodo, multimodo, fibra de grade de Bragg, fibra de perfil D, fibra de cristal fotônico, fibra polimérica, entre outras [3–7]. São sensores capazes de detectar os mais diferentes tipos de grandezas e fenômenos: temperatura [8, 9], corrosão [10, 11], concentração de gases [12], índice de refração [13], campo magnético [14], entre outros. Nos sensores à fibra óptica, diferentes efeitos ópticos podem proporcionar a detecção da grandeza ou fenômeno de interesse, tais como: espalhamento, interferometria, ressonância de plásmon de superfície [15] e localizados [16], ressonância de modo dissipativo [17], perda por absorção, polarização, reflexão e refração, entre outros [3]. Esses efeitos podem alterar a amplitude, fase e estado de polarização da onda eletromagnética guiada na fibra óptica [3]. Além disso, podem gerar novas frequências, de segunda e terceira ordem, para a onda eletromagnética, que é o caso dos espalhamentos Brillouin [18] e Raman [19], respectivamente.

Os sensores à fibra óptica são classificados quanto à interação da luz com o meio sob monitoramento, que pode ocorrer no interior ou exterior da fibra óptica. Quando a detec-

ção ocorre na parte externa da fibra óptica, ou seja, a luz é guiada para fora da fibra óptica e interage com o meio sob análise, o sensor é classificado como extrínseco [3]. Para esse tipo de sensor, a fibra óptica é usada apenas como meio de transporte, guiando o sinal óptico até o ponto de interação com o meio externo e o transportando de volta para um detector [3]. Os sensores baseados em efeitos de reflexão e refração, perdas por absorção e ressonância de plásmom de superfície e localizados, são exemplos de sensores extrínsecos. Quando a detecção da grandeza ou fenômeno ocorre no interior da fibra óptica, o sensor é classificado como intrínseco [3]. Nesse tipo de sensor, a detecção é feita pela variação das propriedades ópticas da fibra óptica ou da radiação guiada [3]. Os sensores baseados em efeitos de espalhamento e grade de Bragg são exemplos de sensores intrínsecos.

Os sensores à fibra óptica também podem ser classificados no que se refere aos pontos de monitoramento. Quando o monitoramento ocorre ao longo de toda a extensão da fibra óptica, ou em um trecho, na forma de um continuum, o sensor é classificado como distribuído [20–22]. Por exemplo, o sensor de temperatura baseado em espalhamento Raman, obtido em [8], é classificado como distribuído, pois permite a detecção de aquecimento ou resfriamento em todos os pontos ao longo de um trecho de fibra óptica que tem dezenas de metros de comprimento. Se os pontos de monitoramento são regiões discretas ao longo da extensão da fibra óptica, esses sensores são classificados como quase-distribuídos ou multiponto [20–22]. Por exemplo, o sensor de corrosão baseado em reflectometria óptica no domínio do tempo, obtido em [10], é classificado como multiponto, pois possui ramificações ao longo do enlace principal para conexão de fibras com face clivada metalizada (cabeças sensoras) que permitem detectar a corrosão em alguns pontos discretos. Já, se o monitoramento ocorrer em um único ponto, ao longo de todo o enlace de fibra óptica, esses sensores são classificados como monoponto [20–22].

1.1 MOTIVAÇÃO

Sensores à base de fibra óptica vêm ganhando destaque em relação a outros tipos de sensores ópticos ou não-ópticos. Isso porque as técnicas de monitoramento de grandezas por fibra óptica oferecem várias vantagens como simplicidade, versatilidade, segurança, baixo peso e confiabilidade [3]. Além disso, podem transportar sinais de luz por longas distâncias sem perda apreciável de potência e imunes de interferência eletromagnética externa [3]. O sensoriamento à base de fibra óptica também tem possíveis aplicações na indústria de energia

elétrica, com a tecnologia *smart grids* (redes elétricas inteligentes), e na indústria de petróleo e gás, no que se refere à extração de petróleo e gás via dutos metálicos em águas profundas [23].

Nos últimos anos, observou-se o crescimento do número de sensores à fibra óptica baseados na interação da onda evanescente com o meio sensoriado [24]. Esses sensores, denominados de sensores de onda evanescente, possibilitam a ocorrência de diversos fenômenos ópticos, devido à interação da onda evanescente com o meio externo e com elementos transdutores, que permitem detectar de forma seletiva e com alta sensibilidade as mais diversas grandezas [25]. Para os sensores de onda evanescente, as estruturas de seus elementos são construídas com o objetivo de promover a interação dessa onda com o meio externo à fibra óptica, de modo que são classificados como sensores extrínsecos [3]. Isso pode ser realizado de diferentes formas, sendo comum obter esses elementos sensores a partir da remoção da casca lateral da fibra óptica, ao longo de um dado trecho; com a redução da espessura do núcleo e da casca da fibra óptica, pela construção de um *taper* [26]; gravação de grade de período longo no núcleo da fibra óptica, que espalha parte da luz guiada para os modos de casca [27]; com a remoção da casca da fibra óptica em apenas um lado, criando uma região plana, denominada de perfil D; realizando microcurvaturas na fibra óptica [28], permitindo que parte da luz guiada no núcleo desacople para a casca e, conseqüentemente, interaja com o meio externo [24].

Especificamente para os sensores de onda evanescente à fibra óptica de perfil D, tem-se a possibilidade de construir diversas estruturas de elementos sensores, como destacado em [29]. Devido à possibilidade de efeitos interferométricos e de acoplamento e ressonância, que são muito sensíveis às propriedades ópticas e geométricas da região de interação da luz com o meio sob análise, esse tipo de elemento sensor tende a apresentar melhor performance quando comparado com outros perfis de elementos sensores [29]. Além disso, esses elementos sensores são construídos ao longo da região lateral da fibra óptica, de modo que podem ser empregadas técnicas de monitoramento baseadas em análise do sinal óptico transmitido ou refletido. Isso é uma vantagem em relação a outros perfis de elementos sensores, que permitem a detecção apenas pelo sinal óptico refletido, como é o caso dos elementos sensores que exploram uma das extremidades da fibra óptica. Devido ao uso abrangente das fibras ópticas com perfil D para a construção dos mais diversos tipos de sensores, principalmente para aplicações bioquímicas, e o alto valor comercial desse tipo especial de fibra

óptica, são propostos métodos próprios para fabricação de perfil D em fibras ópticas. Portanto, o domínio de uma técnica de fabricação de perfil D em fibra óptica é importante, tanto do ponto de vista da redução dos custos de fabricação, quanto do aprimoramento do perfil de elemento transdutor que melhor se adeque às condições de sensoriamento exigidas pela grandeza ou fenômeno que se deseja monitorar.

Neste sentido, esta Tese de Doutorado contribui com os seguintes aspectos em relação ao *design*, à fabricação e à aplicação dos sensores de onda evanescente à fibra óptica com perfil D.

- I. Método de fabricação de perfil D em fibras ópticas usando técnicas de polimento, com fibra óptica fixada em substrato de acrílico sem *v-groove*, que permite reduzir os custos e a complexidade da construção do perfil D. Adicionalmente, a fabricação de perfil D em fibras ópticas pode implicar na construção de outros dispositivos ópticos, como atenuadores, moduladores [30] e polarizadores [31].
- II. Construção de um sensor de índice de refração à base de fibra óptica com perfil D e sua modelagem computacional no COMSOL *Multiphysics*. Comparativo do desempenho, para detecção de índice de refração, da fibra de perfil D produzida em laboratório com uma fibra de perfil D obtida comercialmente.
- III. Aprimoramento da sensibilidade e resolução do sensor de índice de refração, a partir de um estudo da influência da rugosidade de superfície que é gerada na fabricação do perfil D para diferentes discos abrasivos.
- IV. *Design* e otimização, a partir de uma modelagem computacional no COMSOL *Multiphysics*, de dois perfis de elementos sensores à fibra óptica com perfil D para detecção da corrosão: sensor tipo I, que exibe duas faixas de detecção da corrosão; sensor tipo II, que é um sensor aprimorado, que exibe cinco faixas de detecção da corrosão. O desempenho desses sensores é comparado ao de outros sensores obtidos na literatura, com destaque para a ampla faixa de detecção da corrosão observada.
- V. Ampla revisão da literatura, que apresenta diversas arquiteturas de elementos sensores que podem ser obtidos usando como base uma fibra óptica com perfil D.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE DE DOUTORADO

Esta Tese de Doutorado está organizada em seis capítulos, em que o Capítulo 1 é esta introdução. O Capítulo 2 apresenta duas revisões da literatura sobre sensores à fibra óptica. A primeira revisão trata dos sensores de onda evanescente à fibra óptica de perfil D, em que são destacadas as estruturas dos elementos sensores e suas aplicações na detecção de diversas grandezas e fenômenos. Especificamente para o sensoriamento de índice de refração, é apresentada uma classificação a partir dos parâmetros quantitativos que caracterizam os sensores analisados, incluindo faixa de operação, sensibilidade e resolução. A segunda revisão aborda os sensores à fibra óptica para detecção da corrosão, em que são mostradas diferentes arquiteturas de elementos sensores, incluindo as que são à base de fibra óptica com perfil D. Além disso, é apresentada uma classificação quanto às características qualitativas desses sensores, tais como a capacidade de fornecer a taxa de corrosão.

O Capítulo 3 apresenta uma abordagem para os métodos de fabricação de perfil D em fibra óptica que são obtidos na literatura. Nesse capítulo, são obtidas análises qualitativas e quantitativas quanto à natureza da implementação de cada método e os produtos gerados, ou seja, as fibras ópticas com perfil D. Adicionalmente, é apresentado o método de fabricação de perfil D em fibra óptica a partir de técnicas de polimento, proposto nesta Tese de Doutorado, que está de acordo com a tendência da literatura de explorar tal técnica. São apresentados aspectos da instrumentação, que inclui um sistema automatizado de controle e aquisição de dados ao longo do processo de polimento, e detalhes das amostras de fibra óptica com perfil D que foram construídas.

O Capítulo 4 apresenta um sensor de índice de refração baseado em fibra óptica de perfil D, que representa uma das aplicações em sensoriamento, proposta nesta Tese de Doutorado, para esse tipo especial de fibra óptica. Nesse capítulo, são apresentados aspectos da modelagem computacional e da construção do sensor de índice de refração. Dois modelos computacionais são implementados: 1) para o perfil D com superfície plana e lisa; 2) considerando a presença da rugosidade na superfície do perfil D. Além disso, é investigada a influência da rugosidade de superfície na sensibilidade do sensor de índice de refração, através de amostras de fibra óptica de perfil D fabricadas com quatro níveis distintos de rugosidade *rms*. O desempenho do sensor de índice de refração proposto é comparado ao de outros sensores da literatura, através da análise de suas figuras de mérito.

O Capítulo 5 apresenta a modelagem computacional de dois tipos de sensores de

corrosão à base de fibra óptica com perfil D. O primeiro é definido com base numa estrutura simples para o elemento sensor, que é composto por uma fibra óptica com perfil D metalizado por um filme fino laminar. O segundo é um sensor aprimorado, em que o elemento sensor é baseado numa fibra óptica de perfil D metalizado com um filme fino estruturado. Ambos esses sensores apresentam ampla faixa de operação, em comparação com os sensores obtidos na literatura.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta reflexões sobre as contribuições desta Tese de Doutorado. Também são apresentadas perspectivas para trabalhos futuros, destacando a fabricação dos sensores de corrosão propostos e modelados nesta Tese de Doutorado. Além disso, explorações para o uso do sensor de índice de refração em aplicações específicas como, por exemplo, detecção de óleo em água.

2 SENSORES DE ONDA EVANESCENTE E DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca de sensores à fibra óptica. A Seção 2.1 é dedicada aos sensores baseados em fibra óptica com perfil D, onde são apresentados diversos perfis de elementos sensores, construídos a partir desse tipo especial de fibra óptica. Além disso, é apresentada uma classificação para esses sensores, com base em suas aplicações para a detecção de diversos tipos de grandezas e fenômenos. A Seção 2.2 é dedicada aos sensores à fibra óptica para monitoramento da corrosão que são propostos na literatura, onde são destacados os perfis dos elementos sensores e os sistemas de detecção da corrosão.

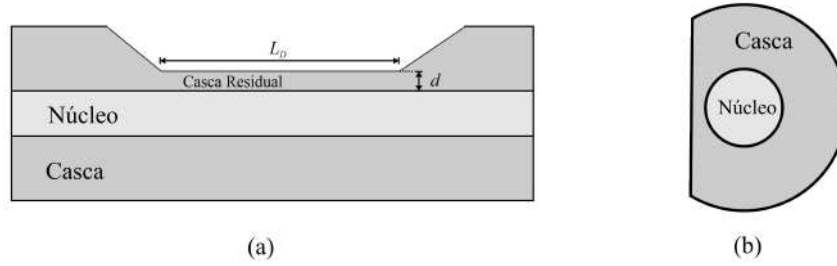
2.1 SENSORES DE ONDA EVANESCENTE À BASE DE FIBRA ÓPTICA DE PERFIL D

Dentre diversos tipos de sensores à fibra óptica [3, 32], estão os que fazem uso da onda evanescente, que se propaga na interface entre o núcleo e a casca da fibra óptica. Esses sensores geralmente têm seus elementos transdutores criados com a remoção total ou parcial da casca da fibra óptica num determinado trecho de sua extensão. Como consequência, nessa região, parte da onda evanescente pode escapar para o meio externo [24]. O sensoramento, desse tipo de sensor, é realizado pela medição da variação do nível da potência óptica refletida ou transmitida, devido à interação da onda evanescente com o meio externo [24]. Portanto, esse tipo de sensor funciona com base na variação do índice de refração efetivo da região que constitui a interface do núcleo ou de parte da casca com o meio externo [24].

Boa parte dos sensores que fazem uso da onda evanescente [29] são baseados num tipo especial de fibra óptica, denominada de fibra óptica com perfil D, que possui uma região plana próximo ao núcleo, devido à remoção total ou parcial de sua casca em um dado trecho. A Figura 1 ilustra um esquema simplificado de uma fibra óptica com perfil D. Na Figura 1(a), tem-se a representação da seção longitudinal, onde estão destacados o comprimento L_D

da região plana e a espessura d da casca residual que separa o núcleo do meio externo. Esses parâmetros geométricos são importantes para a caracterização desse tipo de fibra óptica. Já a Figura 1(b) representa a seção transversal, onde fica evidente a denominação "perfil D". Nesse tipo de fibra óptica, a onda evanescente interage com o meio externo através do perfil D [24].

Figura 1: (a) Seção longitudinal de uma fibra óptica com perfil D; (b) Seção transversal do perfil D.



Fonte: O Autor, 2020.

Do ponto de vista físico, a interação da onda evanescente com o meio externo pode ser compreendida através da análise dos modos de propagação. Diferentes modos de propagação através da fibra óptica têm diferentes campos evanescentes [33]. O campo evanescente aumenta conforme a ordem do modo aumenta. Logo, os modos de ordem superior têm uma distribuição de potência óptica maior na região evanescente [33]. A expressão do número V , que representa a frequência normalizada dos modos de propagação em uma fibra óptica com perfil D, é descrita na seguinte forma:

$$V = \frac{2\pi r_{eff}(d)}{\lambda} \sqrt{n_{core}^2 - n_{ext}^2} \quad (2.1)$$

em que λ é o comprimento de onda da luz guiada na fibra óptica e $r_{eff}(d)$ é o raio efetivo do perfil D, que depende da espessura d da casca residual que separa o núcleo do meio externo. Os parâmetros n_{core} e n_{ext} são os índices de refração do núcleo da fibra óptica e do meio externo, respectivamente. Como pode ser observado, a frequência normalizada V muda com o índice de refração do ambiente em torno da região do perfil D [33]. Como consequência, a razão da distribuição de potência óptica do núcleo para a região evanescente é alterada, permitindo que uma maior fração do sinal óptico guiado na fibra possa interagir com o meio externo, podendo causar alterações na intensidade do sinal óptico transmitido [33]. Isso pode possibilitar a detecção do índice de refração do meio externo analisando a mudança da intensidade potência óptica.

Os sensores de onda evanescente à fibra óptica também dependem da profundidade de penetração, na casca, da luz que é guiada no núcleo [34], dada por

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi(n_{core}^2 \sin^2 \theta_{in} - n_{clad}^2)^{1/2}}, \quad (2.2)$$

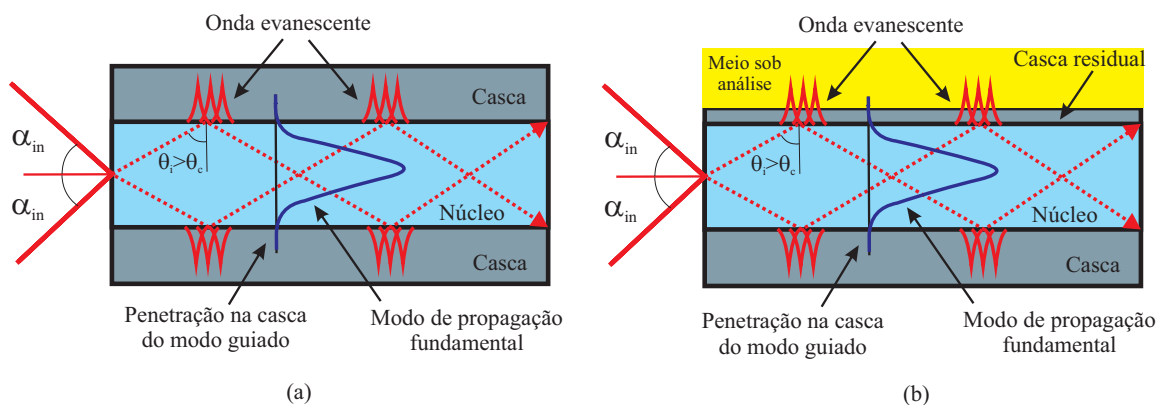
em que λ é o comprimento de onda, n_{core} e n_{clad} são os índices de refração do núcleo e da casca da fibra óptica, respectivamente, e θ_{in} é o ângulo de incidência da luz na interface núcleo/casca. Essa profundidade é definida pela distância a partir da interface núcleo/casca em que a intensidade da onda eletromagnética decai em $1/e$ [34]. Na expressão (2.2), a profundidade de penetração depende do índice da casca da fibra óptica, n_{clad} . No entanto, quando a casca é completamente ou parcialmente removida, promovendo a interação da onda evanescente com o meio externo, o parâmetro n_{clad} é substituído pelo índice de refração do meio externo, n_{ext} , (quando a casca é completamente removida) ou pelo índice de refração efetivo da região definida por casca residual e meio externo, n_{eff} , (quando a casca é parcialmente removida) [34].

Na Figura 2, é ilustrado um esquema de uma fibra óptica, com a luz guiada no núcleo pelo fenômeno de reflexão interna total, o modo de propagação fundamental e a onda evanescente, resultante da penetração da luz na casca da fibra óptica. Na Figura 2(a), tem-se um esquema da estrutura de uma fibra óptica monomodo, em que a onda evanescente não entra em contato com o meio externo, devido à espessura da casca ser maior que a profundidade de penetração, que é da ordem de apenas alguns micrômetros [34]. Já na Figura 2(b), que representa a seção longitudinal de uma fibra óptica com perfil D, observa-se a interação da onda evanescente com o meio externo (meio sob análise), uma vez que a espessura da casca residual é inferior a profundidade de penetração da luz. É importante destacar que além da espessura da casca residual, que pode existir ou não, ou seja, é possível obter fibra com perfil D sem casca residual, o comprimento do perfil D também tem influência na interação da onda evanescente. Isso porque quanto maior o comprimento do perfil D, maior a região de interação da onda evanescente com o meio sob análise.

Como já destacado na Seção 1.1 do Capítulo 1, existem outros mecanismos para promover a interação da onda evanescente com o meio externo, como a realização de microcurvaturas ou construindo um *taper* num trecho da fibra óptica, no entanto, a construção de um perfil D apresenta vantagens em relação aos demais tipos de elementos sensores de onda evanescente à fibra óptica. Isso porque a construção de uma região plana num dado trecho

de uma fibra óptica pode resultar na construção de diversos elementos sensores, que podem ter princípio de funcionamento baseado em fenômenos ópticos altamente sensíveis e seletivos, como, por exemplo, os efeitos de ressonância de plásmom de superfície e ressonância de modo dissipativo. Na Seção 2.1.1 é apresentada a diversidade de estruturas de elementos sensores que podem ser construídos usando como base uma fibra óptica com perfil D.

Figura 2: Esquema da luz guiada por reflexão interna total, modo de propagação fundamental e onda evanescente numa (a) fibra óptica monomodo; (b) fibra óptica com perfil D.



Fonte: O Autor, 2020.

2.1.1 Estrutura dos Elementos Sensores

Estruturas para sensoriamento usando fibra óptica com perfil D podem ser obtidas na literatura com diferentes configurações, como destacado por Yu Ying *et al.* [29]. Essas estruturas são desenvolvidas para aprimorar a interação da onda evanescente com os elementos transdutores, permitindo construir sensores seletivos às grandezas/fenômenos que se desejam detectar. A partir de uma análise das estruturas dos elementos sensores obtidos na literatura, foram criadas categorias que evidenciam a versatilidade dos elementos sensores que podem ser construídos usando como base uma fibra óptica com perfil D.

2.1.1.1 Perfil D Exposto

Uma estrutura simples para um elemento sensor usando fibra óptica com perfil D pode ser obtida explorando a interação direta da onda evanescente com o meio externo através do perfil D. Ou seja, o perfil D é mantido exposto ao meio sob análise. Explorando a perda de potência óptica para o meio externo, S. J. Beecher *et al.* [35] construíram um elemento sensor baseado em uma fibra óptica monomodo de perfil D com região plana com 6

mm de comprimento. Esse elemento sensor é imerso em óleo, que tem índice de refração próximo ao da fibra óptica e faz com que parte da luz guiada escape para o meio externo, causando perdas por inserção [35]. Configurações com elemento sensor imerso em óleo também são obtidas em [36, 37]. Estruturas para o perfil D em contato com outros líquidos são obtidas em [38–45].

É comum obter elementos sensores baseados no perfil D exposto em POFs (*Polymer Optical Fibers*), que são fibras óptica de plástico, que tem núcleo com 980 μm de diâmetro e casca com apenas 10 μm de espessura. No trabalho proposto por R. M. Ribeiro *et al.* [13], uma POF de perfil D com região plana de 20 mm de comprimento é colocada em contato com uma solução cujo índice de refração é alterado no intervalo de 1,32-1,48 UIR (Unidades de Índice de Refração). Esse elemento sensor funciona baseado na perda de potência óptica para o meio externo, devido ao aumento do índice de refração [13]. No sistema de detecção, o sinal óptico é emitido por um LED, com comprimento de onda de 660 nm e largura de banda de 40 nm, e detectado por um medidor de potência óptica. Para a faixa de índices de refração de 1,417-1,48 UIR, esse sensor apresenta sensibilidade de -36,3 dB/UIR com resolução de 10^{-3} UIR, devido o comportamento linear da medida da potência óptica transmitida. Estruturas semelhantes são obtidas na literatura [33], em que algumas estruturas exploram o uso de POF com perfil D em curvatura, para que uma maior fração da luz guiada no núcleo seja destinada para a região evanescente (perfil D), e interaja com o meio externo, aumentando a sensibilidade do sensor [46–51]. Por exemplo, em [52], uma POF com perfil D em curvatura fornece uma sensibilidade de -83 dB/UIR, para um sensor de índice de refração com faixa de detecção de 1,33-1,44 UIR.

2.1.1.2 Perfil D com Filmes Metálicos

Estruturas de elementos sensores à base de fibra óptica com perfil D têm seu desempenho aprimorado quando é feito o uso de filmes metálicos depositados sobre a região plana do perfil D. Nesse tipo de estrutura, pode ocorrer o efeito de Ressonância de Plásmom de Superfície (RPS) [15]. Em linhas gerais, o Plásmom de Superfície (PS) é uma onda eletromagnética resultante das oscilações longitudinais de elétrons livres na superfície do metal com interface em um meio dielétrico, confinada a se propagar na interface metal/dielétrico [53]. Quando incide sobre essa interface uma onda eletromagnética com campo elétrico definido no plano de incidência, que corresponde à polarização TM, paralela à interface me-

tal/dielétrico, é possível obter uma condição de ressonância, em que praticamente toda a energia da onda incidente é absorvida pelo Plásmom de Superfície (PS) [53]. Do ponto de vista teórico, é necessário que a componente paralela à interface do filme metálico, do vetor de onda da radiação incidente, $k_{||}$, seja igual à do vetor de onda do PS, k_{PS} . Essa condição é descrita, aproximadamente, por

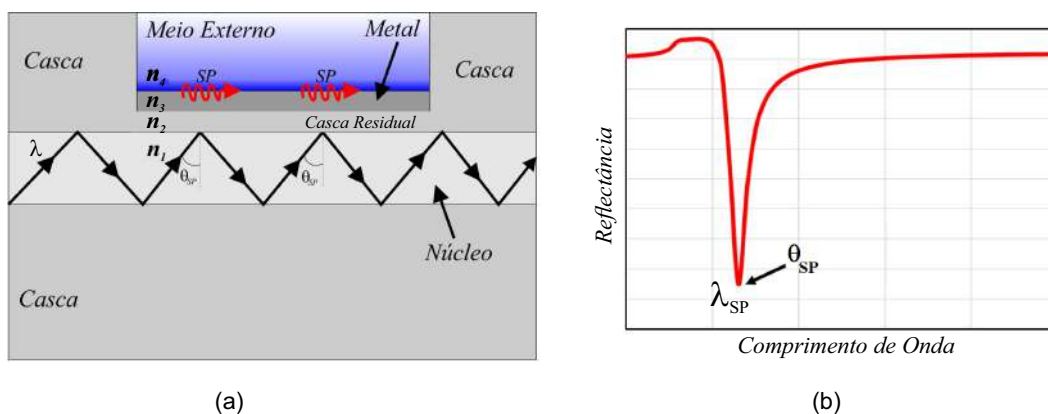
$$k_{||} = k_{PS} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}}, \quad (2.3)$$

em que k_0 é o número de onda no vácuo, ε_m e ε_d são as permissividades elétricas do metal e do meio dielétrico externo, respectivamente [53]. Na equação (2.3), fica explícita a influência do meio externo para a condição de RPS. De forma implícita, na equação (2.3), estão a dependência do ângulo de incidência na interface metal/dielétrico e do comprimento de onda. Especificamente para o uso do efeito de RPS em elementos sensores à fibra óptica, o controle do comprimento de onda é mais conveniente [54].

A Figura 3(a) ilustra uma estrutura genérica de um elemento sensor à fibra óptica com perfil D metalizado, que funciona baseado no efeito de RPS. Nessa figura, os feixes representam o sinal óptico guiado no núcleo da fibra óptica, com comprimento de onda λ , que incide na casca com ângulo θ . Também são ilustrados na Figura 3(a) os Plasmons de Superfície (PS), que oscilam na interface metal/meio externo. A Figura 3(b) ilustra o comportamento genérico para o espectro refletido (ou transmitido), que é obtido para um sensor à base de RPS [54]. Nessa figura, o ponto de mínimo da curva ocorre para o comprimento de onda λ_{PS} , que é o comprimento de onda específico do sinal óptico que se propaga na estrutura da Figura 3(a), e gera o efeito de RPS. Com isso, boa parte dos sistemas sensores à fibra óptica, baseados no efeito de RPS, usam a interrogação por comprimento de onda para a detecção das grandezas em interesse, visto que alterações na permissividade do meio externo podem deslocar o comprimento de onda λ_{PS} [54].

Elementos sensores que exploram o efeito de RPS geralmente são seletivos e apresentam alta sensibilidade, com comportamento linear da grandeza usada na detecção [54]. Além disso, como os metais sobre o perfil D funcionam como elementos transdutores, a escolha do tipo de metal pode estar associada à grandeza, fenômeno ou substância que se deseja detectar pela transdução, assim como, ao comprimento de onda de operação do sensor óptico (λ_{PS}) [54]. O comprimento da região plana do perfil D (comprimento de interação) e a espessura da casca residual, que separa o metal do núcleo da fibra óptica, também influenciam

Figura 3: (a) Estrutura genérica de elemento sensor baseado no efeito de RPS em fibra óptica com perfil D metalizado. (b) Curva genérica do espectro refletido de um sensor à base de RPS.



Fonte: O Autor, 2020.

no desempenho desse tipo de elemento sensor.

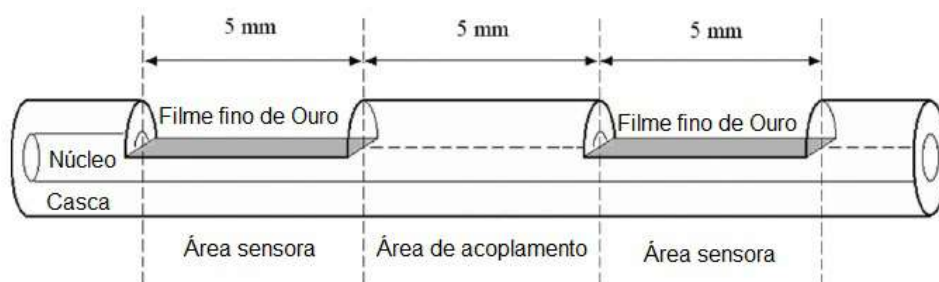
No trabalho proposto por H. Esmailzadeh *et al.* [55], é obtido um sensor de índice de refração à base de fibra óptica monomodo com perfil D. O elemento sensor é construído com a metalização do perfil D, que tem 8 mm de comprimento, com um filme fino de ouro com 45 nm de espessura. O sensor funciona baseado no efeito de RPS, com comprimento de onda na faixa de 600-700 nm, onde a ressonância ocorre para o comprimento de onda de 630 nm, detectado por um OSA. Para a faixa de detecção de índice de refração de 1,32-1,37 UIR, o sensor tem sensibilidade de 5200 nm/UIR com resolução de $3,7 \times 10^{-6}$ UIR [55].

O ouro é um metal frequentemente usado como transdutor em elementos sensores baseado em fibra óptica com perfil D metalizado, devido sua estabilidade química [55–62]. Outros metais também são usados para metalizar o perfil D, como prata (Ag) [63, 64] e paládio (Pd) [65]. Alguns trabalhos propõem o uso de bicamadas metálicas sobre o perfil D, como proposto por H. S. Jang *et al.* [66], que fez uso de uma bicamada composta por ouro (Au) e crômio (Cr). Também são obtidos elementos sensores que combinam camadas de óxidos e metais, como SiO_2/Au (sílica/ouro) [67], Ta_2O_5/Au (pentóxido de tântalo/ouro) [68], Au/Ag (ouro/prata) [69], entre outros.

Uma estrutura de elemento sensor que usa uma fibra óptica multimodo com dois perfis D metalizados em cascata, como ilustrado na Figura 4, é descrita no trabalho proposto por Yu.-C. Lin *et al.* [70]. Cada perfil D tem comprimento de 5 mm, e é metalizado com um filme fino de ouro com 40 nm de espessura. Esse elemento sensor é baseado no efeito de RPS, com faixa de detecção de índice de refração de 1,3333-1,3338 UIR, para sensoriamento

biológico do subtipo de vírus influenza H6N1, em que a ressonância ocorre em 1,3338 UIR, que é quando o índice de refração do antígeno é alterado na presença do vírus H6N1. A caracterização do elemento sensor faz uso de uma fonte de luz banda larga (400-1800 nm) e um analisador de espectro óptico (OSA), para identificação do comprimento de onda de ressonância. Para o sensoriamento, se faz uso de um laser, que emite no comprimento de onda de 690 nm, e um medidor de potência, para o monitoramento da intensidade do sinal óptico transmitido. Esse tipo de configuração possibilitou a detecção de variações no índice de refração do meio externo com resolução da ordem de 10^{-5} UIR [70].

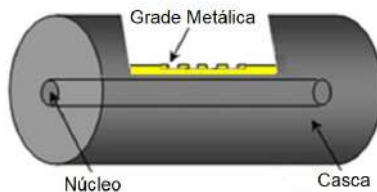
Figura 4: Elemento sensor com perfil D metalizado em cascata.



Fonte: adaptado de [70].

Elementos sensores com estruturas mais complexas, envolvendo fibra óptica com perfil D metalizado, também são obtidos na literatura. No trabalho proposto por H.-T. Yan *et al.* [71], uma grade metálica, com 485 nm de periodicidade e 38,8 μm de extensão, é construída com ouro depositado sobre o perfil D de uma fibra óptica monomodo. A estrutura do elemento sensor é ilustrada na Figura 5, que funciona à base do efeito de RPS em grade de difração [71]. Com essa grade, o efeito de RPS, que usualmente é excitado no ouro usando radiação com comprimentos de onda do espectro visível, permitiu esse elemento sensor operar no comprimento de onda de ressonância de 1550 nm, que é usado nas comunicações ópticas [71]. Para a faixa de detecção de índice de refração de 1,33-1,37 UIR, esse elemento sensor possui sensibilidade de 917 nm/UIR, com resolução de $1,1 \times 10^{-2}$ UIR [71]. Adicionalmente, foram investigados os efeitos da temperatura na resposta desse elemento sensor. Alterando a temperatura ambiente no intervalo de 20-60 $^{\circ}\text{C}$, tem-se uma sensibilidade de apenas 40 pm/ $^{\circ}\text{C}$ [71]. Outras estruturas periódicas construídas sobre o perfil D também são obtidas em [72, 73].

Figura 5: Grade metálica sobre o perfil D de uma SMF.



Fonte: adaptado de [71].

2.1.1.3 Perfil D com Materiais Não-metálicos

Elementos sensores também são obtidos a partir da deposição de materiais não-metálicos sobre o perfil D. De forma análoga ao uso de materiais metálicos sobre o perfil D, que permitem explorar o efeito de RPS, os materiais não-metálicos também são usados para aprimorar o desempenho do elemento sensor, possibilitando a ocorrência do efeito de Ressonância de Modo Dissipativo (RMD), ou, do inglês LMR (*Lossy Mode Resonance*) [17]. Esse efeito também é caracterizado pela absorção máxima da onda evanescente pelo material transdutor. Ele ocorre para as polarizações TE e TM, que tem campo elétrico perpendicular e paralelo à interface do material transdutor com o meio externo, respectivamente [74]. Diferentemente do efeito de RPS, que ocorre apenas para a polarização TM. Dada a permissividade elétrica de um meio material na forma $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$, em que ε' é parte real e ε'' é a parte imaginária [74], as condições que determinam se o material suporta o efeito de RPS ou RMD são definidas com base em sua permissividade. Para o efeito de RPS, a permissividade do material deve satisfazer $\varepsilon' < 0$ com $|\varepsilon'| > |\varepsilon''|$, em que tais condições são satisfeitas pelos materiais metálicos [75]. Para o efeito de RMD, tem-se que a permissividade do material deve ser tal que $\varepsilon' > 0$ com $|\varepsilon'| > |\varepsilon''|$, em que tais condições são satisfeitas por óxidos metálicos, polímeros entre outros materiais [75]. Um material que é frequentemente usado como elemento transdutor é o ITO (*Indium Tin Oxide*) [76, 77].

Para o elemento sensor proposto por F. J. Arregui *et al.* [78], um filme de ITO com 92 nm de espessura é depositado sobre o perfil D, com 17 mm de comprimento, de uma fibra óptica monomodo. Com esse elemento sensor, é construído um refractômetro que faz uso de uma fonte de luz banda larga, um controlador de polarização e um OSA [78]. A resposta ao efeito de RMD ocorre para o comprimento de onda de ressonância de 1420 nm, para a polarização TE. Para a faixa de detecção de índice de refração de 1,321-1,339 UIR, obtém-se sensibilidade de 5855 nm/UIR [78]. Já para a estreita faixa de 1,4487-1,4490 UIR, esse

sistema de detecção fornece uma gigante sensibilidade de 304.630 nm/UIR com resolução de $3,28 \times 10^{-9}$ UIR [78]. Outros materiais também são usados como elementos transdutores de sensores à base de fibra óptica com perfil D, que usam o efeito de RMD, tais como, os polímeros PAA e PVA [79, 80] e óxido de titânio TiO_2 [81, 82].

2.1.1.4 Perfil D Acoplado com Guia de Onda Planar

Na literatura, são obtidas estruturas de elementos sensores que fazem uso de um guia de onda planar (PWG - *Planar Waveguide*) acoplado ao perfil D de uma fibra óptica. Nesse tipo estrutura, o material usado para o meio propagante do PWG pode ter propriedades ópticas e geométricas sensíveis à fatores externos como, por exemplo, alterações de temperatura, que podem causar alterações no índice de refração e espessura do PWG. Um comprimento de onda ressonante, para esse tipo de elemento sensor, é aquele do modo de propagação que acopla no PWG [83]. Como efeito, é observado uma redução da potência óptica transmitida ao longo da fibra óptica.

No trabalho proposto por W.-G. Jung *et al.* [83], é obtido um elemento sensor baseado num PWG acoplado ao perfil D de uma fibra óptica monomodo (SMF). A estrutura desse elemento sensor é ilustrada na Figura 6. O PWG é composto por duas camadas: a camada interna, com espessura d_0 e índice de refração n_0 , é o meio propagante; a camada externa funciona como uma casca e tem índice de refração n_2 , igual ao da casca da SMF. O controle do acoplamento da luz guiada com o PWG é dado pelo *gap* g_0 , que é a espessura da casca residual da fibra óptica e pela espessura e índice de refração do meio propagante (núcleo) do PWG e, conseqüentemente, do índice de refração efetivo da região que compreende o perfil D e o PWG [83]. Como pode ser observado na Figura 6, para aumentar a fração da onda eletromagnética que escapa pelo perfil D e acopla no PWG, é utilizado o perfil D sob um raio de curvatura R . Esse elemento sensor é usado em um sistema de detecção de temperatura, que faz uso de uma fonte de luz branca e um OSA. O comprimento de onda de operação, que acoplada no PWG, é em torno de 1560 nm. Para uma faixa de temperatura de 30-70 °C, esse sensor exibe sensibilidade de 0,71 nm/°C, com resolução de 1 °C [83].

Uma estrutura semelhante à obtida em [83] é proposta por A. Andreev *et al.* [84]. No entanto, a estrutura obtida em [84] faz uso de um PWG sem a camada da casca, para que o modo acoplado interaja com o meio externo. Com isso, essa estrutura é usada na construção de um refractômetro que opera em duas faixas de detecção de índice de refração:

Fonte: adaptado de [83].

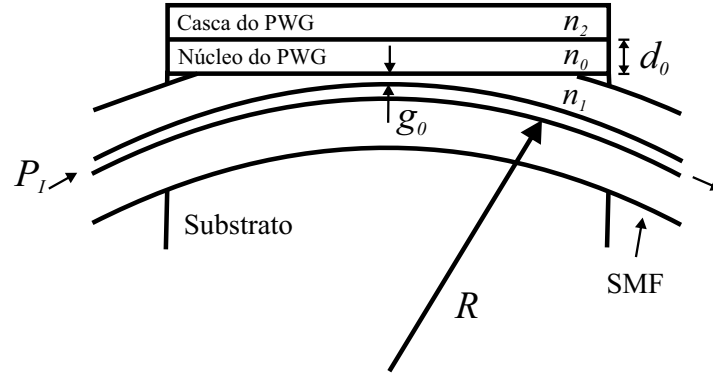


Figura 6: PWG acoplado no perfil D de uma SMF.

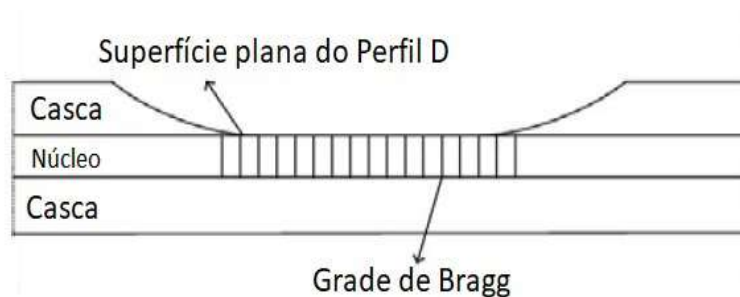
1,33-1,458 UIR com sensibilidade de 270 nm/UIR e resolução de 4×10^{-4} ; 1,33-1,38 UIR com sensibilidade de 5300 nm/UIR. Outras configurações são obtidas em [85], para sensor de gás e em [86], para sensor de radiação UV.

2.1.1.5 Perfil D com Estruturas de Grade

A Figura 7 ilustra o elemento sensor proposto por Q. Wang *et al.* [87], que faz uso de uma fibra óptica monomodo com perfil D com uma grade de Bragg gravada no núcleo, para detecção de índice de refração. A superfície plana do perfil D tem 8 mm de comprimento e casca residual tem 0,3 μm de espessura. Devido ao perfil D, que mantém a grande de Bragg próxima ao ambiente externo, alterações no índice de refração do meio externo tem influência sobre o índice de refração efetivo da região onde essa grade está gravada [87]. Essas alterações podem deslocar o comprimento de onda de Bragg λ_B , destacado por um vale no espectro do sinal óptico transmitido [87]. O sistema de detecção faz uso de uma fonte de luz banda larga e um OSA, conectados nas extremidades do link óptico que contém o elemento sensor da Figura 7. Para uma faixa de detecção de 1,38-1,45 UIR, o sensor de índice de refração opera em torno do comprimento de onda de 1567 nm, com sensibilidade de 30 nm/UIR, com resolução de 10^{-4} UIR [87]. Adicionalmente, um estudo da influência da temperatura na resposta do sensor foi realizado, variando a temperatura ambiente no intervalo de 22-100°C, onde se observou uma sensibilidade de apenas 9 pm/°C [87]. Estruturas semelhantes são obtidas em [87–92].

O elemento sensor mostrado na Figura 8, proposto por B. Jiang *et al.* [93], funciona como um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) e fez uso de uma fibra óptica com perfil D com $L_D=15$ mm de comprimento emendada em fibras SMF. A emenda é feita com um pe-

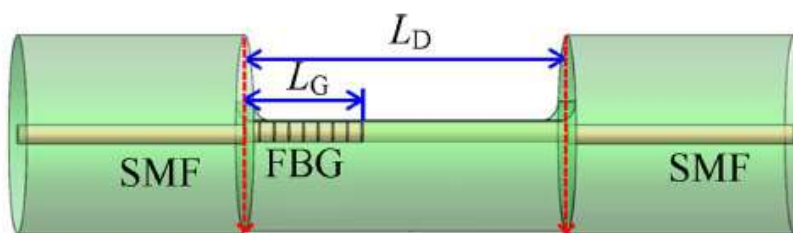
Figura 7: Perfil D em uma FBG para construção do elemento sensor.



Fonte: adaptado de [87].

queno desalinhamento entre os núcleos dessas fibras ópticas. Com isso, na primeira emenda da SMF com a fibra com perfil D, dois modos de propagação são estabelecidos na fibra com perfil D, o fundamental, que se propaga no núcleo, e um modo excitado, que se propaga na casca. Devido a segunda emenda, esses modos recombinam para acoplar na segunda fibra SMF [93]. O MZI é formado pela diferença de fase entre o modo fundamental e o modo excitado [93]. Uma pequena grade Bragg, com 5 mm de comprimento, é gravada em um trecho do perfil D. Com isso, a estrutura da Figura 8 funcionada como um sensor de curvatura e temperatura, simultaneamente. Alterações na temperatura apenas deslocam o comprimento de onda de Bragg λ_B , enquanto que a curvatura altera os caminhos ópticos do MZI e também desloca λ_B , devido o estresse na FBG [93]. Com um cruzamento das informações obtidas pelo espectro transmitido, medido num OSA, é possível separar as medidas de temperatura e curvatura obtidas pelo sensor [93]. A curvatura é detectada com sensibilidade de $87,7 \text{ nm/m}^{-1}$ e a temperatura com sensibilidade de $86 \text{ pm/}^\circ\text{C}$ [93].

Figura 8: MZI à base de fibra óptica com perfil D e grade de Bragg.

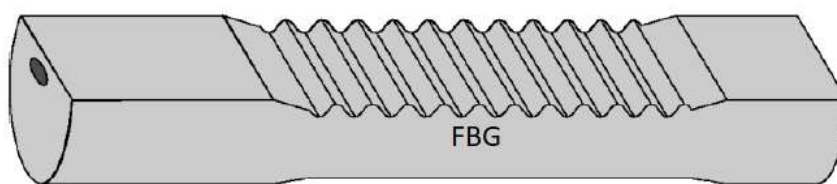


Fonte: adaptado de [93].

Uma estrutura não convencional de elemento sensor usando a combinação de grade de Bragg com fibra óptica com perfil D, é obtida no trabalho proposto por T. L. Lowder [94]. Nesse trabalho, uma grade de Bragg, com 15 mm de comprimento, 80 nm de profundidade

e 354 nm de periodicidade, é construída sobre o perfil D de uma fibra óptica de núcleo elíptico, usando técnicas de litografia [94]. A Figura 9 ilustra a estrutura do elemento sensor. Devido sua estrutura física robusta, essa grade de Bragg é capaz de suportar temperaturas superiores a 200 °C, que é a temperatura crítica em que uma grade de Bragg convencional é completamente apagada do núcleo de uma fibra óptica [94]. O sistema de detecção faz uso de uma fonte de luz banda larga e um OSA. O sensor de temperatura opera no comprimento de onda de 1550 nm, possui faixa de detecção de 200-1100°C e sensibilidade de 16 pm/°C [94]. Uma estrutura semelhante também é obtida em [95].

Figura 9: Elemento sensor com grade de Bragg construída sobre o perfil D.

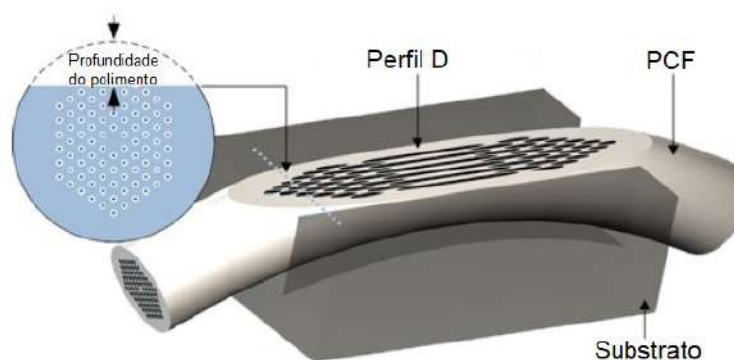


Fonte: adaptado de [94].

2.1.1.6 Perfil D em Fibra de Cristal Fotônico

Uma estrutura para um elemento sensor é proposta por D. Yong *et al.* [96], em que o perfil D é gerado em uma fibra de cristal fotônico (PCF - *Photonic Cristal Fiber*), como ilustrado na Figura 10. Com a criação do perfil D na PCF, alguns dos canais da PCF são abertos e permitem a penetração de líquidos, que podem interagir com a luz guiada na PCF. Fazendo uso de uma fonte de luz banda larga e um analisador de espectro (OSA), é possível detectar alterações no índice de refração dos líquidos que penetram nos canais da PCF. Com essa estrutura de elemento sensor e sistema de detecção, o refractômetro obtido em [96] é capaz de detectar alterações no índice de refração de líquidos na faixa de 1,31-1,43 UIR (Unidade de Índice de Refração), com resolução de $3,17 \times 10^{-5}$ UIR e sensibilidade de 315 nm/UIR. Esse tipo de elemento sensor não é comum de ser obtido na literatura. Além disso, por não ter uma fabricação simples, a maioria dos trabalhos propostos são baseados apenas em modelagens computacionais [97–102].

Figura 10: Perfil D em uma PCF para construção do elemento sensor.



Fonte: adaptado de [96].

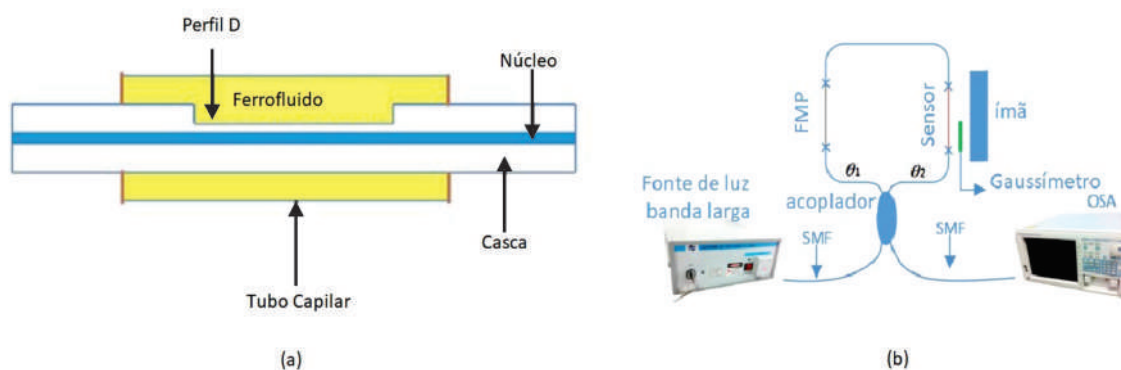
2.1.1.7 Perfil D Encapsulado

No trabalho proposto por X. Lei *et al.* [103], um elemento sensor para detecção de campo magnético é construído a partir de uma fibra óptica monomodo com perfil D, encapsulada em um tubo capilar. Esse tubo capilar é então preenchido com um fluido magnético, que tem a propriedade de ter seu índice de refração alterado quando colocado sob ação de um campo magnético [103]. A estrutura do elemento sensor é mostrada na Figura 11(a), em que a região plana do perfil D tem 0,1 mm de comprimento, a casca residual tem $8,5 \mu\text{m}$ de espessura e o material magnético é o ferrofluido [103]. O sistema de detecção ilustrado na Figura 11(b) é composto por uma fonte de luz banda larga, SMF, fibra mantenedora de polarização, acoplador 2x2, OSA e Gaussímetro. O sinal óptico emitido pela fonte de luz é guiado por uma SMF até o acoplador, onde é dividido em dois sinais, em que um sinal é direcionado para um caminho óptico composto por uma fibra mantenedora de polarização e o outro para um caminho óptico que contém o elemento sensor [103]. Essa estrutura funciona como um interferômetro, visto que os dois sinais ópticos são recombinados no acoplador e direcionados para um analisador de espectro (OSA) [103]. As alterações no índice de refração do ferrofluido, devido o campo magnético, causam mudanças no índice de refração efetivo da fibra com perfil D, que alteram o caminho óptico percorrido por um dos sinais, de modo que o padrão de interferência também é alterado. Com isso, a análise do espectro transmitido permite o monitoramento do campo magnético [103]. Esse sensor de campo magnético possui sensibilidade de $0,0823\text{nm/mT}$ [103].

Uma estrutura similar também é obtida no trabalho proposto por G. Violakis *et al.* [104]. O elemento sensor é composto por uma fibra óptica monomodo com perfil D

com 17 mm de comprimento, encapsulada num tubo capilar com ferrofluido. No entanto, a detecção do campo magnético não é baseada em princípios de interferometria. É explorada apenas a perda por absorção da luz ao interagir com o ferrofluido através do perfil D. Adicionalmente, é analisada a influência da orientação do campo magnético na resposta do elemento sensor. Isso foi feito com a aplicação de um campo magnético nas direções perpendicular e paralela à região plana do perfil D. Devido a diferença da orientação dos dipolos magnéticos no fluido magnético, a resposta do elemento sensor, quanto aos níveis de potência óptica transmitida, apresenta comportamento distinto para as direções perpendicular e paralela do campo magnético aplicado [104]. Na direção paralela, a absorção do ferrofluido diminui com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado, enquanto que na direção perpendicular a absorção aumenta [104]. A sensibilidade desse sensor é de 0,015 dB/Gs, para medições de fluxo de campo magnético [104].

Figura 11: (a) Elemento sensor baseado em fibra óptica com perfil D encapsulado. (b) Sistema de monitoramento de campo magnético.



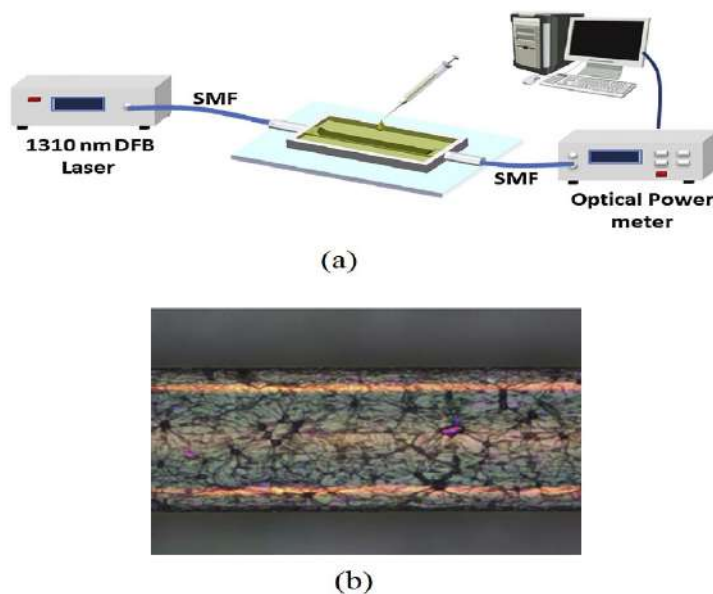
Fonte: adaptado de [103].

2.1.1.8 Perfil D com Grafeno

O uso de grafeno ou óxido de grafeno, para compor elementos transdutores de sensores à fibra óptica, vem recebendo destaque em trabalhos obtidos na literatura [105]. Em boa parte desses trabalhos, o grafeno é considerado como um material responsável pelo aprimoramento dos dispositivos sensores, proporcionando, por exemplo, alta sensibilidade. No trabalho proposto por Y. Huang *et al.* [106], óxido de grafeno é depositado sobre o perfil D de uma SMF, para compor um elemento sensor. O processo de deposição do óxido de grafeno deu-se da seguinte maneira: com o perfil D inserido em um recipiente com água, adiciona-se o óxido de grafeno, que formará uma solução em suspensão; quando a água é evaporada,

à temperatura ambiente, o óxido de grafeno se deposita sobre o perfil D. Em [106], esse processo teve duração de 4h. A Figura 12(a) ilustra a configuração experimental usada para monitorar o processo de deposição do óxido de grafeno. Um laser DFB, que emite num comprimento de onda de 1310 nm, é usado para emitir um sinal óptico ao longo da fibra óptica, até ser detectado por um medidor de potência óptica. Um dado nível de potência óptica foi mensurado com o perfil D imerso na solução. Quando o grafeno é depositado sobre o perfil D da SMF, após a evaporação da água, foi detectada uma perda de 9 dB na potência óptica, resultante da interação da luz com o óxido de grafeno. A estrutura obtida em [106] é usada num sensor de umidade, que opera com comprimento de onda de 1585 nm, e exibe sensibilidade de 0,145 nm/%UR, %UR (Umidade Relativa), para a faixa de detecção de 32-85%UR. Para a faixa de umidade relativa de 85-97,6%UR, o sensor exibe sensibilidade de 0,915 nm/%UR.

Figura 12: (a) Configuração experimental para monitoramento da deposição do óxido de grafeno no perfil D de uma SMF. (b) Imagem microscópica do óxido de grafeno depositado sobre o perfil D da SMF.



Fonte: adaptado de [106].

No trabalho proposto por A. L. Khalaf *et al.* [107], um elemento sensor é construído a partir de uma POF com perfil D. A região plana do perfil D tem 20 mm de comprimento e foram removidos 600 μm da espessura total da POF. Sobre o perfil D, é depositado um nanocompósito combinado ao grafeno e PANI (*Polymer Polyaniline*), que é um polímero condutor. Esse polímero é um componente ativo para detecção de gás amônia e o grafeno, devido sua alta absorbância óptica, aprimora a detecção desse gás, permitindo obter uma

sensibilidade cinco vezes maior que a de um elemento sensor que usa apenas o PANI. Ou seja, vai de 21,7 UA/% para 132,8 UA/%, (UA - Unidade de Absorbância), para uma faixa de concentração de gás amônia de 0,1-1%, com resolução de $2,246 \times 10^{-3}\%$ [107]. Além disso, o tempo de resposta do sensor também foi aprimorado de 292 para 112 segundos, para essa faixa de concentração. O sistema de detecção faz uso de uma fonte de luz halogênea, que emite na faixa de comprimento de onda de 360-2400 nm, espectrômetro e uma câmara de gás. Outro elemento sensor, para detecção de gás metano, é obtido em [108], com uma fibra óptica monomodo com perfil D revestido com uma camada de SnO_2 dopada com grafeno. Alguns trabalhos baseados em modelagem computacional, que fazem o uso de grafeno para melhorar o desempenho de um elemento sensor, também são obtidos na literatura [109–111].

2.1.2 Classificação dos Sensores a Fibra Óptica com Perfil D

Com base na descrição das estruturas dos elementos sensores mostrados na Seção 2.1.1, a Tabela 1 apresenta uma classificação dos sensores à base de fibra óptica com perfil D. O Princípio de Operação está relacionado com o fenômeno físico envolvido: perda, que está associada à luz que escapa para o meio externo; efeito de ressonância de plásmom de superfície (RPS), devido à presença de materiais metálicos sobre o perfil D; efeito de ressonância de modo dissipativo (RMD), devido à presença de materiais óxidos e poliméricos sobre o perfil D; acoplamento de modo de propagação em guia de onda planar acoplado com o perfil D; deslocamento do comprimento de onda de Bragg λ_B ; interferometria, devido a recombinação de modos de propagação guiados por caminhos ópticos distintos; absorção, devido à interação da luz com materiais absorvedores.

A grandeza está relacionada ao parâmetro físico que é alterado devido às perturbações do meio/fenômeno sob análise. Como pode ser observado, nessa categoria, o índice de refração (IR), do meio externo ou dos elementos transdutores, é o parâmetro predominante. Ou seja, são as mudanças do índice de refração que são percebidas pelos efeitos ópticos em que o sensor tem seu funcionamento baseado. Mudanças de temperatura (T), tração ou compressão (*strain* - ϵ) e curvatura (κ), também podem causar perturbações na estrutura física do elemento sensor, como por exemplo, dilatação térmica dos elementos transdutores e alterações na periodicidade da grade de Bragg.

A Dependência da Polarização é uma categoria que se refere à componente do estado de polarização da luz que é responsável por excitar o fenômeno físico em que o sensor

é baseado. Além disso, essa categoria se refere ao uso de sistemas de detecção baseados na medida do estado de polarização. Por fim, a categoria Equipamento de Detecção está relacionada à análise do sinal óptico que transporta as informações do meio sob monitoramento, que pode ser através da análise de espectro, medido num OSA, ou de intensidade, medida por um medidor de potência (MP).

Tabela 1: Parâmetros qualitativos dos elementos sensores.

Elemento Sensor	Princípio de Operação	Grandeza	Dependência da Polarização	Equipamento de Detecção	Refs.
D-Exposto ¹	Perda	IR	Não	MP	[13, 35–52]
D-FM ²	RPS	IR	TM	OSA	[55–71]
D-MnM ³	RMD	IR	TE, TM	OSA	[78–82]
D-PWG ⁴	Acoplamento	IR, T	TE, TM	OSA	[83–86]
D-FBG ⁵	λ_B , Interferometria	IR, ϵ , κ , T	Não	OSA	[87–95]
D-PCF ⁶	Perda	IR	Não	OSA	[96–102]
D-Encapsulado ⁷	Interferometria, Absorção	IR	Sim	OSA	[103, 104]
D-Grafeno ⁸	Absorção	IR	Não	OSA	[106–111]

¹ D-Exposto - Perfil D Exposto, ² D-FM - Perfil D com Filmes Metálicos, ³ D-MnM - Perfil D com Materiais não-Metálicos, ⁴ D-PWG - Perfil D Acoplado com Guia de Onda Planar ,

⁵ D-FBG - Perfil D com Estruturas de Grade, ⁶ D-PCF - Perfil D em Fibra de Cristal Fotônico,

⁷ D-Encapsulado - Perfil D Encapsulado, ⁸ D-Grafeno - Perfil D com Grafeno.

As estruturas dos elementos sensores descritos na Seção 2.1.1 podem ser empregadas em diversos sistemas de detecção. Com isso, a Tabela 2 apresenta uma classificação para esses elementos sensores com base em suas aplicações. A aplicação mais genérica, em que quase todos os elementos sensores são empregados, é na construção de sensores de índice de refração (ou refractômetros). Os sensores bioquímicos são classificados como aqueles usados na detecção de soluções aquosas com concentrações de etanol e derivados, glicose, compostos orgânicos, proteínas, toxinas, anticorpos, contaminantes do óleo isolante de transformadores de potência (2-FAL), entre outros. Ou seja, na categoria de sensores bioquímicos são obtidos sensores para detecção de substâncias biológicas e sensores para detecção de reações químicas. Geralmente, para os sensores bioquímicos, as soluções envolvidas tem índice de refração na faixa restrita de 1,3-1,5 UIR. Os sensores de estresse e curvatura são típicas aplicações das estruturas que combinam grade de Bragg com perfil D. O uso de perfil

D encapsulado (D-Enc), para os trabalhos revisados, ficou restrito aos sensores de campo magnético. Assim como os sensores para detecção de radiação ultravioleta (UV) ficaram restritos ao uso do perfil D acoplado a um guia de onda planar (D-PWG). Os sensores de gás e pH, que são construídos com estruturas que envolvem o perfil D revestido com transdutores - material metálico (D-FM), não-metálico (D-MnM) e grafeno ou óxido de grafeno (D-G) - têm como característica comum algum tipo reação química do gás com o elemento transdutor, que gera algum produto e, conseqüentemente, altera o seu índice de refração e/ou absorbância. Os sensores de umidade funcionam de maneira semelhante aos sensores de gás e pH, no entanto, geralmente os elementos transdutores são na forma de membranas. Por fim, os sensores de temperatura apresentam versatilidade quanto ao tipo do elemento sensor. Para os sensores de temperatura à base das estruturas D-FM e D-MnM, são usados elementos transdutores que tem altos valores para seus coeficientes termo-ópticos. Para as estruturas D-PWG, se explora os efeitos da expansão térmica do material que constitui do PWG.

Tabela 2: Classificação dos elementos sensores quanto às aplicações.

Aplicação Sensora	Estrutura do Elemento Sensor							
	D-Exp	D-FM	D-MnM	D-PWG	D-FBG	D-PCF	D-Enc	D-G
Índice de Refração	x	x	x	x	x	x	x	x
Bioquímico	x	x	x	x				
Campo Magnético							x	
Temperatura		x	x	x	x			
Umidade			x	x				x
Gás		x	x					x
Estresse					x			
Curvatura					x			
Radiação UV				x				
pH		x	x					

Por fim, como esta Tese de Doutorado também traz uma aplicação de fibras óptica com perfil D para a construção de um sensor de índice de refração, a Tabela 3 apresenta uma caracterização para o desempenho dos sensores de índice de refração obtidos com as estruturas descritas na Seção 2.1.1. Essa caracterização é obtida com base nas figuras de mérito desses sensores, definidas como faixa de detecção, sensibilidade e resolução. Ainda

Tabela 3: Caracterização dos Sensores de Índice de Refração.

Elemento Sensor	Figuras de Mérito				
	Faixa de Operação	Sensibilidade	Resolução	Comprimento de Onda	Ref.
D-Exposto	1,417-1,48 UIR	36,3 dB/UIR	10^{-3} UIR	660 nm	[13]
	1,33-1,44 UIR	864%/UIR	$3,3 \times 10^{-4}$ UIR	635 nm	[51]
D-FM	1,32-1,37 UIR	5200 nm/UIR	$3,7 \times 10^{-6}$ UIR	630 nm	[55]
	1,3333-1,3338 UIR	390 dB/UIR	2×10^{-5} UIR	690 nm	[70]
	1,33-1,37 UIR	917 nm/UIR	$1,1 \times 10^{-2}$ UIR	1550 nm	[71]
D-MnM	1,321-1,339 UIR	5855 nm/UIR	$1,7 \times 10^{-7}$	1420 nm	[78]
	1,4487-1,4490 UIR	304360 nm/UIR	$3,28 \times 10^{-9}$ UIR	1420 nm	[78]
D-PWG	1,33-1,458 UIR	270 nm/UIR	4×10^{-4} UIR	845 nm	[84]
	1,36-1,38 UIR	5300 nm/UIR	$1,9 \times 10^{-5}$ UIR	1310 nm	[84]
D-FBG	1,38-1,45 UIR	30 nm/UIR	10^{-2} UIR	1567 nm	[87]
D-PCF	1,31-1,43 UIR	315 nm/UIR	$3,17 \times 10^{-5}$ UIR	1364 nm	[96]

na Tabela 3, também está destacado o comprimento de onda de operação. No Capítulo 4, a partir dessa caracterização, são realizados comparativos do desempenho desses sensores com o proposto. Como pode ser observado, os maiores valores de sensibilidades são alcançados pelo sensores à base das estruturas D-FM, D-MnM e D-PWG, que envolvem os fenômenos de RPS, RMD e acoplamento de modo ressonante, respectivamente. Além disso, também são essas estruturas que fornecem valores de resolução da ordem de 10^{-2} à 10^{-9} UIR. No entanto, deve-se notar que esses sensores que exibem a melhor performance em termos de sensibilidade e resolução operam numa estreita faixa de detecção de índice de refração. Para as estruturas que não usam elementos transdutores sobre o perfil D, D-Exposto, D-FBG, D-PCF, e exploram apenas a interação da onda evanescente com o meio externo, deve-se observar que elas exibem figuras de mérito razoáveis. Como destaque, deve-se notar a faixa de detecção, que é maior em relação às outras estruturas, e as razoáveis resoluções, que aponta a detecção de mudanças no índice de refração da ordem de 10^{-2} à 10^{-5} . Em relação ao comprimento de onda de operação, observa-se valores no espectro visível ao infravermelho. Com destaque, tem-se o uso do comprimento de onda de 1550 nm, que simplifica a construção dos sistemas de detecção, devido à facilidade para obtenção de dispositivos como lasers,

acopladores, atenuadores, filtros, amplificadores, entre outros, por esse ser um comprimento de onda usado nos sistemas de comunicações ópticas.

2.2 SENSORES DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA

Nesta seção, são apresentados os principais sistemas à base de fibra óptica para detecção da corrosão. Como a maior parcela das soluções propostas faz uso das estruturas de grades, através das FBGs e LPFGs, a análise dos sistemas de detecção da corrosão está dividida em duas categorias. Na Seção 2.2.1, é apresentada a categoria dos sensores que fazem uso das estruturas de grade. Já na Seção 2.2.2, são apresentadas as soluções alternativas ao uso das estruturas com FBGs ou LPFGs. Por fim, na Seção 2.2.3 é apresentada uma síntese com informações qualitativas dos sistemas sensores analisados.

2.2.1 Sensoriamento à Base de FBGs e LPFGs

De modo geral, sensores baseados em fibra de grade de Bragg exploram a sensibilidade dessa grade às perturbações do meio externo, tais como alterações de temperatura, tração e compressão (*strain*) e mudanças no índice de refração da região em que a grade está inscrita. Tais perturbações podem alterar o comprimento de onda de Bragg expresso por

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda_{FBG}, \quad (2.4)$$

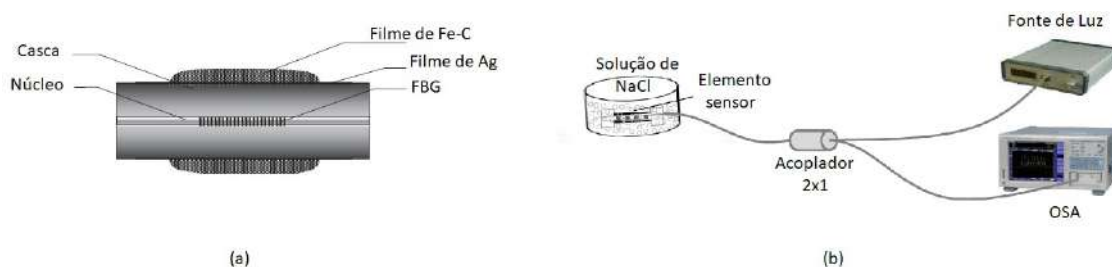
em que n_{eff} é o índice de refração efetivo da região em que a grade está inscrita e Λ_{FBG} é a periodicidade da grade. Com isso, a construção de elementos sensores para detecção da corrosão se restringe ao desenvolvimento de mecanismos que perturbem a grade de Bragg.

Nesse sentido, W. Hu *et al.* [112] propuseram um sensor para monitoramento da corrosão em estruturas de aço, fazendo uso de uma FBG revestida com uma camada de aço-carbono (Fe-C) com aproximadamente $15\ \mu\text{m}$ de espessura. Um revestimento primário, com um filme fino de prata (Ag) com 100 nm de espessura é usado como camada condutora para o processo de galvanização da liga Fe-C. A estrutura do elemento sensor é mostrada na Figura 13(a). Quando colocado em ambiente corrosivo, tem-se a geração da ferrugem na liga de Fe-C, devido a oxidação do ferro. Essa ferrugem provoca alterações no volume do filme de Fe-C, visto que sua densidade é alterada [112]. No entanto, a expansão longitudinal desse filme é limitada pelo comprimento da fibra, de modo que é gerado estresse nessa região

[112]. Esse estresse causa alterações na periodicidade da FBG, causando um deslocamento do comprimento de onda de Bragg λ_B . Como ilustrado na Figura 13(b), o sistema de detecção é constituído por uma fonte de luz que emite no comprimento de onda de 1300 nm com largura de banda de 60 nm, um acoplador 2x1 e um espectrômetro. Com o elemento sensor imerso em uma solução de NaCl, a corrosão é iniciada e o comprimento de onda refletido λ_B é monitorado no espectrômetro [112].

Sensores à base de FBG também são propostos para a detecção da corrosão em estruturas de concreto armado. Para esse tipo de aplicação, o trecho de fibra óptica em que a grade de Bragg está inscrita é fixado na superfície do aço usado na estrutura antes da concretagem. Como destacado anteriormente, a oxidação do ferro causa expansão na superfície do aço, devido a criação da ferrugem. Tal expansão pode aumentar a periodicidade Λ_{FBG} da grade de Bragg, resultando em alterações do comprimento de onda de Bragg, como mostrado na equação (2.4). Abordagens para o monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado, baseadas nessa descrição, são obtidas em [113–115] e apresentam sistemas de detecção semelhantes ao mostrado da Figura 13(b).

Figura 13: (a) Representação esquemática da estrutura do sensor de corrosão à base de FBG. (b) Sistema de detecção da corrosão.



Fonte: adaptado de [112].

Com base na equação (2.4), explorando as alterações no índice de refração efetivo da região em que a grade de Bragg está inserida, N. Zhang *et al.* [116] propuseram um sistema de monitoramento da corrosão à base de FBG. No entanto, a estrutura do elemento sensor é diferente da mostrada na Figura 13(a), pois no trecho em que a grade de Bragg está inscrita, a maior parte da casca da fibra óptica é removida, usando uma solução corrosiva com HF. Sobre esse trecho, é depositado um filme fino de ferro com 30 nm de espessura, que altera o índice de refração efetivo dessa região. Quando o elemento sensor é imerso numa solução corrosiva de NaCl, os produtos da corrosão do ferro, tais como óxidos e hidróxidos, alteram significativamente o índice de refração do filme fino [116]. Como consequência, o

índice de refração efetivo dessa região também é alterado, causando um deslocamento no comprimento de onda de Bragg. Com a medida do tempo necessário para o deslocamento total do comprimento de onda de Bragg, que está associado à corrosão total do filme fino de ferro, obtém-se a taxa de corrosão [116].

Um sistema de monitoramento multiponto da corrosão é proposto por L. Ren *et al.* [117]. É feito uso da técnica de reflectometria óptica no domínio da frequência (*OFDR - Optical Frequency-Domain Reflectometry*), que utiliza a interferometria de varredura de comprimento de onda para medir o retroespalhamento Rayleigh, como uma função da posição, devido deformações ao longo do link de fibra óptica [117]. Essa técnica possui resolução espacial da ordem de milímetros [117]. O sistema multiponto é composto por um equipamento de OFDR, que é conectado a um link óptico que contém sete FBGs conectadas em série e espaçadas de 8 metros. O objetivo desse sistema é o monitoramento da corrosão em dutos metálicos, com as FBGs fixadas e tensionadas em pontos ao longo da circunferência desses dutos [117]. A corrosão causa diminuição do diâmetro dos dutos e, consequentemente, alterações da tensão circunferencial, que são detectadas pelas FBGs [117]. Outro sistema de monitoramento multiponto da corrosão é obtido no trabalho proposto por S. Magne *et al.* [118], em que FBGs em série são fixadas ao longo da superfície de uma barra de aço usada numa estrutura de concreto armado. A detecção multiponto também faz uso da técnica de OFDR [118].

Uma LPFG (*Long Period Fiber Grating*) é uma fibra óptica com uma modulação no índice de refração do núcleo, semelhante à observada em uma grade de Bragg. Normalmente, essa modulação pode ser gerada com radiação UV ou arco voltaico. No entanto, a periodicidade de uma LPFG é da ordem de micrômetros, enquanto a periodicidade de uma grade de Bragg é da ordem de nanômetros [119]. Além disso, quando um sinal óptico se propaga numa FBG, tem-se a reflexão de um dos modos de propagação (modo contra-propagante), com comprimento de onda específico λ_B , que depende das propriedades da grade de Bragg. Já numa LPFG, quando um sinal óptico é propagado em tal estrutura, existe a possibilidade de alguns modos de propagação acoplarem na casca da fibra óptica [119]. Esses modos de casca são fortemente atenuados e tem comprimento de onda λ_i dado pela equação

$$\lambda_i = (n_{core} - n_{clad}^i) \Lambda_{LPG}, \quad (2.5)$$

em que n_{core} é índice de refração do núcleo e Λ_{LPG} é a periodicidade da LPG (*Long Period*

Grating). O parâmetro n_{clad}^i é o índice de refração efetivo do i -ésimo modo de casca, que depende do índice de refração do meio externo à casca [119]. Com isso, alterações no índice de refração do meio externo e na periodicidade da LPG podem alterar o comprimento de onda λ_i dos modos acoplados na casca. Como esses modos são co-propagantes, com a mesma direção do sinal óptico fundamental que se propaga no núcleo, a análise do espectro transmitido apresenta vales para os comprimentos de onda λ_i [119].

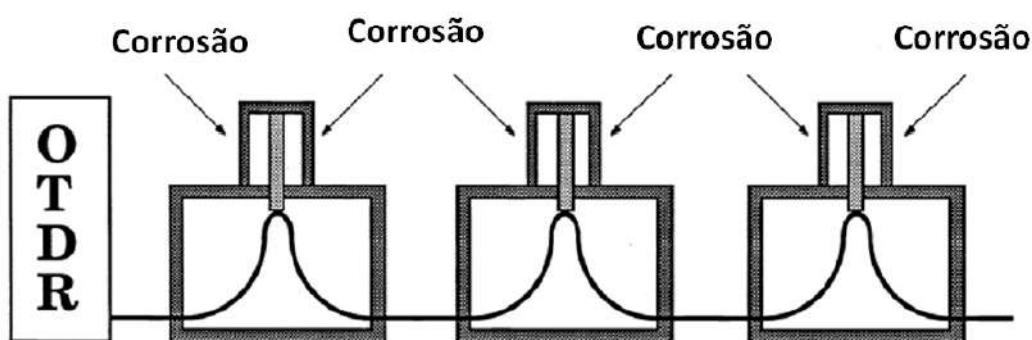
Fazendo uso de uma LPFG com periodicidade de $399 \mu\text{m}$, L. C. C. Coelho *et al.* [120] propuseram um sensor para monitoramento da corrosão. O trecho da fibra óptica que tem a LPG gravada é revestido por um filme fino de ferro com espessura de 40 nm , depositado por técnicas de evaporação térmica, compõe a estrutura do elemento sensor. O sistema de monitoramento é composto por uma fonte de luz banda larga, que estabelece um sinal óptico no link sensor composto pela LPFG, e um OSA, para detecção do espectro transmitido. O processo corrosivo é monitorado com o elemento sensor imerso numa solução aquosa de NaCl. Como já citado anteriormente, os produtos da corrosão alteram o índice de refração do filme fino. Com isso, tem-se um deslocamento do comprimento de onda λ_i , do modo acoplado na casca da LPFG, devido alterações no índice de refração efetivo da região onde está localizada a casca e o filme fino. Assim como em [116], a razão entre a espessura do filme fino e o tempo necessário para o deslocamento máximo do comprimento de onda λ_i , fornece a taxa de corrosão.

2.2.2 Sensoriamento com Alternativas às Estruturas de Grades

Nesta seção, são destacados alguns sensores à fibra óptica para monitoramento da corrosão encontrados na literatura que não fazem uso de estruturas de grade (FBG ou LPFG). Um sistema de detecção multiponto é proposto por K. D. Bennett e L. McLaughlin [121], baseado no monitoramento de perdas geradas por microcurvaturas, fixadas por um anel metálico, realizadas em pontos discretos ao longo de um enlace de fibra óptica [121]. Essas perdas em cada ponto discreto são monitoradas pela técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo (*OTDR - Optical Time-Domain Reflectometry*) [121], que consiste basicamente em enviar, numa fibra óptica, um sinal de pulso óptico curto e observar o pulso retroespalhado pela fibra óptica. A comparação entre a luz gerada e a refletida produz uma série de informações sobre o meio de transmissão, tais como falhas, emendas e conectores, atenuação e perdas. A técnica de OTDR possui resolução espacial de ordem de metros e alcance da or-

dem de quilômetros. A Figura 14 mostra o esquema do sensor proposto. Quando os anéis metálicos que mantêm as curvaturas são corroídos, elas deixam de existir. Com o OTDR, as alterações nas perdas em cada ponto são detectadas e relacionadas à ocorrência de algum processo corrosivo [121]. A limitação dessa configuração é que quando essas perdas são detectadas, o anel metálico já tem sido corroído, ou seja, não é possível detectar o processo de corrosão enquanto ele ainda estiver ocorrendo. Com isso, esse sistema sensor não é capaz de fornecer a taxa de corrosão. Portanto, trata-se de um sistema de monitoramento da corrosão de dois níveis: com anel (sem corrosão) e sem anel (com corrosão) [121].

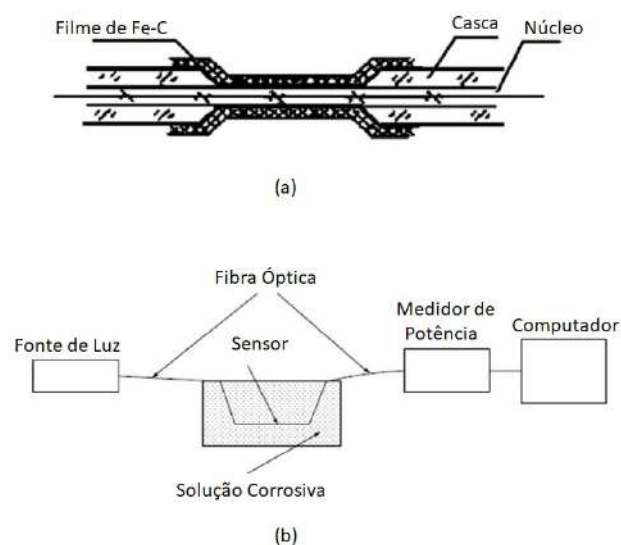
Figura 14: Esquema de funcionamento do sensor de corrosão proposto por Bennett e McLaughlin.



Fonte: adaptado de [121].

A Figura 15(a) ilustra o elemento sensor proposto por D. Saying *et al.* [5] para monitoramento da corrosão. Esse elemento sensor é composto por uma fibra óptica multimodo que teve sua casca removida em um dado trecho, com aproximadamente 20 mm de comprimento. Sobre esse trecho, inicialmente é depositado um filme fino de ouro com 300 nm de espessura, usado como condutor para a galvanização da camada de aço-carbono (Fe-C) com 1 μm de espessura [5]. A corrosão dessa camada metálica é monitorada pelas alterações na potência óptica transmitida, por meio de um medidor de potência conectado ao final do enlace, como mostra o aparato experimental da Figura 15(b) [5]. Essas alterações são devido às mudanças nas propriedades de absorção da luz pela liga metálica ao longo do processo de corrosão, em que o ferro vai se transformando em óxidos e hidróxidos. Esse sistema é capaz de medir a taxa de corrosão, ao contrário do proposto em [121]. No entanto, só permite o monitoramento da corrosão em um único ponto, visto que ele é baseado na medida de potência óptica transmitida. Outras estruturas para monitoramento da corrosão, com elemento sensor e sistema de detecção semelhante ao mostrado na Figura 15, podem ser obtidas em [4, 122].

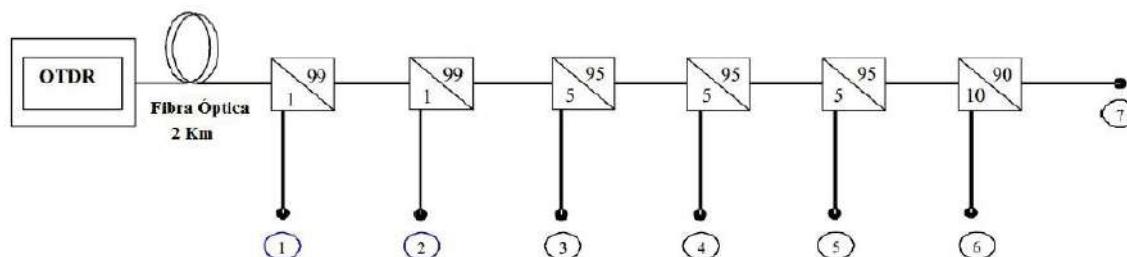
Figura 15: (a) Filme de Fe-C depositado na superfície lateral do núcleo da fibra óptica; (b) aparato experimental para monitoramento da corrosão.



Fonte: adaptado de [5].

J. F. Martins-Filho *et al.* [10] propuseram um sistema de monitoramento multiponto da corrosão à fibra óptica. Como pode ser observado na Figura 16, esse sistema é composto por um equipamento de OTDR comercial, conectado a um enlace de fibra óptica monomodo, e possui ramificações para sete cabeças sensoras [10]. Essas cabeças sensoras são prolongamentos de fibras ópticas monomodo onde, na face clivada dessas fibras, são depositados filmes finos de alumínio com 100 nm de espessura, usando a técnica de evaporação térmica [10]. Esses filmes metálicos constituem o elemento transdutor das cabeças sensoras. Ainda na Figura 16, são observados os acopladores direcionais usados nas ramificações do enlace, que dividem o sinal óptico para que apenas uma pequena parte (1, 5 ou 10 %) desse sinal seja direcionado para as cabeças sensoras [10].

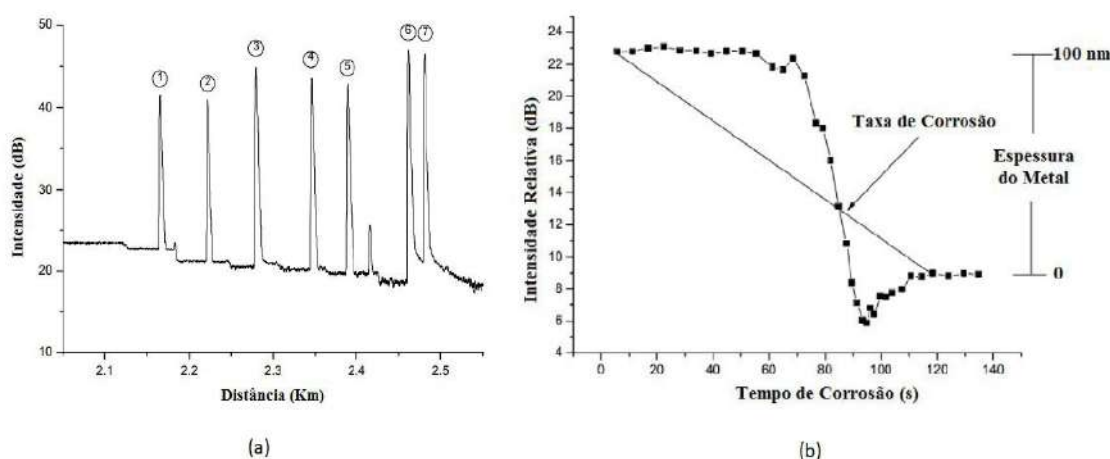
Figura 16: Diagrama esquemático do sensor multiponto de corrosão.



Fonte: adaptado de [10].

A Figura 17(a) mostra o traço do OTDR obtido pelo sistema sensor proposto por Martins-Filho [10]. Nesse traço é possível identificar as reflexões geradas pela incidência da luz na interface fibra/metal na ponta de cada cabeça sensora. Já na Figura 17(b), tem-se a curva da potência relativa versus tempo de corrosão, obtida por uma das cabeças sensoras. Como pode ser observado, a partir dessa curva, é possível se obter a taxa de corrosão, calculando a razão entre a espessura total do filme metálico e o tempo necessário para estabilização da intensidade relativa (que indica que o metal foi completamente corroído). Ainda na Figura 17(b), deve-se notar que quando o filme ainda é muito espesso, apesar da corrosão, não há alteração da intensidade relativa. Enquanto que, quando o filme se torna fino, a depender da taxa de corrosão, ele pode ser rapidamente consumido no processo de corrosão, causando uma rápida variação na intensidade relativa que, em seguida, volta a ser constante, o que sugere o uso desse sensor em ambientes pouco abrasivos.

Figura 17: (a) Traço do OTDR correspondente à intensidade da luz refletida como uma função da distância ao longo da fibra. Os números das cabeças sensoras são mostrados; (b) Intensidade relativa como função do tempo de corrosão.

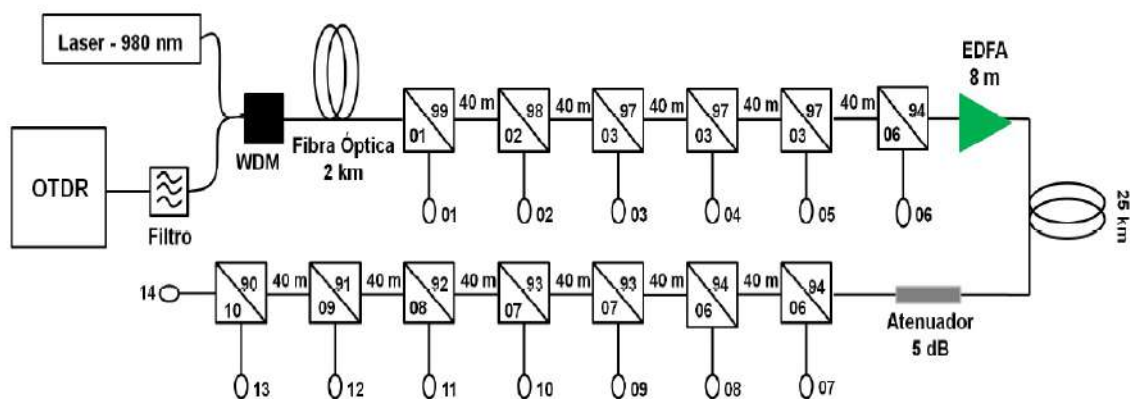


Fonte: adaptado de [10].

Um sistema de monitoramento multiponto da corrosão, semelhante ao obtido em [10], é proposto por J. F. Nascimento *et al.* [11]. No entanto, esse sistema de monitoramento possui um estágio de amplificação EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), que permite o monitoramento da corrosão à longas distâncias. Como pode ser observado na Figura 18, o sistema amplificado faz uso de um laser de bombeio de 980 nm e de 8 metros de fibra dopada com érbio para construção do EDFA. Ainda na Figura 18, destaca-se a inclusão de cabeças sensoras de 7 a 14, com 25 km de distância do equipamento de OTDR, onde ocorre o monitoramento da corrosão. As cabeças sensoras de 1 a 6, no início do enlace, representam o

sistema proposto por Martins-Filho [10]. Ou seja, sem o estágio de amplificação, é possível monitorar a corrosão em vários pontos à pequenas distâncias, já com o uso da amplificação do sinal óptico, pode-se estender o alcance dos pontos de monitoramento em dezenas de quilômetros.

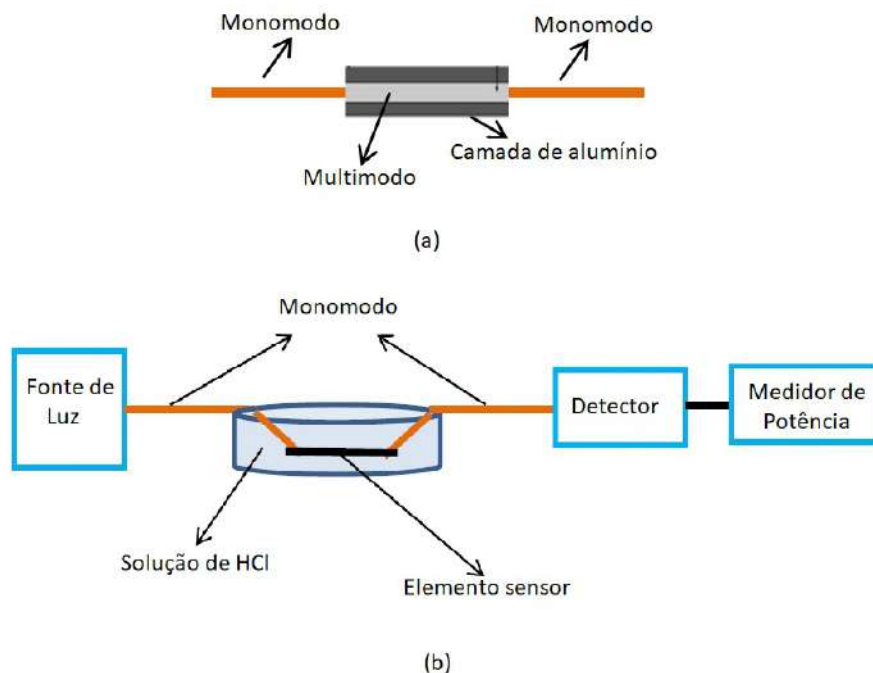
Figura 18: Sistema amplificado para monitoramento multiponto da corrosão.



Fonte: adaptado de [11].

A Figura 19(a) ilustra o elemento sensor proposto por P. Y. Aisyah *et al.* [123] para detecção da corrosão. Esse elemento sensor é composto por fibra óptica com hétero-estrutura, construída a partir da fusão de duas fibras monomodo com uma fibra multimodo, formando uma SMS (*Single mode - Multimode - Single mode*) [123]. A fibra multimodo da estrutura SMS é uma fibra especial sem casca, que tem 10 mm de comprimento e é revestida com uma camada de alumínio, que funciona como uma casca. O sistema de monitoramento da corrosão é mostrado na Figura 19(b), que tem uma fonte de luz e detector conectados no link óptico que contém o elemento sensor SMS. O sinal óptico que se propaga nessa estrutura é fortemente atenuado, devido a absorção de luz pela camada metálica que reveste a fibra multimodo. Com o elemento sensor imerso numa solução corrosiva de HCl, o processo de corrosão desse filme metálico faz com que as perdas por absorção sejam reduzidas, elevando a potência óptica transmitida [123]. Como pode ser observado, esse sistema é capaz de monitorar a corrosão em apenas um ponto, visto que a detecção é feita no final do enlace através da potência óptica transmitida. Além disso, esse sistema fornece a taxa de corrosão.

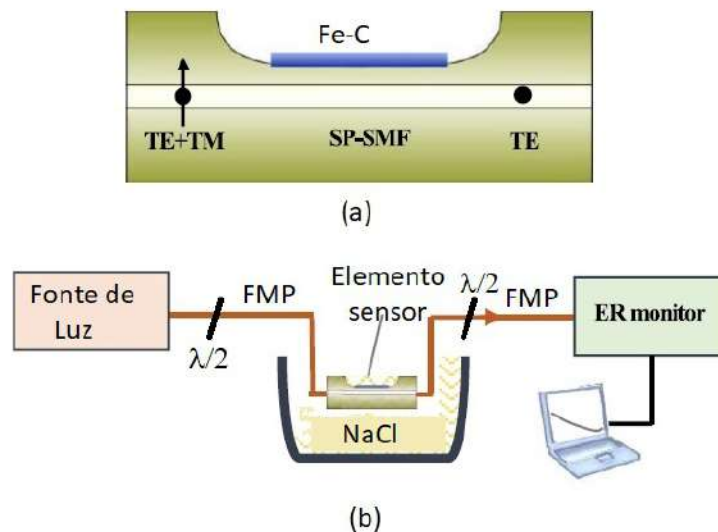
Figura 19: (a) Estrutura SMS do elemento sensor. (b) Sistema de monitoramento da corrosão.



Fonte: adaptado de [123].

Wenbin Hu *et al.* [124] propuseram um sensor para monitoramento da corrosão à base de fibra óptica com perfil D. A estrutura do elemento sensor é mostrada na Figura 20(a), que consiste numa fibra óptica monomodo com perfil D, em que a região plana do perfil D tem 12 mm de comprimento e é metalizada com um filme fino de aço-carbono (Fe-C) com 50 nm de espessura. Como ilustrado na Figura 20(a), o filme metálico sobre o perfil D da fibra óptica absorve a componente TM do modo de propagação e apenas a componente TE continua se propagando ao longo do link óptico [124]. Para o sistema de detecção da corrosão mostrado na Figura 20(b), uma fonte de luz não polarizada é conectada a um link óptico que possui um polarizador de placa de meia onda ($\lambda/2$) conectado a uma fibra mantenedora de polarização (FMP), que leva o sinal óptico até o elemento sensor. Na outra extremidade do elemento sensor, também é conectada uma fibra mantenedora de polarização e outra placa de meia onda. Por fim, o sinal óptico é detectado por um monitor de relação de extinção [124]. Com o elemento sensor imerso numa solução de NaCl, são monitoradas as alterações na relação de extinção, calculada a partir da razão entre os modos TE e TM [124]. O monitoramento ocorre em tempo real e permite obter a taxa de corrosão.

Figura 20: (a) Esquema do polarizador à fibra óptica. (b) Sistema de detecção da corrosão.



Fonte: adaptado de [124].

2.2.3 Análise Qualitativa dos Sensores de Corrosão

A Tabela 4 apresenta informações qualitativas que caracterizam os sensores de corrosão apresentados na Seção 2.2 e que representam uma amostragem dos sistemas de detecção à fibra óptica que podem ser obtidos na literatura. Para a categoria Elemento Sensor, estão definidas as arquiteturas de tais elementos: fibra de grade de Bragg revestida com filme metálico (FBG-M) ou sem revestimento metálico (FBG); fibra de grade de Bragg sem casca e revestida com filme metálico (FBG-SC-M); fibra de grade de período longo revestida com filme metálico (LPFG-M); fibra monomodo com anel metálico (SMF-AM) para fixação de microcurvatura; fibra multimodo sem casca e revestida com filme metálico (MMF-SC-M); fibra monomodo com face clivada metalizada (SMF-FCM); hétero-estrutura com fibras monomodo e multimodo com casca metálica (SMS-M) e fibra óptica com perfil D metalizado (Perfil D-M). Como pode ser observado na Tabela 4, o aço-carbono (Fe-C) e o alumínio (Al) são materiais metálicos frequentemente usados nas estruturas dos elementos sensores. Em relação ao Princípio Físico, estão destacados os parâmetros óptico que permitem inferir sobre a ocorrência de um processo corrosivo, com base em cada perfil de elemento sensor: deslocamento do comprimento de onda de Bragg λ_B , deslocamento do comprimento de onda do modo de casca λ_i ; perdas por microcurvatura (PMC); perdas por absorção (PA); mudanças na intensidade relativa do sinal óptico refletido (Reflectância R); alterações do estado de polarização da luz (EP).

Ainda na Tabela 4, deve-se notar que boa parte dos sensores propostos fornecem a taxa de corrosão, que é um dado imprescindível para os sistemas de controle e monitoramento da integridade de estruturas metálicas. Em relação aos pontos de detecção, deve-se notar que apenas os sistemas que fazem uso de equipamento de OTDR e OFDR possibilitam o monitoramento multiponto da corrosão, além de serem baseados na detecção do sinal óptico refletido. No entanto, o alcance dos sistemas à base de OFDR é da ordem de metros, com alta resolução espacial (da ordem de milímetros) [117, 118], enquanto o alcance dos sistemas à base de OTDR é da ordem de quilômetros com resolução espacial da ordem de metros [10, 11]. A categoria Equip. de Detecção diz respeito à instrumentação necessária para análise do sinal óptico que carrega as informações de um processo corrosivo. As instrumentações mais sofisticadas requerem uso de analisador de espectro óptico (OSA), equipamentos de OTDR e OFDR, e monitor de razão de extinção entre modos polarizados TE e TM (ER Monitor). As instrumentações mais simples usam apenas um medidor de potência (MP), visto que são baseadas apenas na análise da intensidade do sinal óptico transmitido.

Tabela 4: Parâmetros qualitativos dos sensores de corrosão.

Elemento Sensor	Metal	Princípio Físico	Taxa de Corrosão	Pontos de Detecção	Detecção	Equip. de Detecção	Refs.
FBG-M ¹	Fe-C	λ_B	Sim	Monoponto	Reflexão	OSA	[112, 125]
FBG-SC-M ²				Monoponto	Reflexão	OSA	[116]
FBG ³	-		Não	Monoponto	Reflexão	OSA	[113–115]
				Multiponto	Reflexão	OFDR	[117, 118]
LPFG-M ⁴	Fe-C	λ_i	Sim	Monoponto	Transmissão	OSA	[120]
SMF-AM ⁵	-	PMC	Não	Multiponto	Reflexão	OTDR	[121]
MMF-SC-M ⁶	Fe-C	PA	Sim	Monoponto	Transmissão	MP	[4, 5, 122]
SMF-FCM ⁷	Al	R	Sim	Multiponto	Reflexão	OTDR	[10, 11]
SMS-M ⁸	Al	PA	Sim	Monoponto	Transmissão	MP	[123]
Perfil D-M ⁹	Fe-C	EP	Sim	Monoponto	Transmissão	ER Monitor	[124]

¹ FBG-M - Fibra de grade de Bragg com revestimento Metálico, ² FBG-SC-M - Fibra de grade de Bragg sem casca e com revestimento Metálico, ³ FBG - Fibra de grade de Bragg convencional,

⁴ LPFG-M - Fibra com grade de Período Longo com revestimento Metálico,

⁵ SMF-AM - Fibra monomodo com Anéis Metálicos, ⁶ MMF-SC-M - Fibra multimodo Sem Casca e com revestimento Metálico, ⁷ SMF-FCM - Fibra monomodo com Face Clivada Metalizada,

⁸ SMS-M - Fibra hétero-core com fibra multimodo com casca metálica, ⁹ Perfil D-M - Fibra com Perfil D Metalizado.

3 MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D

A construção do perfil D numa fibra óptica consiste na remoção total ou parcial de sua casca em determinada região. Desse processo, tem-se uma região plana na fibra óptica, permitindo que a onda evanescente seja propagada na interface núcleo/casca da fibra óptica, e interaja com o meio externo [24]. Portanto, este capítulo apresenta detalhes dos métodos de fabricação de perfil D em fibras ópticas encontrados na Literatura. A Seção 3.1 apresenta as técnicas de fabricação do perfil D por polimento. Já na Seção 3.2, têm-se os métodos de fabricação do perfil D baseados na corrosão da casca da fibra óptica. A Seção 3.3 apresenta a fabricação do perfil D por ablação da casca da fibra óptica, usando laser de alta potência. Por fim, a Seção 3.5 mostra o método proposto nesta Tese de Doutorado, que é um processo automatizado de fabricação de perfil D em fibras ópticas, que também usa técnicas de polimento.

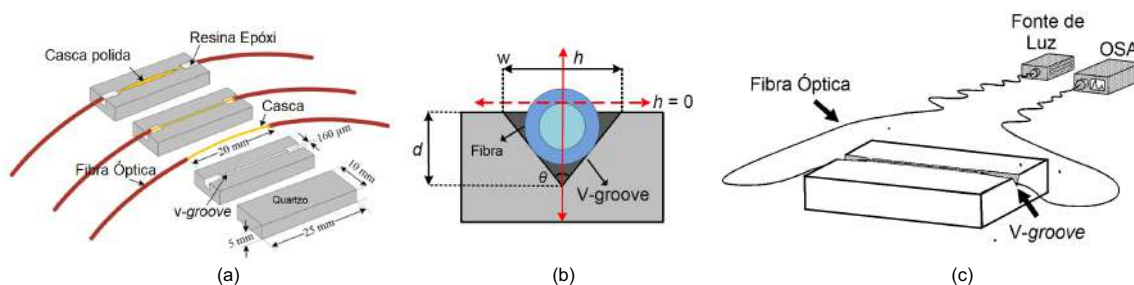
3.1 FABRICAÇÃO DE PERFIL D EM FIBRA ÓPTICA ATRAVÉS DE POLIMENTO

Um método de fabricação de perfil D em fibra óptica que é frequentemente obtido na literatura é o que faz uso de técnicas de polimento. Geralmente, se faz uso de um substrato para acomodar o trecho da fibra óptica a receber o polimento. O material desses substratos pode ser quartzo, silício ou BK-7. Um canal em forma de V (*v-groove*) é fabricado usando técnicas de litografia no substrato. As dimensões do *v-groove* são definidas com base na profundidade e comprimento que se deseja obter para o perfil D. A Figura 21(a) ilustra esse procedimento, destacado nos trabalhos de M. R. R. Khan *et al.* [126] e B. Guleryuz *et al.* [127]. A camada de acrilato¹ é removida da fibra óptica, para que o polimento ocorra diretamente na casca. Após o trecho de fibra óptica ser acomodado no *v-groove*, uma camada de resina epóxi é aplicada nas extremidades do substrato para fixação da fibra óptica. Em alguns trabalhos, a resina epóxi é aplicada ao longo de toda extensão do *v-groove*. Como pode ser observado na Figura 21(b), a região da fibra óptica que fica exposta, acima do substrato,

¹ Revestimento primário que protege a fibra óptica e proporciona maior flexibilidade em seu manuseio [128].

receberá o polimento. Ainda na Figura 21(b), a altura h define a profundidade do polimento e, conseqüentemente, o quão próximo ele ficará do núcleo da fibra óptica. O controle dessa altura h está relacionada com o ângulo θ de abertura do *v-groove* e sua profundidade d . O processo de polimento geralmente faz uso de discos abrasivos com partículas de diferentes tamanhos. Para gerar uma superfície polida com pouca rugosidade, cada etapa do processo de polimento é realizada com um disco com partícula de tamanho inferior à do anterior. Com isso, cada etapa do polimento reduz a rugosidade gerada pelo disco anterior. Geralmente, a fibra óptica tem uma de suas extremidades conectada a uma fonte de luz banda larga ou laser e a outra extremidade conectada a um medidor de potência óptica ou analisador de espectro óptico, como mostra a Figura 21(c). O objetivo é monitorar alterações no sinal óptico ao longo do processo de polimento ou após ele ser realizado, para caracterização das perdas geradas devido à construção do perfil D.

Figura 21: (a) Preparação de fibra óptica em substrato com *v-groove* para fabricação do perfil D. (b) Seção transversal da fibra óptica inserida no *v-groove*. (c) Arranjo experimental.



Fonte: adaptado de [80, 126, 127].

No trabalho proposto por B. Guleryuz *et al.* [127], o polimento é realizado em três etapas: 1) a resina epóxi, que é encontrada sobre o trecho de fibra óptica a ser polido, é removida usando um disco abrasivo com 2500#², rotacionando a 150 rpm; 2) um segundo disco abrasivo, com partícula de 3 μm de tamanho é aplicado, rotacionando a 350 rpm, por dois minutos; 3) é realizado um polimento final, com um disco abrasivo com partícula de 0,04 μm de tamanho, rotacionando a 530 rpm [127]. Um perfil D com 25 mm de comprimento é gerado numa fibra óptica multimodo de 50 μm de diâmetro do núcleo [127]. Diferentes profundidades do polimento foram obtidas, com objetivo de otimizar o perfil D gerado para a aplicação desejada [127]. Vários trabalhos são obtidos na literatura usando metodologia semelhante para fabricação de perfil D em fibras ópticas [72, 80, 124, 130, 131].

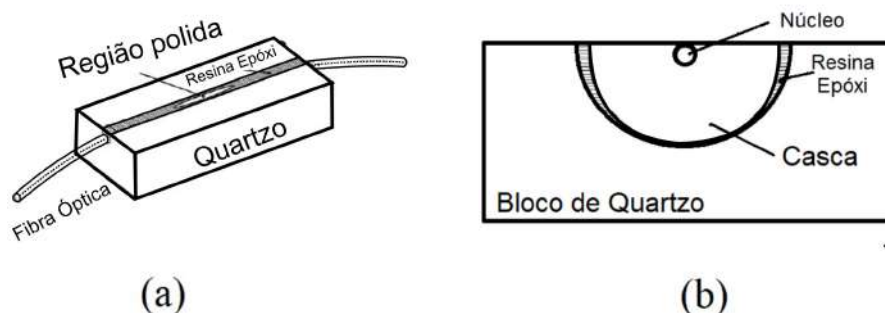
Em situações que se deseja construir um perfil D com poucos milímetros de compri-

²O símbolo # é usado para representar o número de referência da lixa abrasiva [129]

mento, é comum acomodar a fibra óptica num substrato com um *v-groove* ou *circular-groove*, que é construído sob curvatura. No trabalho proposto por A. Og. Dikovska *et al.* [132], uma fibra óptica monomodo é acomodada num *circular-groove*, fabricado em um substrato de quartzo com raio de curvatura de 125 mm. O resultado obtido é um perfil D com aproximadamente 1 mm de comprimento e 1 μm de distância para o núcleo da fibra óptica [132]. É comum, nesse tipo de processo de fabricação, a aplicação de resina epóxi em toda a região do *circular-groove*. A Figura 22 ilustra o substrato com *circular-groove* e o perfil D obtido em [132]. Um dos primeiros trabalhos que fez uso dessa técnica de curvatura em substrato foi proposto por H. Lehmann *et al.* [133], que obteve um perfil D com comprimento de 1,5 mm e 0,3 μm de distância para o núcleo de uma SMF (*Single-Mode Fiber*). É comum obter esse tipo de preparação de substrato para produção de perfil D em fibras ópticas em diversos trabalhos da literatura [61, 68, 134–136]. Além disso, é possível construir um perfil D em fibra de grade de Bragg (FBG - *Fiber Bragg Grating*) fazendo uso dessa técnica, como no trabalho proposto por K. Schroeder *et al.* [137], em que foi construído um perfil D com comprimento superior a 1,5 mm e aproximadamente 0,5 μm de distância para o núcleo de uma FBG. Fazendo uso de um *groove* com raio de curvatura relativamente grande, também é possível fabricar um perfil D com comprimento superior aos destacados anteriormente. Isso foi demonstrado no trabalho proposto por Y.-S. Sun *et al.* [44], que construíram um perfil D com comprimento entre 11 mm e 12,5 mm e distante do núcleo entre 5,25 μm e -2,25 μm (o sinal negativo representa o polimento do núcleo) numa fibra óptica multimodo, usando um *groove* com raio de curvatura de 580 mm.

J. Zhao *et al.* [138] fez uso da instrumentação mostrada na Figura 23(a) para pro-

Figura 22: (a) Preparação de fibra óptica em substrato com circular-groove para fabricação de perfil D com comprimento reduzido. (b) Seção transversal do perfil D no *circular-groove*.



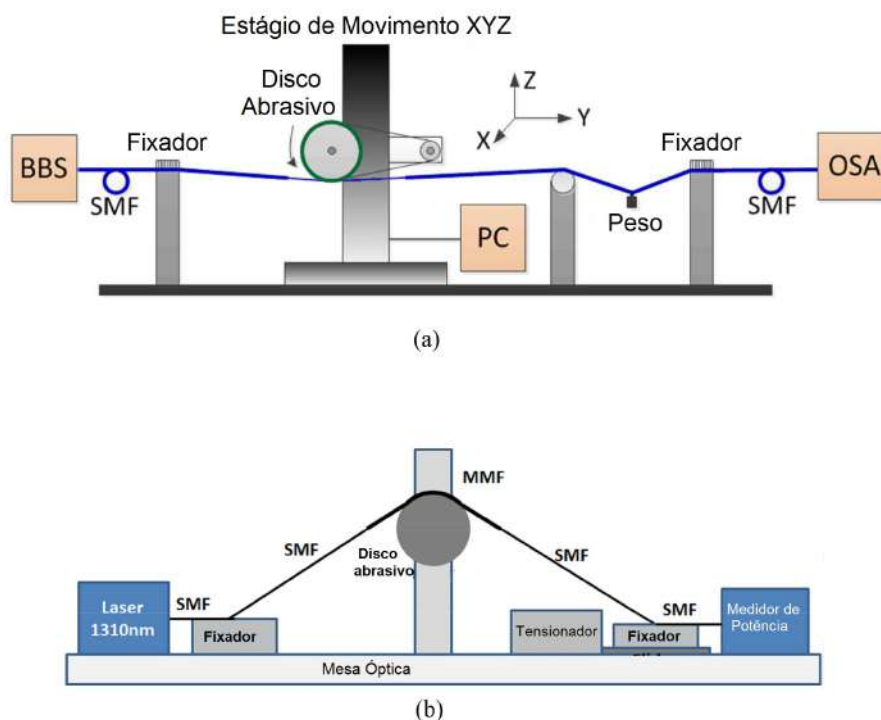
Fonte: adaptado de [132].

dução de um perfil D numa fibra óptica monomodo padrão (SMF). A superfície lateral de um disco em rotação foi usada no polimento. Lixas com granularidades de 800#, 1500# e 3000# são fixadas na superfície desse disco, com tamanho da partícula de $19\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$ e $5\ \mu\text{m}$, respectivamente [138]. O trecho da SMF polido tem a camada do acrilato removida. Os prolongamentos da SMF são fixados por mantedores de fibra, e um bloco de 20 g é usado para tensionar a fibra óptica. Uma fonte de luz banda larga (BBS - *Broad Band Source*) e um analisador de espectro óptico (OSA - *Optical Spectrum Analyser*) são usados para que a perda de potência óptica, devido o perfil D, seja monitorada ao longo do polimento [138]. O processo de polimento ocorre com o deslocamento do estágio de translação, controlado por computador, na direção Y, para controle do comprimento, e na direção Z, para controle da profundidade do perfil D [138]. Os resultados obtidos com o avanço do disco na direção Y são perfis D com comprimento de 4 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm. Diferentes distâncias entre o núcleo e o perfil D são obtidas com o avanço do disco na direção Z, desde $8\ \mu\text{m}$ até $-1\ \mu\text{m}$ (o valor negativo é para informar a redução de $1\ \mu\text{m}$ na espessura do núcleo) [138].

Uma configuração experimental semelhante à obtida em [138], é proposta por J. Tang *et al.* [42] e mostrada na Figura 23(b). Note que, nesse caso, há a substituição da fonte de luz banda larga (BBS) por um laser, que emite no comprimento de onda de $1310\ \text{nm}$, e a substituição do OSA por um medidor de potência. Em relação à estrutura mecânica, a fibra também é mantida tensionada sobre a superfície lateral do disco através do deslocamento de um dos mantedores de fibra que está conectado a um controlador de tensão. O comprimento do perfil D é determinado pelo diâmetro do disco, que não se desloca ao longo do processo de polimento, ao contrário do que é observado em [138]. O perfil D é criado num trecho de uma fibra multimodo (MMF - *Multi Mode Fiber*) com $105\ \mu\text{m}$ de diâmetro do núcleo, com comprimento de 20 mm e diferentes profundidades no intervalo $10\ \mu\text{m} - 70\ \mu\text{m}$ [42]. Configurações experimentais semelhantes são obtidas em [45, 64, 69, 106, 139, 140], com pequenas alterações como o tipo de fibra óptica a ser construído o perfil D, por exemplo, numa fibra de grade de Bragg [140]. Alternâncias entre a fonte de luz também são observadas, usando BBS ou laser, assim como a detecção do sinal óptico que pode ser por um OSA ou medidor de potência. Além disso, o comprimento e a profundidade do perfil D, que varia de acordo com a aplicação desejada. Os métodos de fabricação de fibras ópticas de perfil D que fazem uso das configurações experimentais da Figura 23, têm a característica de não usarem

substratos para acomodar o trecho da fibra óptica a ser polido. No entanto, a fabricação do perfil D deixa essas fibras mais frágeis, com pouca sustentação mecânica, podendo ocorrer a quebra delas apenas com o manuseio. Enquanto que o perfil D, fabricado numa fibra óptica fixada num substrato, deve apresentar maior resistência mecânica.

Figura 23: Configuração experimental para produção de perfil em fibras ópticas (a) obtida em Ref. [138]; (b) obtida em Ref. [42].



Fonte: adaptado de [42, 138].

Um tipo especial de fibra óptica também usada para construir um perfil D é a POF (*Polymer Optical Fiber*). Essa fibra óptica possui núcleo com diâmetro de $980\ \mu\text{m}$ e uma casca com apenas $10\ \mu\text{m}$ de espessura. Consequentemente, exibe mais facilidade para construir um perfil D próximo ou até atingir o núcleo desse tipo de fibra óptica. As técnicas de polimento e as configurações experimentais usadas para construir o perfil D nessas fibras ópticas são semelhantes as descritas anteriormente. F. De-Jun *et al.* [48] produziram um perfil D com 10 mm de comprimento numa POF, usando instrumentação semelhante à obtida em [138]. A profundidade do polimento foi avaliada em três níveis, $350\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$ e $1000\ \mu\text{m}$, em que neste último o trecho da POF é totalmente polido, causando a quebra da fibra óptica. Realizando 15 voltas completas numa POF, com raio de curvatura de 5 mm, M. Lomer *et al.* [46] produziu 15 perfis D numa mesma fibra óptica, com profundidade máxima do polimento de $400\ \mu\text{m}$. Uma perda total de 12 dB é introduzida, devido a combinação do

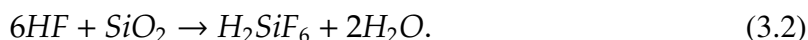
raio de curvatura e os sucessivos perfis D. Um segundo arranjo também foi construído por M. Lomer *et al.* [46], com 18 perfis D numa POF com 18 voltas completas sob um raio de curvatura de 8 mm. A perda total inserida na estrutura é de 4,1 dB. Fazendo uso de uma POF em um substrato, A. L. Khalaf *et al.* [107] produziu um perfil D com 20 mm de comprimento e profundidade de 400 μm . Outros trabalhos que fazem uso de POF com perfil D podem ser obtidos na literatura [13, 47, 50, 141, 142].

3.2 FABRICAÇÃO DE PERFIL D EM FIBRA ÓPTICA POR CORROSÃO

No trabalho proposto por Y. Wu *et al.* [143], é apresentada uma instrumentação para construção de perfil D em fibras ópticas monomodo e multimodo, através de um processo de corrosão da casca da fibra óptica, usando uma solução com ácido fluorídrico (HF). A Figura 24 ilustra o aparato experimental utilizado, composto por um laser de He-Ne, medidor de potência óptica, conectores de fibras óptica e um recipiente. O uso do laser de He-Ne, que emite comprimento de onda no espectro visível, permite estimar o comprimento efetivo do perfil D através da luz que escapa dele para o meio externo (vide *zoom* da Figura 24) [143]. O trecho de fibra óptica que terá a casca removida é acomodado em uma célula de silício, projetada para construção de um perfil D com 14 mm de comprimento, como pode ser observado no *zoom* da Figura 24. Os autores verificaram que o aumento na concentração de HF provoca alterações na taxa de corrosão da casca da fibra óptica. Esse estudo foi realizado com as seguintes reações:



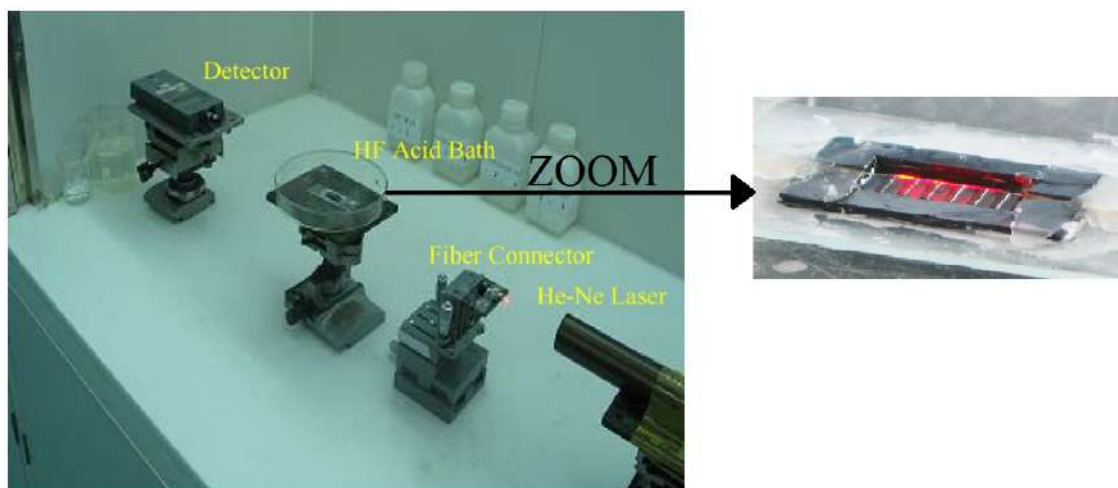
e



Além disso, análises da rugosidade do perfil D, gerada pelo processo de corrosão, apontaram que soluções de HF : H_2O na proporção (1 : 1) provocam alto nível de rugosidade de superfície [143]. Ou seja, o ácido ataca a casca da fibra óptica de forma mais agressiva. A solução que os autores obtiveram para construir um perfil D com baixo nível de rugosidade foi preparando o HF na solução *buffer* HF : CH_3COOH : H_2O na proporção (2 : 1 : 1) [143].

R. Gibson *et al.* [144] propôs a fabricação de um perfil D numa fibra óptica de núcleo elíptico usando um solução com 25% de HF. Numa solução *buffer* de 25% de HF, cerca

Figura 24: Configuração experimental para produção de perfil D em fibras ópticas por corrosão com HF.



Fonte: adaptado de [143].

de 30 min são necessários para se obter um perfil D próximo ao núcleo da fibra óptica [144]. Como a temperatura da solução influencia na taxa de corrosão, a medição da birrefringência entre as polarizações nos eixos lento e rápido é necessária para monitorar a distância do perfil D para o núcleo ao longo do processo de corrosão [144]. Um processo semelhante é proposto por T. L. Lowder *et al.* [94], que também é para construção de um perfil D numa fibra de núcleo elíptico. O perfil D gerado tem 1,5 cm de comprimento e está cerca de 0,4 μm acima do núcleo da fibra óptica. Metodologia semelhante também é obtida em [145].

Com o objetivo de produzir uma fibra óptica de perfil D com superfície suave, ou seja, com rugosidade desprezível, H. Esmailzadeh *et al.* [55] combinaram técnicas de polimento e corrosão com HF. Primeiro é realizado um polimento, usando técnicas semelhantes às destacadas na Seção 3.1. Em seguida, é aplicada uma solução *buffer* de HF sobre a superfície polida, para finalizar a construção do perfil D. O resultado obtido é uma fibra óptica com perfil D distante de 100 nm do núcleo de uma SMF, com nível de rugosidade de 1,9 nm, medido por AFM (*Atomic Force Microscopy*) [55].

O uso de uma solução de HF para fabricar o perfil D em fibra óptica apresenta vantagens como taxa de corrosão controlada e por gerar baixo nível de rugosidade de superfície no perfil D (da ordem de alguns nanômetros [55]). Enquanto que o uso de técnicas de polimento deve gerar níveis de rugosidade superiores. No entanto, a instrumentação necessária exige ambiente com capela e equipamento de proteção para proteger o experimentador do contato com a solução ácida.

3.3 FABRICAÇÃO DE PERFIL D EM FIBRA ÓPTICA POR ABLAÇÃO COM LASER DE ALTA POTÊNCIA

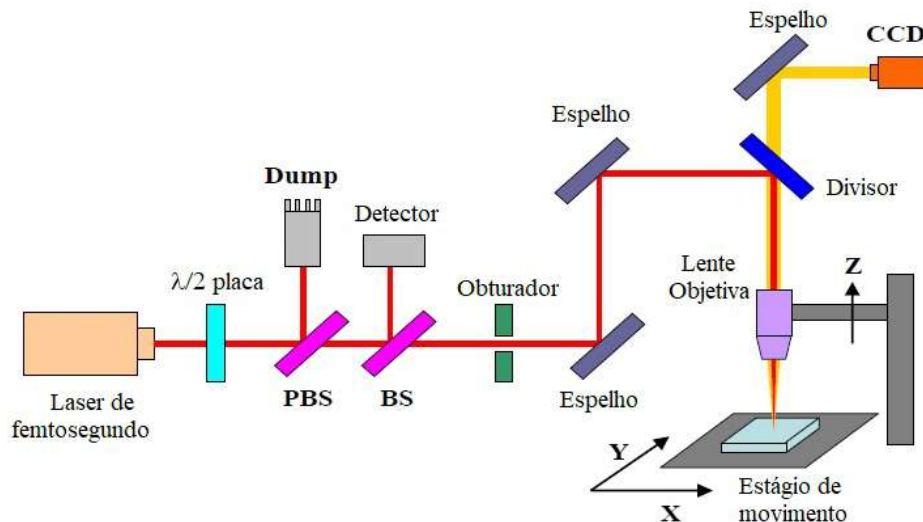
A Figura 25 ilustra detalhadamente uma configuração experimental para construção do perfil D em fibra óptica por ablação com laser de alta potência. Ela é composta por um laser de femtosegundos, que tem seu feixe de luz ajustado por uma placa de meia onda e um divisor de feixe polarizado (PBS - *Polarized Beam Splitter*). Em seguida, o feixe é separado por um divisor (BS - *Beam Splitter*), em que um feixe é direcionado para um medidor de potência, e o outro feixe para um obturador eletromecânico (*shutter*) [146]. O número de disparos a laser aplicados à amostra é controlado por um obturador eletromecânico. O feixe é guiado por um conjunto de espelhos e focalizado na fibra óptica por uma lente objetiva conectada a um estágio de movimento na direção Z [146]. O ajuste no tamanho do ponto de foto (*spot size*) é fundamental nesse tipo de aplicação, com influência até na rugosidade de superfície gerada pela ablação. A região da fibra óptica que terá o perfil D construído é fixada em um estágio de micro-posicionamento X-Y, controlado por computador. A varredura em X e Y permite a construção do perfil D com comprimento desejado. O processo de fabricação é monitorado *in situ* por um dispositivo de carga acoplada (CCD - *Charge-Coupled Device*) [146]. A configuração experimental da Figura 25 foi proposta por C.-H. Chen *et al.* [146], para construção de perfis D em cascata, com comprimento de 1 mm e espaçados de 1 mm, em uma fibra óptica multimodo. Foram obtidas amostras contendo de 3 a 7 perfis D [146].

Fazendo uso de um laser de femtosegundos, X. Lei *et al.* [103] construíram um perfil D com 0,1 mm de comprimento e com $8,5 \mu\text{m}$ de distância para o núcleo de uma SMF padrão. A configuração experimental fez uso de um laser de Ti:safira com pulsos de duração de 120 fs, centrado em um comprimento de onda de 800 nm, com taxa de repetição de 1 kHz e potência de 45 mW [103]. A amostra de fibra óptica, que teve o perfil D construído, foi acomodada em um estágio de translação X-Y-Z com resolução nanométrica, controlado por computador [103]. A remoção da casca da fibra óptica no sentido perpendicular ao eixo da SMF foi realizada com uma varredura no eixo Z, a uma velocidade de 0,06 mm/s. Já a remoção da casca no sentido paralelo ao eixo da fibra é feito com passos de $0,02 \mu\text{m}$ [103].

Com uma configuração experimental semelhante à obtida em [103], S. J. Beecher *et al.* [35] obteve um perfil D com comprimento de 6 mm e com $6 \mu\text{m}$ de distância para o núcleo de uma SMF padrão. Como diferencial, uma remessa com 30 fibras ópticas de perfil D são produzidas num mesmo processo de fabricação [35]. Configurações experimentais

semelhantes podem ser obtidas na literatura, para fabricação de perfil D em fibras ópticas monomodo, multimodo e FBG, usando lasers de alta potência [147–150]. A Figura 25 ilustra de forma genérica as configurações experimentais utilizadas em [35, 103, 147–150].

Figura 25: Configuração experimental para produção de perfil D em fibra óptica usando laser de alta potência.



Fonte: adaptado de [146].

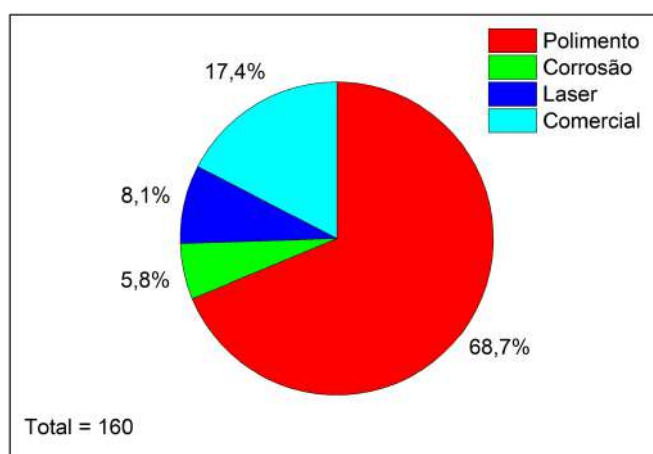
A construção do perfil D em fibra óptica por ablação usando laser de alta potência requer uma instrumentação mais complexa, quando comparada com técnicas de polimento ou corrosão. No entanto, essa técnica permite construir perfis D com comprimento inferior a 1 mm. Além disso, possibilita a construção de perfis D em cascata, com espaçamento de alguns milímetros [146]. No trabalho de C.-H Chen *et al.* [148], o nível de rugosidade, medido por AFM, é de 231,7 nm para o perfil D construído por ablação laser com *spot size* de 2,44 μm de raio. Já em [149], o nível de rugosidade não foi medido, mas é destacado que a ablação laser gera um perfil D com superfície rugosa.

3.4 ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DOS MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DO PERFIL D

Uma síntese dos métodos de obtenção de fibras ópticas com perfil D para aplicações em sensoriamento, com uma estimativa das proporções com que esses métodos podem ser obtidos na literatura, é exibida no gráfico da Figura 26. Esse gráfico foi construído a partir de um protocolo de revisão de literatura, realizado nas bases de dados *IEEE Xplore*, *Science Direct*, *Web of Science* e *Google Scholar*, buscando as palavras-chaves: *D-shaped*, *side-*

polished, D-type, optical fiber, fiber-optic. Foram selecionados apenas os trabalhos que citam como foi obtida a fibra óptica com perfil D. Como pode ser observado no gráfico da Figura 26, mais de 60% dos trabalhos obtêm esse tipo de fibra óptica a partir de um método de fabricação que faz uso de técnicas de polimento. Além disso, boa parte dos trabalhos (cerca de 17%) adquirem comercialmente esse tipo de fibra óptica, com fabricantes como a *Phoenix Photonics* e *KVH Industries* [40, 62, 76–79, 82, 104, 151–153].

Figura 26: Estimativa dos métodos de obtenção de fibras ópticas com perfil D observados nas aplicações obtidas na literatura.



Fonte: O Autor, 2020.

A Tabela 5 apresenta uma síntese dos parâmetros qualitativos que devem ser observados na fabricação do perfil D em fibra óptica. Eles foram definidos com base na análise da revisão de literatura. Sendo assim, para a análise qualitativa, são observados os seguintes parâmetros: CI, CPA, CR, RM, FC, Precisão, PEsc, TFO e AS. A Complexidade da Instrumentação (CI) está relacionada ao custo financeiro com os dispositivos, equipamentos e insumos que compõe o arranjo experimental: laser, OSA, medidor de potência óptica, estágio de translação controlado por computador, máquina de polimento, materiais abrasivos, como lixas, pastas e ácidos. Além de ambiente apropriado e equipamentos de proteção, por exemplo, para uso de ácido HF, se faz necessário uma capela. A Complexidade na Preparação das Amostras (CPA) diz respeito à manipulação da fibra óptica antes, durante e após a execução de cada método de fabricação. Isso inclui: construir um canal no substrato, para acomodar a fibra óptica; remover acrilato; realizar curvatura ou tensionar a fibra; manipular ácidos nocivos à saúde humana, requerendo equipamentos de proteção; uso de radiação de alta potência, que também pode ocasionar danos ao experimentador. O Controle da Rugosi-

dade (CR) está relacionado ao agente responsável por gerar diferentes níveis de rugosidade de superfície. A Resistência Mecânica (RM) define a possibilidade de manusear a amostra de fibra óptica com perfil D, sem que ocorra algum tipo de dano ou quebra. O parâmetro de Fabricação com Curvatura (FC) se refere à realização de uma curvatura na fibra óptica, no trecho em que será construído o perfil D. Isso pode influenciar no comprimento e na profundidade do perfil D, permitindo redução significativa no comprimento e espessura da casca residual. A Precisão descreve a capacidade que o método empregado possui de fornecer um perfil D com as dimensões no qual foi projetado. Esse parâmetro foi definido com base no erro fornecido por cada método, para o comprimento e a profundidade do perfil D. A Produção em Escala (PEsc), define a possibilidade de fabricar o perfil D em mais de uma amostra de fibra óptica, para cada execução do método de fabricação. Ou seja, se refere à produção de perfis D em paralelo.

Nesta síntese, a inclusão dos Tipos de Fibra Óptica (TFO) é para destacar a possibilidade de construir o perfil D em diferentes espécies de fibras ópticas. No item Aplicações Sensoras (AS), destaca-se a versatilidade da fibra óptica com perfil D para aplicações sensoras, em que: SIR - Sensor de Índice de Refração; ST - Sensor de Temperatura; SB - Sensor Bioquímico; SU - Sensor de Umidade; SCM - Sensor de Campo Magnético; SpH - Sensor de pH; SG - Sensor de Gases; SN - Sensor de Nível; SRUV - Sensor de Radiação UV; SE - Sensor de Estresse; SC - Sensor de Corrosão.

Em relação aos critérios de análise, foram escolhidos apenas dois níveis, alto e baixo, para serem atribuídos aos parâmetros qualitativos. Como CI e CPA são os parâmetros mais subjetivos, é importante destacar o porquê de cada critério. Uma CI baixa, atribuí-se quando observa-se uma instrumentação simplificada, basicamente composta por fonte de luz, detector e atuador, responsável pela fabricação do perfil D. Já uma CI alta, é definida quando a instrumentação requer equipamentos de alta precisão, como um estágio de translação e um OSA, e de alto custo financeiro. Além de requerer ambiente apropriado, como uma capela, para a manipulação de soluções ácidas. Uma CPA baixa é definida quando observa-se um tratamento simplificado para a amostra de fibra óptica. Basicamente, se resume em posicionar o trecho da fibra a ser polida no alvo do atuador, como no polimento sem substrato, que a fibra é tensionada e colocada em contato com a superfície lateral de um disco abrasivo. Além disso, a execução do método de fabricação não apresenta risco eminente ao experimentador, requerendo equipamentos de proteção. Uma CPA alta é definida pela dificuldade

Tabela 5: Parâmetros qualitativos para comparação dos métodos de fabricação de perfil D em fibra óptica

Parâmetros	Métodos de Fabricação			
	Polimento		Corrosão	Ablação
	Em Substrato	Sem Substrato		
CI ¹	Baixa	Alta	Alta	Alta
CPA ²	Alta	Baixa	Alta	Alta
CR ³	No grão da superfície abrasiva		Na solução ácida	No <i>spot size</i> do feixe
RM ⁴	Alta	Baixa	Alta (com substrato)	Baixa
FC ⁵	Sim	Sim	Não	Não
Precisão	Alta	Baixa	Alta	Alta
PEsc ⁶	Sim	Não	Sim	Sim
TFO ⁷	SMF, MMF, POF, FBG	SMF, MMF, FBG	SMF, MMF	SMF, MMF, FBG
AS ⁸	SIR, ST, SB, SU, SCM, SpH, SG, SN, SRUV, SE, SC			

¹ CI - Complexidade da Instrumentação, ² CPA - Complexidade na Preparação das Amostras,

³ CR - Controle da Rugosidade, ⁴ RM - Resistência Mecânica, ⁵ FC - Fabricação com Curvatura,

⁶ PEsc - Produção em Escala, ⁷ TFO - Tipo de Fibra Óptica, ⁸ AS - Aplicação Sensora.

na preparação das amostras, que requer técnicas e equipamentos de alta precisão, seja para construir um canal num substrato, para mover a fibra óptica sobre o alvo do atuador, ou pela manipulação de substâncias perigosas, como os ácidos.

Avaliando os parâmetros destacados para cada método de fabricação, pode-se notar que a construção do perfil D usando as técnicas de polimento com substrato é vantajosa. Isso porque requer instrumentação de baixa complexidade, apresenta alta resistência mecânica e o controle da rugosidade depende apenas do tipo de superfície abrasiva usada no polimento. A etapa mais complexa desse método está na preparação do trecho de fibra óptica a receber o polimento, pois ele é acomodado em um substrato com *v-groove*, em que suas dimensões determinam o comprimento e a profundidade do perfil D gerado. Normalmente, técnicas de litografia são usadas para fabricar o *v-groove*, concentrando a complexidade do método de fabricação nesta etapa. Em relação às técnicas de corrosão ou ablação, com base nos parâmetros qualitativos, o destaque está apenas na alta precisão que esses métodos exibem. Isso porque observa-se erros no comprimento e na profundidade do perfil D da ordem de 10^{-2} μm . No entanto, quando observados os parâmetros qualitativos, esses métodos apresentam outras vantagens que justificam seu emprego. Isso é obtido na Tabela 6.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros quantitativos que são imprescindíveis à fabricação do perfil D. Para o comprimento L_D do perfil D, a faixa de valores destacada representa os comprimentos que são atingidos usando cada um dos métodos de fabricação. Além disso, vale ressaltar que, para cada técnica usada, o controle desse parâmetro está em um componente diferente: para polimento com substrato sem curvatura, o controle está do comprimento do *v-groove*; para polimento com substrato com curvatura, o controle está no raio de curvatura; para polimento sem substrato, o controle está no estágio de translação, na direção paralela ao núcleo da fibra óptica, ou no diâmetro do disco abrasivo; para corrosão, o controle está no trecho da fibra óptica que fica exposto ao ácido; para ablação, o controle também está no estágio de translação, na direção paralela ao núcleo fibra óptica.

Tabela 6: Parâmetros quantitativos para comparação dos métodos de fabricação de perfil D em fibra óptica

Métodos de Fabricação			Parâmetros			
			L_D (mm)	d_{min} (μm)	NR (nm)	TF (min)
Polimento	Com Substrato	Com Curvatura	1 à 12,5	-2,25 à 0,3	-	-
		Sem Curvatura	12 à 25	-1,5 à 1	0,8 à 172	-
	Sem Substrato		4 à 45	-1 à 0,1	200 à 1000	60
Corrosão			14 à 20	4,03	1,9	30
Ablação			0,1 à 10	-6,25 à 6	231,7	-

Analisando as faixas de valores para cada técnica, deve-se notar que, para aplicações que requerem um perfil D com comprimento L_D muito pequeno, a partir de 1 mm, pode ser empregada a técnica de polimento em substrato com curvatura. Para um valor inferior, apenas por ablação é obtido um comprimento a partir de 0,1 mm. Sendo assim, um método pode ser melhor do que o outro, dependendo do comprimento L_D , que se pretende obter. Para fabricação de perfil D extenso, a técnica em que foi obtido o maior valor para L_D é através de polimento sem substrato, que foi atingido o valor de 45 mm. No entanto, é importante destacar que pode ser possível atingir valores iguais ou superiores usando as demais técnicas, basta observar o componente de controle para cada técnica. Exceto a técnica de polimento em substrato com curvatura, que para atingir comprimentos superiores, a curvatura do substrato deve ser grande o suficiente para se comportar como um substrato sem curvatura. Além dessa técnica ser mais específica para valores pequenos de L_D .

Na literatura, alguns trabalhos destacam a profundidade do polimento, e, outros,

a espessura da casca residual, de modo que não há um consenso. Para a profundidade do perfil D, nesta Tese de Doutorado, é feita a conversão para casca residual. Isso porque esse parâmetro está, diretamente associado, à distância que a região plana do perfil D está do núcleo. Sendo esse, um parâmetro imprescindível às aplicações sensoras, visto que ele regula a intensidade da interação da onda evanescente com o meio externo. Na Tabela 6, são apresentadas as faixas para os menores valores que foram obtidos para esse parâmetro, o que justifica a nomenclatura d_{min} . Os valores negativos para d_{min} são para destacar que o perfil D atingiu o núcleo. Por exemplo, para polimento sem substrato, o valor de $-1 \mu\text{m}$ representa a redução de $1 \mu\text{m}$ na espessura do núcleo da fibra óptica. É importante destacar que os valores obtidos para a espessura da casca residual depende do tipo de fibra óptica. Na Tabela 6, os valores de $-6,25 \mu\text{m}$ e $-2,25 \mu\text{m}$ foram observados para fibras multimodo (MMF). Valores superiores, em módulo, são obtidos para as POFs, que tem núcleo com $980 \mu\text{m}$ de diâmetro. Por exemplo, em [107], o diâmetro do núcleo foi reduzido em $-380 \mu\text{m}$.

Analisando as faixas de valores para d_{min} , observa-se que, praticamente, para cada método de fabricação, é possível obter valores na mesma ordem de grandeza. Exceto para corrosão, que não foi possível obter uma faixa de valores, pois a maioria dos trabalhos analisados não forneceu uma medição para a casca residual. Nesse sentido, a escolha do método de fabricação fica a critério do parâmetro qualitativo relacionado à precisão. Pois a depender da aplicação sensora, a imprecisão na espessura da casca residual pode alterar abruptamente a resposta do sensor, como, por exemplo, em aplicações sensoras baseadas no efeito de Resonância de Plasmons de Superfície.

O Nível de Rugosidade (NR), destacado na Tabela 6, é outro parâmetro que deve ser observado na construção do perfil D, pois efeitos de espalhamento de luz e alta perda de potência óptica podem estar relacionados ao controle desse parâmetro. O NR se refere à média RMS (*Root-Mean-Square*) dos valores de pico da superfície rugosa, medidos a partir de uma linha de referência [154]. Nesse caso, a instrumentação necessária para que o NR seja mensurado requer o uso de microscopia óptica, força atômica, eletrônica ou perfilometria, a depender do NR analisado [155]. Com isso, se justifica a ausência dessas medições na maioria dos trabalhos analisados, limitando a construção da Tabela 6. Analisando os valores de NR, deve-se notar que apenas as técnicas baseadas em polimento exploram diferentes nível de rugosidade. Isso deve ser atribuído à facilidade de gerar diferentes níveis de rugosidade, substituindo apenas o tipo de superfície abrasiva, como observado na Tabela 5, em

que o controle da rugosidade está no grão da superfície abrasiva. Enquanto que as técnicas baseadas em corrosão e ablação requerem ajuste na concentração do ácido e no *spot size* do laser, respectivamente. É importante destacar que os menores valores para NR foram obtidos através de polimento e por corrosão. Enquanto que, no único trabalho que foi mensurado o NR, gerado pela ablação a laser, o valor obtido está na faixa de valores que podem ser atingidos usando técnicas de polimento. Ainda em relação ao NR, é importante associá-lo o parâmetro qualitativo CR. Pois um alto CR deve influenciar na obtenção de níveis de rugosidade que se deseja, que deve depender de cada aplicação. Enquanto que, um baixo controle da rugosidade, pode refletir na obtenção de um perfil D com níveis de rugosidade que podem comprometer a operação do sensor. Nesse aspecto, pode-se classificar as técnicas de polimento como as que apresentam um maior controle para a rugosidade. Já a técnica de corrosão, que tem o CR na solução ácida, apresenta um controle que pode ser classificado como médio, sobre tudo pela falta de estudos relacionados. Para técnica de ablação, que tem o CR indicado pelo *spot size* do laser, não foi encontrado nenhum estudo à cerca da rugosidade gerada para diferentes valores do *spot size*. Com isso, não se pode atribuir um critério para essa técnica, e, conseqüentemente, como ela pode influenciar no NR.

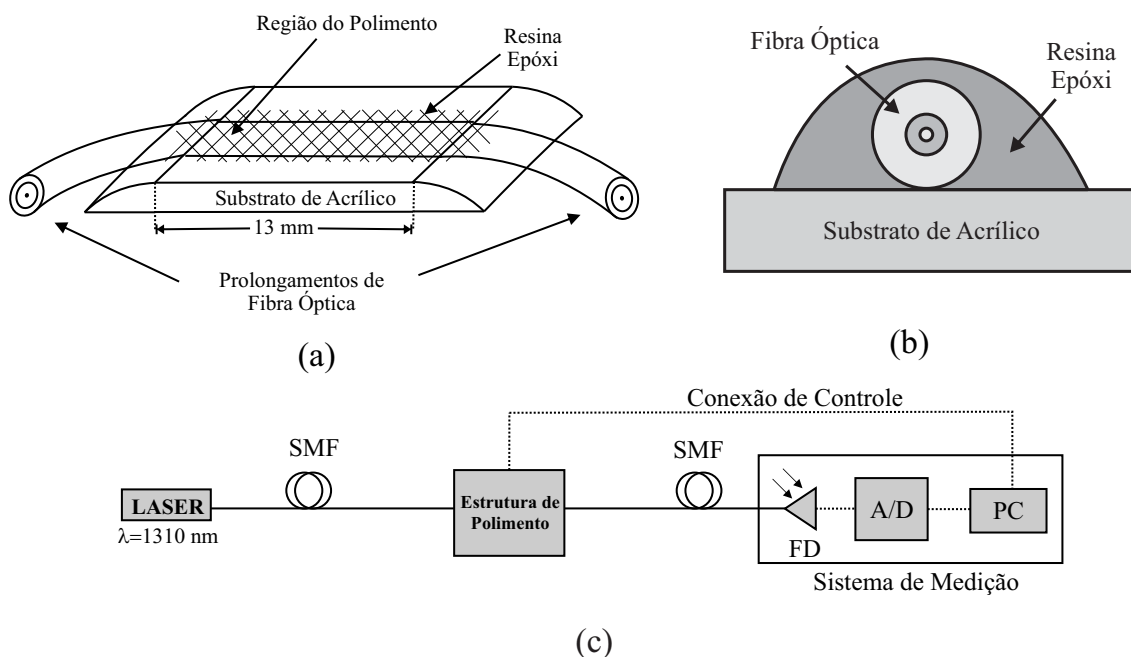
Um parâmetro que é pouco destacado nos trabalhos da literatura é o tempo de fabricação (TF) que cada método empregado requer para obtenção do perfil D. Na Tabela 6, os valores de 30 e 60 minutos são medidos a partir do momento que a técnica é colocada em prática: para corrosão, o tempo de atuação do ácido; para polimento, o tempo que a superfície abrasiva atua sobre a fibra óptica. Nota-se que a técnica de corrosão permite obter um perfil D mais rapidamente, quando comparada com a técnica de polimento. É possível que a ablação a laser seja a técnica mais rápida, mas nenhum trabalho que fez uso dessa técnica destacou o intervalo de tempo usado.

Por fim, pelas análises qualitativas e quantitativas, o método de fabricação de perfil D em fibra óptica por polimento é melhor do que os demais tipos de fabricação em diversos parâmetros. Isso justifica o resultado mostrado na Seção 3.6, em que mais de 50% dos trabalhos analisados fazem uso desse método para fabricar o perfil D nos mais variados tipos de fibras ópticas. Nesse sentido, na Seção 3.5, é apresentado o método de fabricação de perfil D proposto nesta Tese de Doutorado. Ele também é baseado em técnicas de polimento em fibra óptica sobre substrato. No entanto, como observado, numa tentativa de reduzir a complexidade na preparação das amostras, o uso do *v-groove* é descartado.

3.5 MÉTODO PROPOSTO

A fabricação de perfil D em fibra óptica por meio de polimento requer a preparação do trecho de fibra que será polido. Nesse caso, é feito o uso de um substrato de acrílico e resina epóxi, para acomodar e fixar, respectivamente, o trecho de fibra óptica a ser polido, como ilustrado na Figura 27(a). A região plana do substrato tem seu tamanho definido de acordo com o comprimento do perfil D, que deseja fabricar, pois o trecho de fibra fixado sobre essa região receberá o polimento. Neste trabalho, o comprimento usado é de 13 mm, devido a disponibilidade desses substratos em laboratório (no Laboratório de Sensores e Instrumentação do Grupo de Fotônica da UFPE). Além disso, diferente de outros trabalhos que fazem uso de polimento, a camada de acrilato não é removida do trecho de fibra óptica que será polido, pois isso traz fragilidade para o manuseio da fibra óptica. A Figura 27(b) ilustra um esquema da seção transversal da fibra óptica fixada no substrato, onde pode-se observar a ausência de um *v-groove* no substrato, para acomodação da fibra, e a forma com que a resina epóxi é aplicada, para fixação da fibra óptica no substrato.

Figura 27: (a) Arranjo para fixar o trecho de fibra óptica a ser polido. (b) Esquema da seção transversal da fibra óptica fixada no substrato. (c) Esquema completo do aparato experimental.

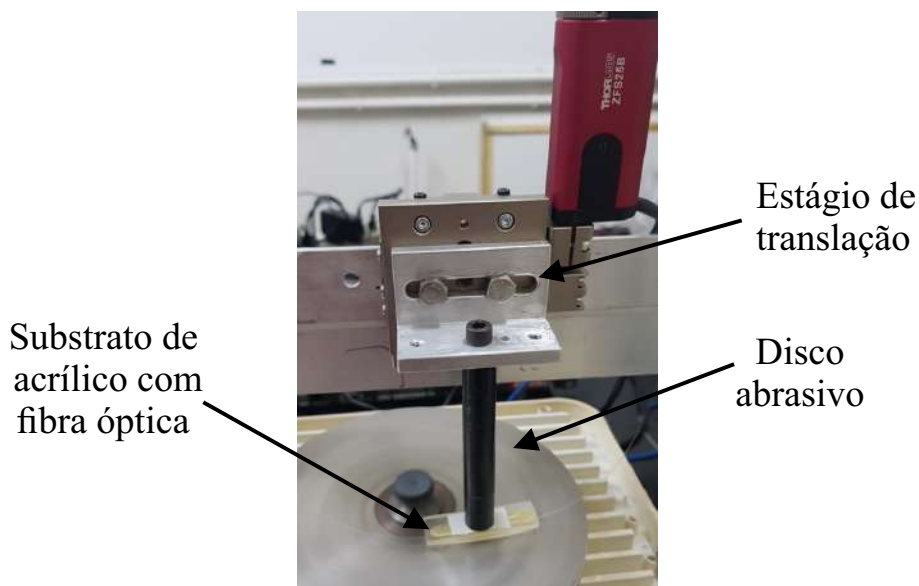


Fonte: O Autor, 2020.

A Figura 27(c) ilustra o aparato experimental empregado, constituído por um laser que emite no comprimento de onda de 1310 nm e um sistema de medição de potência óptica. Esse sistema de medição é composto por um fotodetector de GaAs (FD), acoplado a um

conversor analógico/digital (A/D), que é conectado a um computador (PC). A interface entre o sistema de medição e o computador é feita através de um Arduino Uno. Esse sistema de medição permite registrar os valores de potência óptica transmitida na fibra ao longo do processo de polimento. À medida que a casca vai sendo removida, parte da luz, que propaga na interface núcleo/casca da fibra óptica, escapa para o meio externo, provocando alterações no valor da potência óptica, que é detectada pelo sistema de medição. Ainda na Figura 27(c), a estrutura de polimento é composta por uma máquina da Hi-Tech Diamond, com suporte para diferentes discos abrasivos, funcionando a 800 rpm, e um suporte mecânico para um estágio de translação Thorlabs. O processo de polimento é automatizado por etapas, ou seja, uma vez definido o disco abrasivo que se deseja utilizar e o nível de perda da potência óptica, o polimento é iniciado. A leitura da potência óptica é uma variável de controle para a atuação do estágio de translação. Com isso, realizando passos de $0,5 \mu\text{m}/\text{min}$, o estágio de translação estabelece o contato e o avanço, da região lateral da fibra óptica a ser polida, em direção à superfície do disco abrasivo, permitindo que o polimento seja realizado de forma lenta e controlada. Com o término do processo de polimento, é realizada a limpeza da região polida com álcool isopropílico, para eliminar os resíduos do polimento, pois eles podem contribuir para o espalhamento de luz na superfície polida, gerando perdas de potência óptica.

Figura 28: Estrutura de polimento do aparato experimental.



Fonte: O Autor, 2020.

A Figura 28 mostra a estrutura de polimento do aparato experimental, com destaque para o disco abrasivo, o estágio de translação e o substrato de acrílico com a fibra óptica a ser

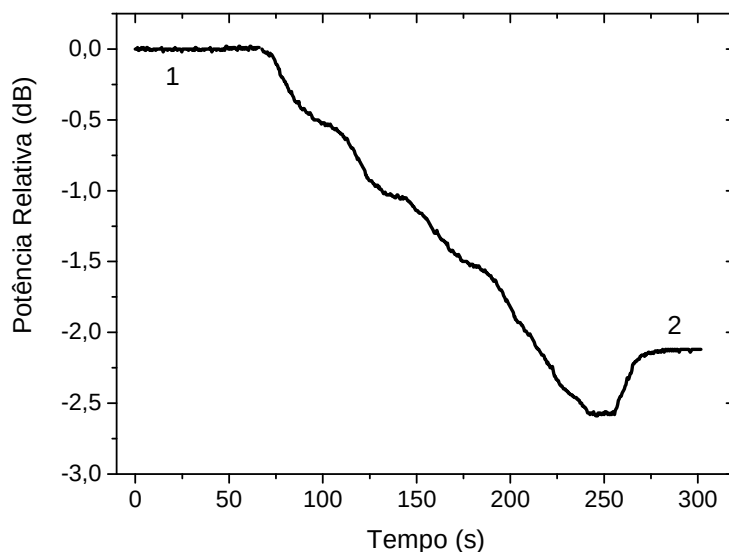
polida. Como pode ser observado na Figura 28, a região de contato do disco abrasivo com a fibra óptica é localizada próxima ao eixo de rotação do disco, para redução dos efeitos de oscilação do disco em rotação. No Apêndice ??, são obtidos detalhes do sistema de medição de potência óptica montado em Laboratório, da interface com o computador e do programa de controle do polimento.

3.6 RESULTADOS

O processo de fabricação de perfil D em fibra óptica monomodo, proposto nesta Tese, é automatizado por etapas do polimento, quando se considera o uso de mais de um disco abrasivo. No entanto, para a fabricação do perfil D usando um único disco abrasivo, o processo de fabricação é totalmente automatizado. Além disso, o sistema de aquisição de dados registra valores de potência óptica em função do tempo, de modo que se pode analisar graficamente o perfil de variação da potência óptica ao longo do tempo de polimento.

O gráfico da Figura 29 mostra a potência relativa ao longo do processo de polimento, para o intervalo de tempo final, em que variações na potência óptica são detectadas. A potência relativa é medida em relação à potência óptica na ausência do polimento. De modo que ela também representa a perda de sinal óptico devido o polimento. A opção por esboçar apenas o intervalo de tempo final do polimento, com duração de aproximadamente 5 min, é devido ao sistema de aquisição de dados registrar, por aproximadamente 1 h, uma potência óptica constante. O platô 1, destacado no gráfico, ilustra esse comportamento da potência óptica em um trecho desse intervalo de tempo. Isso é dado pelo fato da maior parte do tempo o sistema de polimento estar atuando na remoção de aproximadamente 250 μm de resina epóxi (usada para fixar a fibra óptica na base de acrílico), 62,5 μm de acrilato e alguns micrômetros de espessura da casca. Com isso, devido aos efeitos de escala, o trecho mais importante do polimento ficaria visivelmente sem detalhes. No gráfico da Figura 29, deve-se notar uma variação total de aproximadamente 2,5 dB na potência relativa. No programa de controle do polimento, foi definida uma variação total de 2 dB na potência óptica transmitida. Com isso, quando essa variação é detectada, o estágio de translação retorna à sua posição inicial, separando a fibra óptica da superfície abrasiva do disco. No entanto, o intervalo de tempo entre a detecção desta variação de 2 dB e o comando para o estágio de translação retirar a fibra óptica de contato com o disco é suficiente para ocorrer uma variação de aproximadamente 0,5 dB, devido ao disco abrasivo ainda atuar sobre a fibra óptica.

Figura 29: Potência relativa em função do tempo.



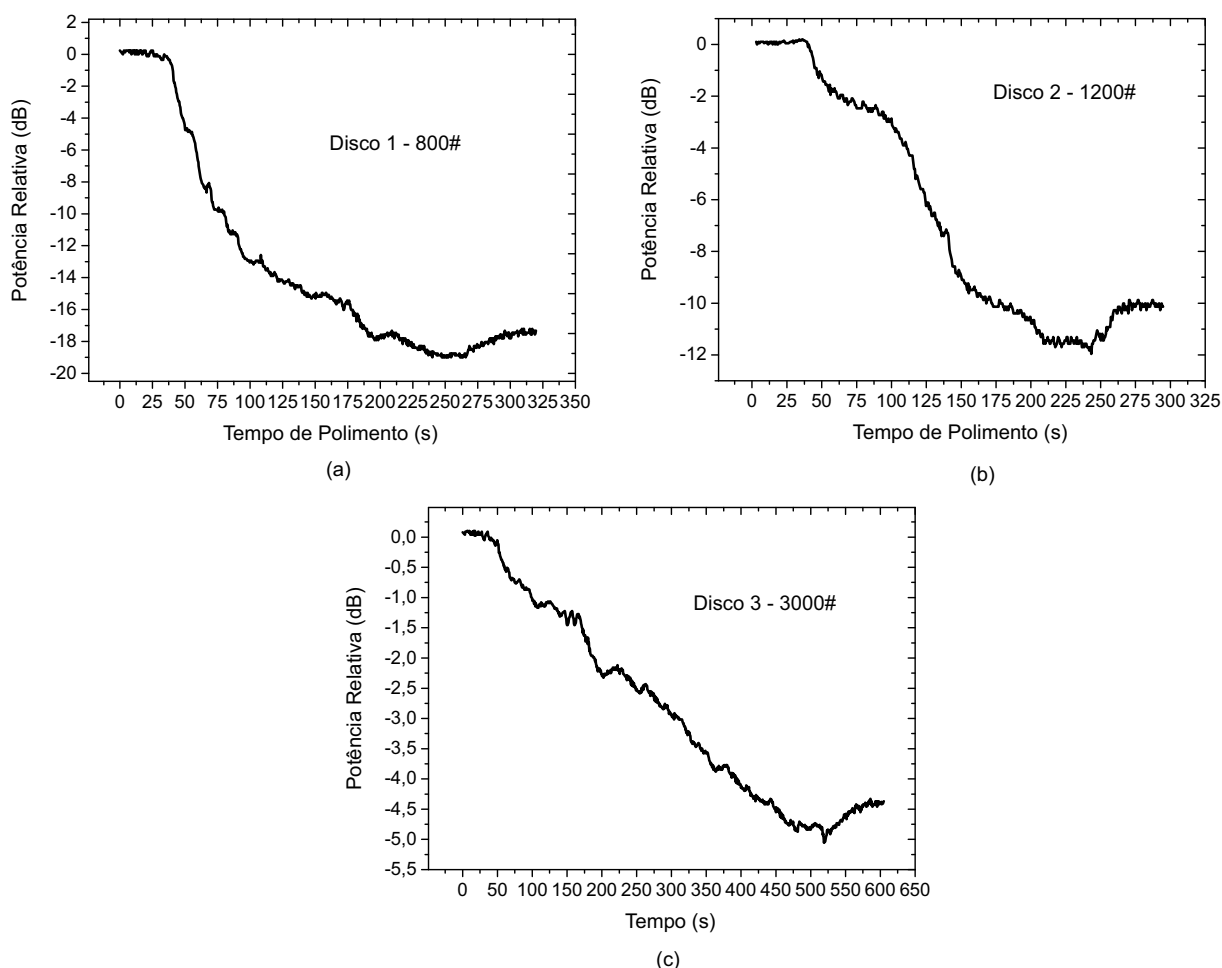
Fonte: O Autor, 2020.

Ainda no gráfico da Figura 29, a modulação na curva da potência relativa deve estar relacionada com efeitos de contato da fibra óptica com o disco abrasivo. Já o platô 2, é resultante do processo de retirada da face polida da fibra óptica de contato com o disco abrasivo. Nesse processo, é observado um ganho de aproximadamente 0,5 dB na potência óptica, que deve estar associado à mudança do índice de refração do meio em contato com o perfil D, que antes era o do disco abrasivo e passa a ser o do ar. Além disso, esse ganho de 0,5 dB pode estar associado à remoção da pressão que é exercida na fibra pelo disco ao longo do processo de polimento. A amostra obtida de fibra óptica com perfil D exibe uma perda por inserção de 2,12 dB com o perfil D exposto ao ar. Ela foi fabricada usando um disco 3, que tem superfície abrasiva com número de referência 3000#.

Explorando o processo automatizado de fabricação de perfil D em fibra óptica, foram construídos perfis D em quatro amostras de fibra óptica monomodo. Cada uma dessas amostras, rotuladas de D1-D4, foi construída com um disco abrasivo diferente: D1 com o disco 1 de 800#, D2 com o disco 2 de 1200#, D3 com o disco 3 de 3000# e D4 com uma sequência de polimentos, fazendo uso dos discos 1 ao 3, e finalizada com uma pasta abrasiva de 100.000# aplicada sobre o disco 4. Essas amostras são empregadas no estudo da influência da rugosidade de superfície na resposta de um sensor de índice de refração, mostrado no Capítulo 4. A Figura 30 apresenta o perfil de variação da potência relativa, no intervalo de

tempo final do polimento, para as amostras D1-D3. De modo geral, essas três curvas apresentam um comportamento semelhante ao discutido anteriormente para a curva da Figura 29, em que tem-se um platô inicial, seguido da perda na potência óptica, e, com a retirada da fibra de contato com o disco, tem-se um pequeno ganho na potência óptica.

Figura 30: Potência relativa em função do tempo para a (a) amostra D1; (b) amostra D2; amostra D3.



Fonte: O Autor, 2020.

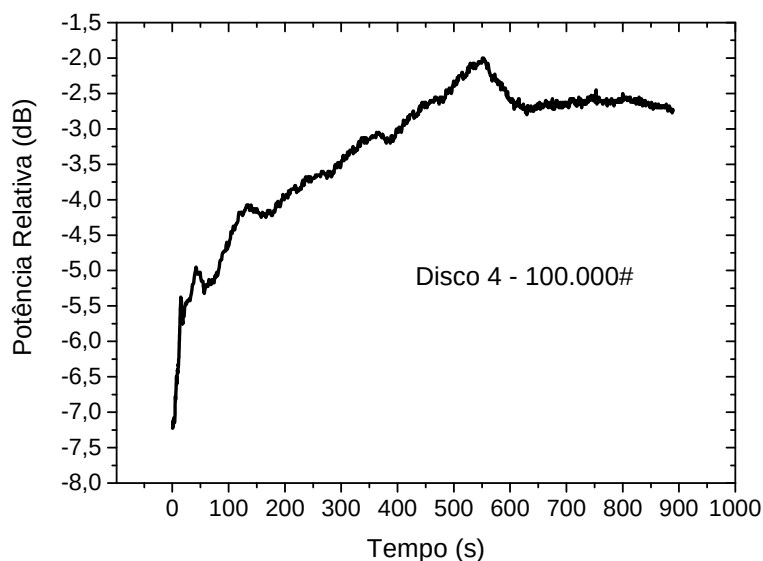
As curvas das Figuras 30(a) e 30(b) mostram a variação de potência óptica durante a fabricação das amostras D1 e D2, respectivamente. Além disso, para a curva da Figura 30(a), tem-se, inicialmente, uma queda mais acentuada na potência óptica, quando comparada com as demais curvas. Esse comportamento deve ser resultado do uso do disco 1, que tem grão de 800#, e é o mais abrasivo do conjunto de discos. De modo que deve polir mais rapidamente a casca da fibra óptica e gerar mais rugosidade de superfície, visto que esse grão tem tamanho de partícula de $25 \mu\text{m}$. Com isso, observa-se uma perda de transmissão do sinal óptico de aproximadamente 18 dB para a amostra D1 com o perfil D exposto no ar. No gráfico da Figura 30(b), para a amostra D2, observa-se uma perda por inserção de aproximadamente

10 dB com o perfil D exposto no ar. Para atingir essa perda, foi necessário basicamente o mesmo intervalo de tempo da amostra D1, de aproximadamente 200 s. No entanto, por ser um disco menos abrasivo, em que o grão tem tamanho de partícula de $15\ \mu\text{m}$, a perda observada é inferior. Por fim, como pode ser observado no gráfico da Figura 30(c), para a amostra D3, a variação da potência óptica ao longo do polimento exibe um comportamento aproximadamente linear. A perda de transmissão com o perfil D no ar, para a amostra D3, é de aproximadamente 4,5 dB. Além disso, o tempo necessário para se atingir essa perda é cerca de 500 s. Ou seja, fazendo uso do disco 3, que tem grão com tamanho de partícula de $7\ \mu\text{m}$, o polimento dá-se lentamente.

A amostra D4 é fabricada em quatro etapas de polimento. As etapas 1, 2 e 3 do polimento ocorreram da seguinte maneira: 1) uma hora de polimento com o disco 1, sem alterações na potência óptica; 2) polimento com o disco 2 até ser detectada uma perda de 3 dB na potência óptica transmitida; 3) polimento com o disco 3 até ser atingida uma perda de mais 5 dB. Com essa sequência de polimentos, a amostra de fibra óptica exibe uma perda por inserção de aproximadamente 8 dB, como o perfil D exposto no ar. Na última etapa, foi usado o disco 4, que permite aplicação de uma pasta abrasiva com grão de 100.000#, que tem tamanho de partícula de $0,25\ \mu\text{m}$. O gráfico da Figura 31 foi obtido na etapa final da sequência de polimento usada para construir o perfil D da amostra D4. Diferente do que foi observado com os demais discos abrasivos, o uso do disco 4 resultou no ganho de sinal óptico, pois ao longo do tempo de polimento a potência relativa aumentou em aproximadamente 5 dB. Ao encostar no disco 4, observa-se uma variação abrupta na potência óptica de aproximadamente 2 dB, esse efeito pode ser resultante da interação da luz que escapa pelo perfil D com a pasta abrasiva e também pela pressão que o disco realiza sobre a fibra. Após isso, observa-se que a potência óptica aumenta lentamente ao longo do polimento. Com a quebra do contato da superfície polida com o disco 4, observa-se uma perda de aproximadamente 1 dB na potência óptica. Esse efeito é contrário ao observado nas amostras D1-D3, em que a separação da superfície polida da fibra óptica do disco abrasivo resulta em um pequeno ganho no sinal óptico. O objetivo da fabricação da amostra D4 foi obter uma fibra óptica com um perfil D, que possua baixo nível de rugosidade de superfície. Para isso, levou-se em consideração que uma sucessão de polimentos com discos abrasivos, que têm tamanhos de partícula inferior ao seu antecessor, para reduzir o nível anterior de rugosidade.

Para demonstrar a reprodutibilidade do processo de fabricação de perfil D proposto

Figura 31: Potência relativa em função do tempo para a amostra D4.



Fonte: O Autor, 2020.

nesta Tese, 10 amostras foram fabricadas em série, projetadas para exibir uma perda de transmissão de 1 dB, com o perfil D exposto no ar. Para construir o perfil D dessas amostras, foi usada a combinação do disco 3, com grão de 3000# e do disco 4, com a pasta abrasiva com grão de 100.000#. Na Tabela 7, são mostrados os valores da perda de transmissão medida para cada amostra fabricada. Como pode ser observado, o valor mais próximo e o mais discrepante, da perda de transmissão estabelecida, são 1,02 dB e 1,20 dB, respectivamente. Com isso, a possibilidade de se determinar um valor para a perda de transmissão com o perfil D exposto no ar, e, com a construção do perfil D numa fibra óptica, esse valor ser reproduzido com boa aproximação, fica demonstrado a reprodutibilidade do processo de fabricação. Além disso, permite estender o uso desse tipo de fibra óptica para além da construção de sensores, podendo ser empregada também como um dispositivo atenuador de sinal óptico. Por exemplo, a introdução de uma fibra óptica com perfil D que exibe perda de 2 dB, em série em um enlace, deve provocar uma atenuação de 2 dB na potência óptica transmitida por esse enlace, devido a luz que deve escapar para meio externo através do perfil D.

Através de uma análise estatística dos valores de potência óptica registrados pelo sistema de aquisição de dados, pode-se obter a resolução da medição de potência óptica pelo sistema de detecção. Para uma amostragem com 100 pontos da potência relativa, calculou-

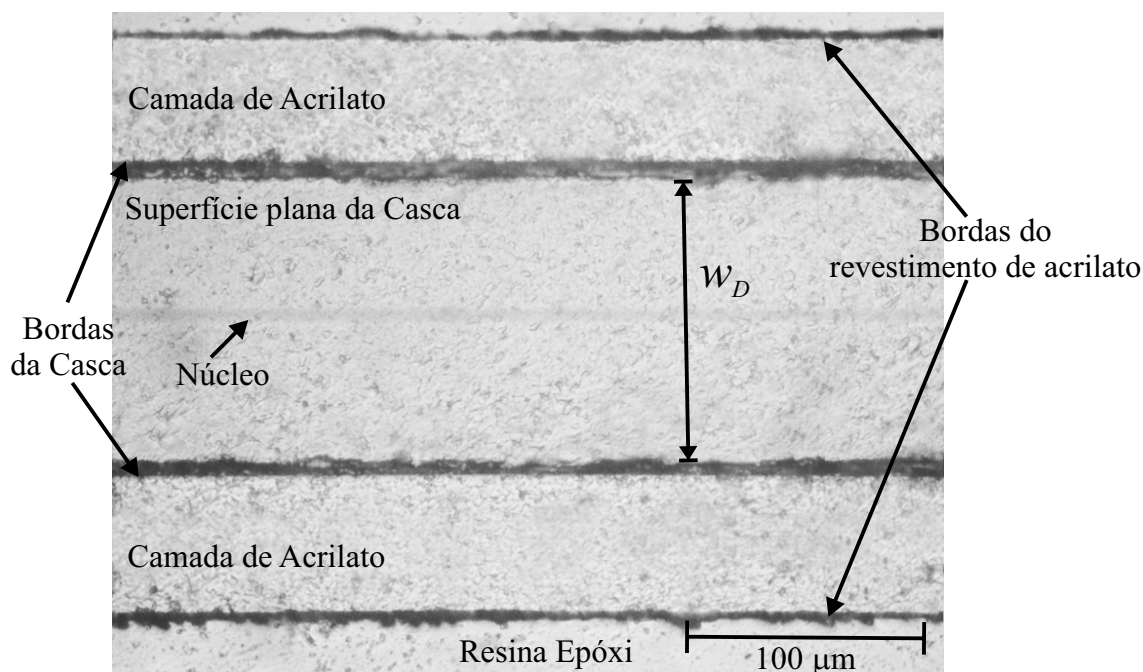
Tabela 7: Perda de transmissão para as amostras F1 à F10.

	Amostras									
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Perda (dB)	1,07	1,20	1,16	1,03	1,05	1,20	1,08	1,10	1,02	1,11

se a média e o desvio padrão associado a cada valor de potência óptica. O desvio padrão é a resolução da medida de potência óptica devido a flutuações no sistema de detecção, flutuações de potência do laser, ou outras flutuações e limitações do sistema. Com isso, obteve-se uma resolução de aproximadamente 0,01 dB para o sistema de detecção.

A Figura 32 mostra uma imagem de microscopia óptica da seção polida da amostra D4, de fibra óptica com perfil D, fabricada pelo método proposto nesta Tese de Doutorado. Essa figura trata-se de uma imagem real de um trecho da face superior do arranjo ilustrado na Figura 27, para a fibra óptica polida sobre o substrato de acrílico. Como pode ser observado, é possível identificar as fronteiras de cada meio material que foi afetado pelo polimento: a resina epóxi, a camada do acrilato e a casca da fibra óptica, com destaque para a superfície plana e suas bordas. Além disso, observa-se uma sombra na região central que indica o núcleo.

Figura 32: Imagem de microscopia óptica da seção polida da amostra D4 de fibra óptica com perfil D.



Fonte: O Autor, 2020.

Relacionando a largura média da região plana do perfil D, w_D , com o diâmetro do núcleo, D_{core} , e o diâmetro da casca, D_{clad} , a espessura, d , da casca residual que separa o

núcleo do meio externo, é dada por

$$d = \frac{1}{2} \left(\sqrt{D_{clad}^2 - w_D^2} - D_{core} \right), \quad (3.3)$$

em que essa expressão foi deduzida a partir de elementos de geometria analítica, onde a dedução é mostrado no Apêndice ??.

As amostras de fibra óptica com perfil D são fibras monomodo, com $D_{core}=8 \mu\text{m}$ e $D_{clad}=125 \mu\text{m}$. Para a espessura média da região plana do perfil D, foi obtido $w_D=123,9 \mu\text{m}$, com base na escala da Figura 32, pelo *software* Gwyddion, que é baseado no método de Mapeamento Estatístico Paramétrico (MEP) [155]. Substituindo esses valores na expressão (3.3), obtém-se $d=4,3 \mu\text{m}$.

Por fim, os resultados das medições da potência óptica transmitida permitem obter a perda por inserção das amostras. Já os resultados das medições geométricas, fornecem os valores do comprimento da superfície plana e a espessura da casca residual. Com isso, a junção das medidas ópticas e geométricas fornece uma caracterização básica para as amostras de fibra óptica com perfil D produzidas pelo método de fabricação proposto nesta Tese de Doutorado.

4 SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO À FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D

Este Capítulo apresenta uma série de explorações com as amostras de fibra óptica com perfil D, produzidas pelo método de fabricação proposto nesta Tese de Doutorado, empregadas na construção de um sensor de índice de refração. A Seção 4.1 apresenta detalhes da montagem experimental usada para o sistema de detecção de índice de refração. Na Seção 4.2, tem-se a modelagem computacional de um sensor de índice de refração à fibra óptica com perfil D, em que o perfil D é modelado por uma região plana e laminar, sem rugosidade de superfície. A Seção 4.3 apresenta o primeiro conjunto de resultados para a caracterização do sensor de índice de refração construído com as amostras de fibra óptica com perfil D produzidas em laboratório. Além disso, também é feito um comparativo do sensor construído com uma fibra óptica com perfil D obtida comercialmente. A Seção 4.4 apresenta um estudo acerca da influência da rugosidade de superfície, presente no perfil D, na resposta do sensor de índice de refração. Por fim, a Seção 4.5 apresenta o segundo conjunto de resultados, com a obtenção de um sensor de índice de refração de alto desempenho para uma faixa de detecção que é explorada nas aplicações bioquímicas.

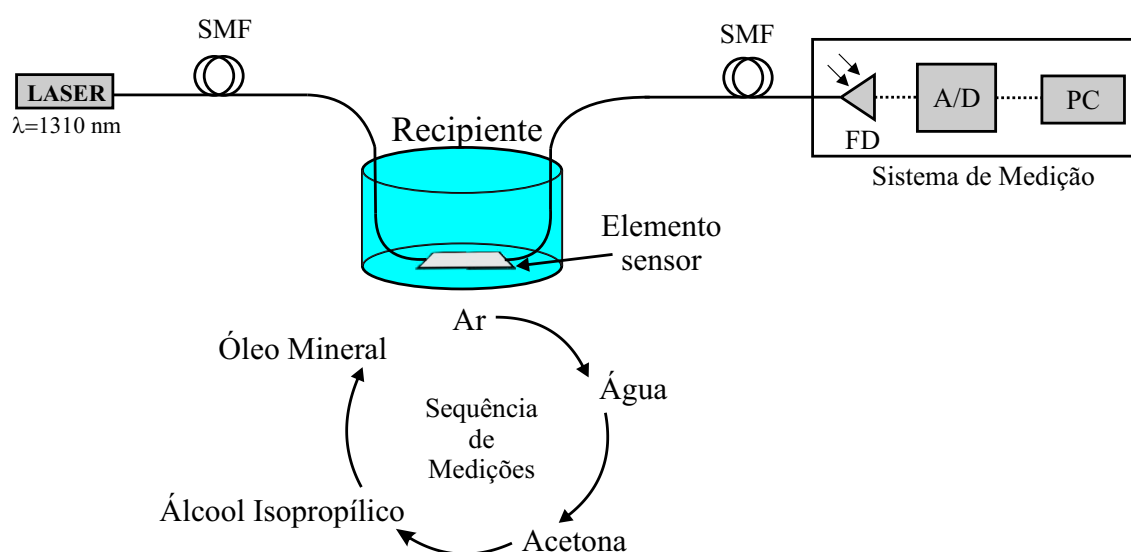
4.1 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

O aparato experimental usado para o sistema de detecção de índice de refração é mostrado na Figura 33. Ele consiste de um laser que emite no comprimento de onda de 1310 nm, que está conectado a um link de fibra óptica monomodo que contém o elemento sensor (fibra com perfil D). A intensidade do sinal óptico transmitido é mensurada pelo sistema de medição, que é composto por um fotodetector (FD) acoplado a um circuito elétrico de conversor analógico digital (A/D), que é conectado a um computador (PC), para análise e processamento dos dados. Essa configuração experimental é semelhante à apresentada na Seção 3.5 do Capítulo 3, para o monitoramento da potência óptica transmitida ao longo do processo de fabricação do perfil D nas amostras de fibra óptica.

A detecção do índice de refração é realizada com o elemento sensor inserido em

diferentes meios líquidos, que possuem valores distintos para seu índice de refração para o comprimento de onda de 1310 nm. A sequência de medições é mostrada na Figura 33, em que inicialmente é registrado o valor da potência óptica transmitida com o elemento sensor exposto no ar, que é uma medida de referência. Com isso, são registrados os valores para a potência óptica transmitida com o elemento sensor submerso nos seguintes meios líquidos: água destilada, com índice de refração de 1,32 UIR (Unidade de Índice de Refração); acetona, com índice de refração de 1,35 UIR; álcool isopropílico, com índice de refração de 1,37 UIR; óleo mineral isolante tipo A (usado em transformadores de potência), com índice de refração de 1,45 UIR medido em laboratório.

Figura 33: Aparato experimental do sensor de índice de refração.



Fonte: O Autor, 2020.

Com o aparato experimental da Figura 33, foram construídos dois sensores de índice de refração. O sensor 1 foi construído com uma amostra da fibra óptica com perfil D produzida pelo método proposto nesta Tese de Doutorado. Tal amostra possui um perfil D que tem região plana com 13 mm de comprimento e casca residual com aproximadamente $4\text{ }\mu\text{m}$ de espessura. Sua superfície foi polida com um disco abrasivo de grão com tamanho de $0,25\text{ }\mu\text{m}$, que gera um baixo nível de rugosidade de superfície. O sensor 2 foi construído com uma fibra óptica com perfil D obtida comercialmente, fornecida pela *Phoenix Photonics*. Essa fibra possui um perfil D que tem região plana com 17 mm de comprimento e casca residual com espessura entre $1\text{-}2\text{ }\mu\text{m}$. De acordo com o fabricante, a superfície do perfil D tem rugosidade desprezível. O objetivo é comparar o desempenho, para a detecção de índice de refração, da fibra óptica com perfil D construído em laboratório com o da fibra de perfil

D obtida comercialmente.

A sensibilidade às mudanças de índice de refração do meio externo, detectadas pelo sensor, é dada por

$$S = \frac{\Delta P_{op}}{\Delta n_{ext}}, \quad (4.1)$$

em que S é obtida a partir da razão entre uma variação ΔP_{op} , na potência óptica, devido uma variação Δn_{ext} , no índice de refração do meio externo.

4.2 MODELO COMPUTACIONAL SEM RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE

A modelagem computacional para um sensor de índice de refração à fibra óptica com perfil D foi implementada no COMSOL *Multiphysics*, que é um *software* baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). O módulo *Wave Optics*, que permite resolver problemas de propagação de ondas eletromagnéticas com frequências ópticas em guias de onda, é usado como base para a modelagem. A geometria 2D do modelo computacional é mostrada na Figura 34, que representa a seção transversal de uma fibra óptica com perfil D. Os parâmetros ópticos n_{core} , n_{clad} e n_{ext} , que correspondem ao índice de refração do núcleo, da casca e do meio externo, respectivamente, estão destacados e são usados para definir os materiais que compõem o modelo (fibra óptica + meio externo). A espessura da casca residual, d , também está destacada na Figura 34.

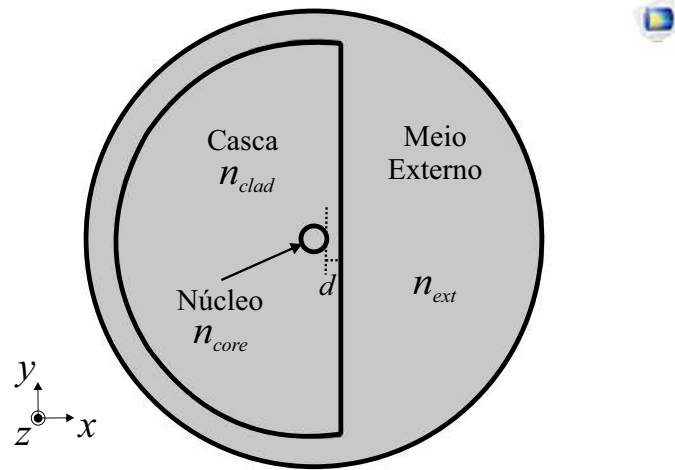
O modelo da Figura 34 representa uma abordagem simplificada para a modelagem de um sensor de índice de refração baseado em fibra óptica com perfil D. Isso porque, como não é incluída a presença da rugosidade de superfície sobre o perfil D, um estudo baseado na análise dos modos de propagação, que são guiados no núcleo da estrutura da Figura 34 e podem interagir com o meio externo, é suficiente para a modelagem desse sensor. Com isso, no COMSOL, é selecionado o estudo de análise modal (*Mode Analysis Study*) para resolver o problema da interação da onda evanescente com o meio externo. Nesse estudo, o COMSOL resolve o modelo ao obter o índice de refração efetivo do modo de propagação, que é análogo à obtenção da constante de propagação.

A medida da intensidade do sinal óptico transmitido, na direção do eixo z da geometria da Figura 34, é obtida a partir da expressão (4.2), que representa a transmitância T , que é uma quantidade normalizada [156].

$$T = \exp \left[-\frac{4\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{eff}) L_D \right], \quad (4.2)$$

em que λ é o comprimento de onda do sinal óptico, $\text{Im}(n_{eff})$ é a parte imaginária do índice de refração efetivo do modo de propagação e L_D é o comprimento da região plana do perfil D da fibra óptica [156]. É importante destacar que o índice de refração efetivo é da forma $n_{eff} = n_{eff}(\lambda, n_{core}, n_{clad}, n_{ext}, d)$, ou seja, depende do comprimento de onda, dos índices de refração do núcleo e casca da fibra óptica e do meio externo, além da espessura da casca residual. Com isso, observa-se que o índice de refração do meio externo tem influência sobre o modo de propagação obtido nas soluções do COMSOL. Tal conclusão também foi obtida na Seção 2.1 do Capítulo 2.

Figura 34: Seção transversal da fibra óptica com perfil D modelada no COMSOL *Multiphysics*.



Fonte: O Autor, 2020.

A geometria da Figura 34 foi discretizada com uma malha triangular com tamanho de elemento finito dado por $\lambda/12$. Para a fibra óptica monomodo da *Corning*® do tipo SMF-28, os índices de refração do núcleo e da casca, para o comprimento de onda $\lambda = 1310$ nm, são $n_{core} = 1,4504$ UIR e $n_{clad} = 1,4447$ UIR, respectivamente. Para o índice de refração do meio externo, foi realizada uma varredura no intervalo $n_{ext} = 1 - 1,45$ UIR. Para os parâmetros geométricos que definem o perfil D, tem-se: $d = 1,5 \mu\text{m}$ e $L_D = 17$ mm, em que esse valor para o parâmetro d está de acordo com o exibido por fibra de perfil D comercial, que possui casca residual com espessura entre 1 e 2 μm , e também está coerente com os valores mostrados na Tabela 9, que são obtidos nas amostras de fibra de perfil D produzidas

em laboratório.

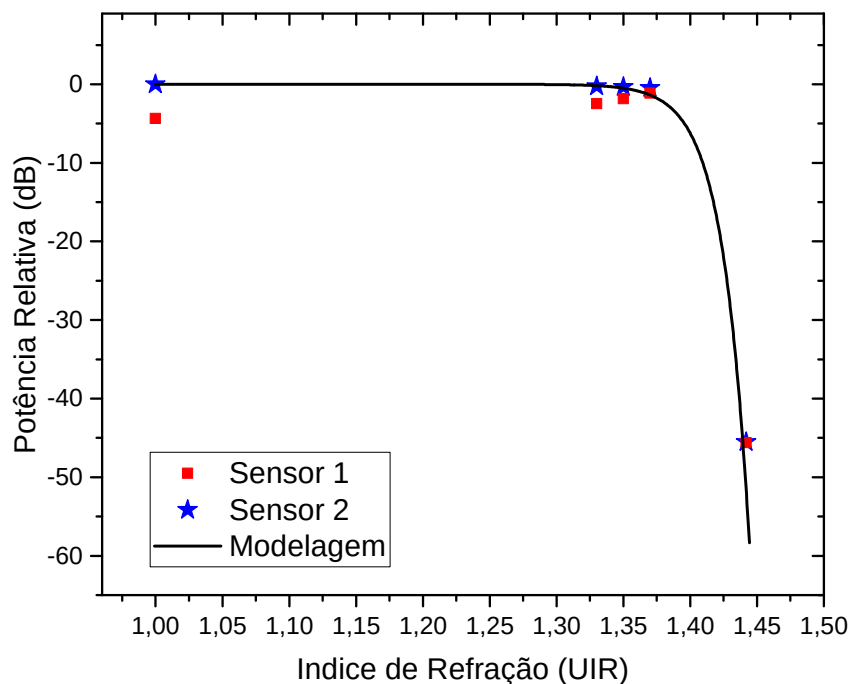
4.3 RESULTADOS PARA O SENSOR À FIBRA DE PERFIL D

Os resultados obtidos experimentalmente e pela simulação computacional do sensor de índice de refração estão reunidos no gráfico da Figura 35, que mostra a variação da potência óptica relativa transmitida, medida em dB, de acordo com as mudanças no índice de refração do meio externo. Essa medida relativa é obtida usando como referência a potência óptica transmitida através de uma fibra óptica sem perfil D. No gráfico da Figura 35, os pontos representam as medidas experimentais, obtidas para os sensores de índice de refração que fazem uso da fibra com perfil D construído em laboratório (Sensor 1) e obtida comercialmente (Sensor 2). Como pode ser observado no gráfico da Figura 35, os sensores 1 e 2 apresentam respostas semelhantes às mudanças de índice de refração do meio externo. No entanto, para o Sensor 1, observa-se uma diferença de 4,4 dB abaixo do valor medido para o Sensor 2, com os elementos sensores expostos ao ar. Pode-se notar também que essa diferença diminui com o aumento do índice de refração e, além disso, para a medida realizada com o perfil D imerso no óleo mineral, os dois sensores apresentam o mesmo nível de potência óptica, que é o limiar do sistema de detecção. Considera-se que esta diferença de 4,4 dB pode estar associada à rugosidade gerada pelo processo de polimento usado na fabricação do perfil D. Tal rugosidade pode gerar perdas por espalhamento quando a luz incide na superfície polida, fazendo que uma maior fração da luz escape para o meio externo.

Ainda sobre os resultados experimentais do gráfico da Figura 35, por se tratar de uma medida relativa para a potência transmitida, essa medida também representa a perda por inserção, que é adicionada ao link óptico, devido à presença da fibra óptica com perfil D (elemento sensor). Para o Sensor 2, observa-se que a perda por inserção com o perfil D exposto ao ar é desprezível. Esse é um resultado esperado, visto que nas especificações da fibra com perfil D obtida comercialmente o fabricante informa uma perda por inserção inferior a 0,5 dB, com o perfil D exposto no ar. Além disso, o Sensor 2 não detecta as variações do índice de refração do meio externo na faixa de 1-1,37 UIR, o que confirma as especificações da fibra óptica com perfil D produzida pela *Phoenix Photonics*, que é projetada para detecção de índices de refração em torno de 1,4 UIR.

Em relação aos resultados obtidos pela simulação computacional implementada no COMSOL *Multiphysics*, se percebe que a curva da modelagem (curva preta) ajusta os pon-

Figura 35: Potência transmitida relativa em função do índice de refração do meio externo. Resultados experimentais (pontos) e computacionais (linha).



Fonte: O Autor, 2020.

tos obtidos usando a fibra da *Phoenix Photonics* (Sensor 2). Esse resultado indica que essa fibra possui um perfil D com superfície lisa, visto que o modelo do COMSOL é construído atribuindo-se uma superfície laminar e plana para o perfil D. Além disso, a medida da potência relativa, obtida na simulação através da transmitância, para um índice de refração de 1,45 UIR (óleo mineral), é de aproximadamente -60 dB. Com isso, observa-se uma diferença de 10 dB em relação as medidas experimentais, que pode estar relacionada às limitações do sistema de detecção. Por fim, o comportamento para a curva da potência relativa, obtida com o modelo computacional através de uma varredura no valor do índice de refração do meio externo com passos de 0,001 UIR, está de acordo com o observado na literatura [36], que destaca uma queda aproximadamente abrupta na potência transmitida para um índice e refração próximo ao do núcleo da fibra óptica.

Na Tabela 8, tem-se a sensibilidade, medida em dB/UIR, obtida para três faixas de detecção de índice de refração. A faixa 1 é de 1-1,33 UIR, que o meio externo varia do ar para a água destilada, com sensibilidade S_1 . A faixa 2 é de 1,33-1,37 UIR, que o meio externo varia da água destilada para o álcool isopropílico, com sensibilidade S_2 . A faixa 3 é

de 1,37-1,45 UIR, que o meio externo varia do álcool isopropílico para o óleo mineral, com sensibilidade S_3 . Com base nos valores da sensibilidade exibida por cada sensor, nota-se que o Sensor 1 apresenta melhor desempenho para as faixas 1 e 2 de detecção de índice de refração. Em relação à faixa 3, os sensores 1 e 2 exibem, basicamente, a mesma sensibilidade, com uma diferença de apenas 1,3%. Tratando-se de fibras ópticas com perfil D, a sensibilidade exibida pelos sensores 1 e 2 na faixa 3 é um comportamento típico desse tipo de elemento sensor. Isso porque, quando o índice de refração do meio externo se aproxima do índice de refração da fibra óptica, uma grande fração da luz guiada escapa para o meio externo [36].

Tabela 8: Sensibilidade dos sensores construídos e modelado.

Sensibilidade	Elemento Sensor		
	Sensor 1 - Laboratório	Sensor 2 - Comercial	Modelagem - COMSOL
S_1 (dB/UIR)	5,7	0,7	0,7
S_2 (dB/UIR)	34	5,2	1,7
S_3 (dB/UIR)	-556,2	-563,5	-726,5

Por fim, a sensibilidade para as faixas 1 e 2, exibida pelo Sensor 1, pode estar relacionada à influência da rugosidade de superfície, como destacado anteriormente. Para verificar essa hipótese, na Seção 4.4 é apresentada uma série de experimentos e análises que caracterizam a influência da rugosidade na resposta do sensor de índice de refração proposto nesta Tese de Doutorado.

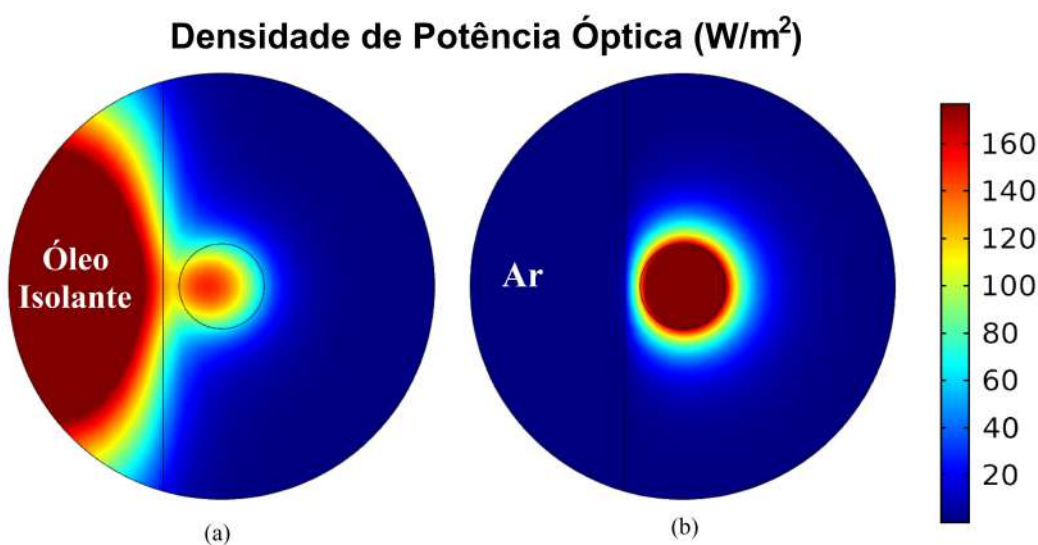
4.3.1 Explorações da Modelagem Computacional

Com base na modelagem computacional descrita na Seção 4.2, esta seção apresenta algumas explorações que auxiliam na compreensão dos elementos sensores baseados em fibra óptica com perfil D sem a presença da rugosidade de superfície. Inicialmente, é apresentado o comportamento da distribuição de potência óptica na fibra óptica com o perfil D inserido em meios que causam ou não alta perda de sinal óptico. Na sequência, foram realizadas algumas explorações da influência dos parâmetros geométricos que definem o perfil D, comprimento da região plana L_D e espessura da casca residual d , na resposta do sensor de índice de refração.

A Figura 36 mostra o resultado para a distribuição de potência óptica na fibra com

perfil D modelada no COMSOL *Multiphysics*. Como pode ser observado na Figura 36(a), a maior parte da luz escapa para o meio externo quando o perfil D está inserido no óleo isolante. Isso porque o meio tem um índice de refração próximo ao do índice de refração do núcleo da fibra óptica. Como resultado, tem-se a perda de cerca de 60 dB visualizada na curva em preto do gráfico da Figura 35. Já para a Figura 36(b), pode-se observar que praticamente nenhuma luz escapa através do perfil D quando o meio externo é o ar. Isso porque a alta diferença entre os índices de refração e a ausência de rugosidade sobre o perfil D fazem com que praticamente toda a luz continue confinada no núcleo.

Figura 36: Distribuição de potência óptica na seção transversal para o perfil D inserido no (a) óleo isolante (b) ar.

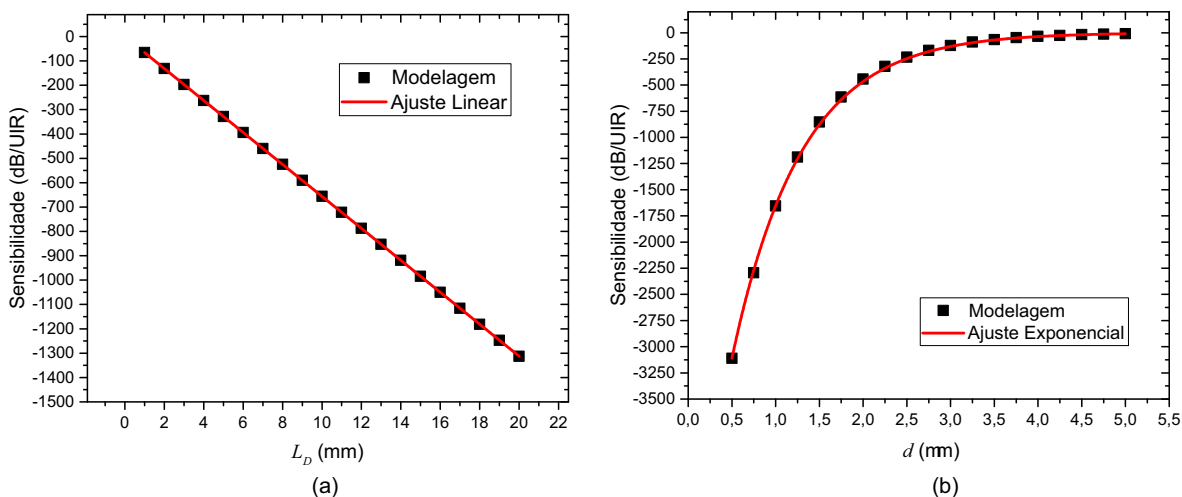


Fonte: O Autor, 2020.

A influência do comprimento da região plana do perfil D, L_D , na sensibilidade, medida em torno do valor de 1,45 UIR para o índice de refração do meio externo, com a espessura da casca residual fixada em $d = 1,5 \mu\text{m}$, é mostrada na Figura 37(a). O valor de 1,45 UIR foi escolhido por ser o ponto em que as fibras ópticas com perfil D convencionais exibem seu melhor desempenho. Já o valor de $1,5 \mu\text{m}$ foi escolhido com base nas simulações anteriores, que mostraram uma concordância entre os resultados obtidos com a fibra óptica com perfil D modelada no COMSOL e a fibra fornecida pela *Phoenix Photonics*. Como pode ser observado no gráfico da Figura 37(a), a sensibilidade exibe um comportamento linear em função de L_D , em que o ajuste linear fornece um coeficiente de linearidade $R^2 = 1$, ou seja, indica que os pontos obtidos na modelagem tem uma tendência 100% linear. Para a sensibilidade em função da espessura da casca residual, ou seja, da distância do perfil D para o núcleo

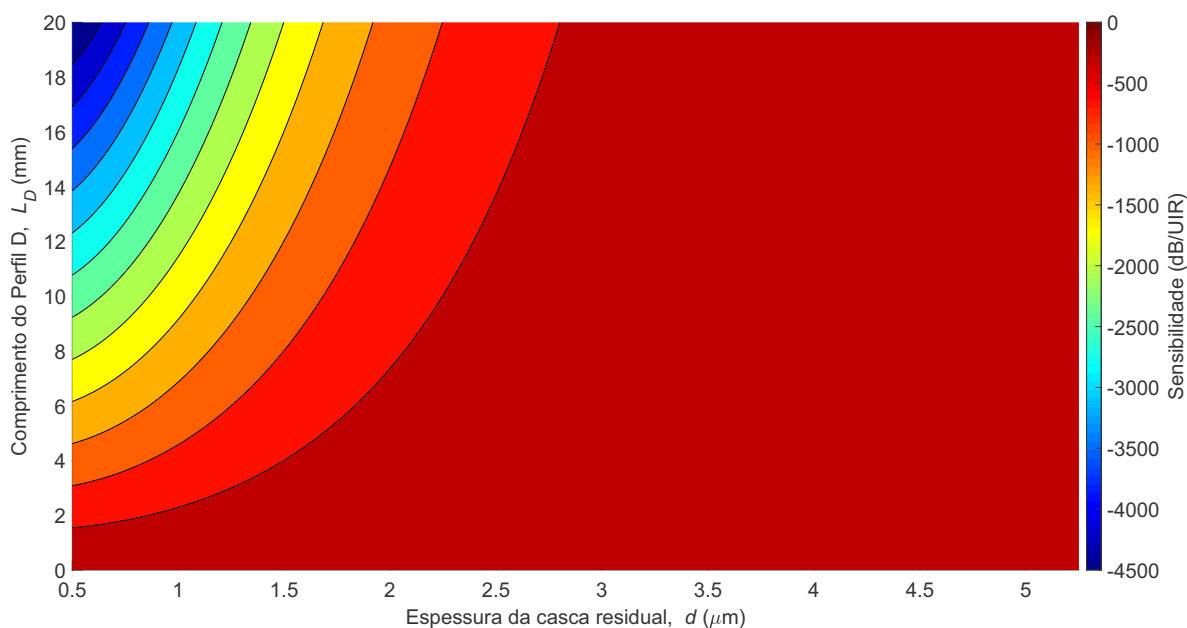
da fibra óptica, o gráfico da Figura 37(b) exibe um comportamento exponencial. Como se pode observar, para valores de d superiores à, aproximadamente, $4,5 \mu\text{m}$, basicamente não ocorre resposta sensora, visto que a sensibilidade é muito baixa. Em contrapartida, quanto menor a espessura da casca residual, mais alta a sensibilidade obtida. É importante destacar que o gráfico da Figura 37(b) também foi obtido para um índice de refração do meio externo em torno de 1,45 UIR e com o comprimento do perfil D fixado em 17 mm.

Figura 37: Sensibilidade em função (a) do comprimento do perfil D (b) da espessura da casca residual.



Fonte: O Autor, 2020.

Figura 38: Curvas de nível para a sensibilidade em função do comprimento do perfil D e da espessura da casca residual.



Fonte: O Autor, 2020.

Por fim, a Figura 38 apresenta uma generalização dos resultados mostrados na Fi-

gura 37, a partir do gráfico de superfície com as curvas de nível para sensibilidade em função de L_D e d , medida em torno no índice de refração de 1,45 UIR. Como pode ser observado, as sensibilidades mais altas são alcançadas para as configurações definidas por um perfil D extenso (altos valores para L_D) e próximo do núcleo da fibra óptica (baixos valores para d).

4.4 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE NA SENSIBILIDADE DO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Através do processo de fabricação de perfil D em fibra óptica, proposto nesta Tese de Doutorado, apresentado na Seção 3.5 do Capítulo 3, foram construídas três amostras de fibra óptica com perfil D, usando três discos abrasivos com grãos de tamanho distintos. Essas amostras, denominadas de F1, F2 e F3, foram construídas, respectivamente, usando o disco 1, que tem grão com tamanho de $25 \mu\text{m}$, o disco 2, que tem grão com tamanho de $15 \mu\text{m}$ e o disco 3, que tem grão com tamanho de $7 \mu\text{m}$. Com isso, as superfícies polidas das amostras F1-F3 devem apresentar diferentes níveis de rugosidade. Cada uma dessas amostras foi usada como elemento sensor para o sistema de detecção de índice de refração apresentado na Seção 4.1, explorando a faixa de detecção de 1-1,37 UIR, em que o sensor que faz uso da fibra com perfil D, proposta nesta Tese de Doutorado, apresenta melhor desempenho, quando comparado com o sensor que faz uso de uma fibra com perfil D obtida comercialmente.

4.4.1 Caracterização da Rugosidade de Superfície no Gwyddion

O Gwyddion é um *software* livre baseado no método de Mapeamento Paramétrico Estatístico (MPE) [155]. Tal *software* é frequentemente usado pela comunidade científica para obter medidas morfológicas a partir de dados coletados por diferentes técnicas de imageamento, tais como microscopia eletrônica de varredura (MEV), de força atômica (MFA) e microscopia óptica (MO) [155]. Importantes parâmetros estatísticos são fornecidos por esse *software*, em que um deles é o parâmetro R_q , definido por

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j^2}, \quad (4.3)$$

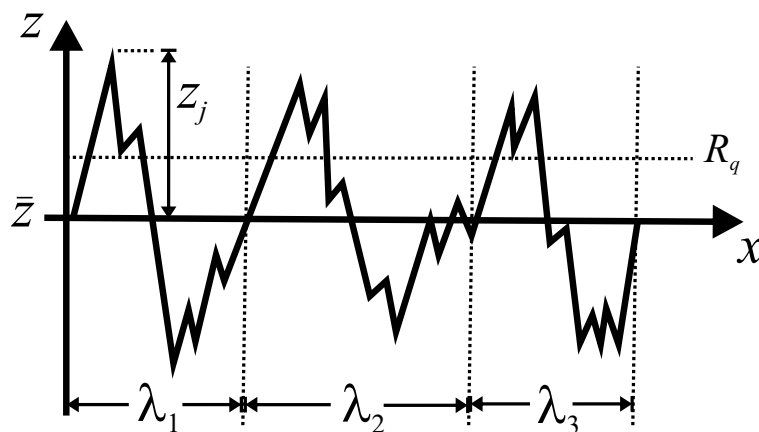
em que $r_j = z_j - \bar{z}$ representa a altura do j -ésimo pico z_j , medida a partir de uma linha média

$\bar{z}$, para uma amostragem de N valores de pico. O parâmetro R_q representa a raiz quadrada da média quadrática, ou valor *rms* (*root-mean-square*), dos valores de pico da rugosidade de superfície. Ele é usualmente rotulado pela literatura como o nível de rugosidade e é usado para quantificar a rugosidade de superfície, pois é muito sensível aos desvios isolados de um perfil regular de superfície [155]. Este parâmetro é obtido através da ferramenta *Roughness* fornecida pelo Gwyddion.

Além do nível de rugosidade R_q , também é obtido o parâmetro λ_q , que representa o valor *rms* do comprimento de onda do perfil da superfície, ou seja, a periodicidade da rugosidade [157]. Este é um parâmetro importante para a identificação de uma estrutura periódica, para a caracterização da superfície rugosa [157]. Através do Gwyddion, também é possível obter uma representação gráfica da topologia do eixo z , que define a rugosidade da superfície e permite a observação de picos e vales [155]. A Figura 39 ilustra um exemplo de topologia do eixo z , além dos parâmetros da equação (4.3), usada pelo Gwyddion para caracterizar a rugosidade de superfície. Adicionalmente, também são destacados alguns comprimentos de onda que podem ser identificados e contribuem para a obtenção do parâmetro λ_q .

Com isso, através do imageamento da superfície polida dessas amostras F1-F3, é possível obter uma caracterização da rugosidade de superfície presente sobre o perfil D de cada amostra. Nesta Tese de Doutorado, o imageamento foi realizado fazendo uso de técnicas de microscopia óptica de campo claro e todo o tratamento das imagens ocorreu no *software* Gwyddion. Os resultados obtidos são mostrados na Seção 4.5.

Figura 39: Esquema para uma rugosidade definida por vales e picos e os parâmetros estatísticos calculados pelo Gwyddion.



Fonte: O Autor, 2020.

4.4.2 Abordagem para a Rugosidade de Superfície por Fractais

A rugosidade de superfície pode ser caracterizada em geral por uma geometria irregular não-euclidiana [158]. Sua estrutura pode apresentar aleatoriedade ou similaridade [158] e, neste sentido, a rugosidade da superfície pode ser tratada como uma geometria fractal [159]. Na literatura, duas funções fractais clássicas são encontradas para representar a rugosidade da superfície: fractal de Weierstrass e fractal de Weierstrass-Mandelbrot [160]. Essas funções consistem em séries infinitas de funções senoidais, que modelam a rugosidade de superfície por uma estrutura periódica [160]. Assim, quanto mais termos da série são considerados, mais complexa se torna a representação da rugosidade, como esperado para uma abordagem fractal. No entanto, o termo de primeira ordem é uma função senoidal simples, normalmente usada em alguns trabalhos encontrados na literatura para representar a rugosidade superficial [161–163].

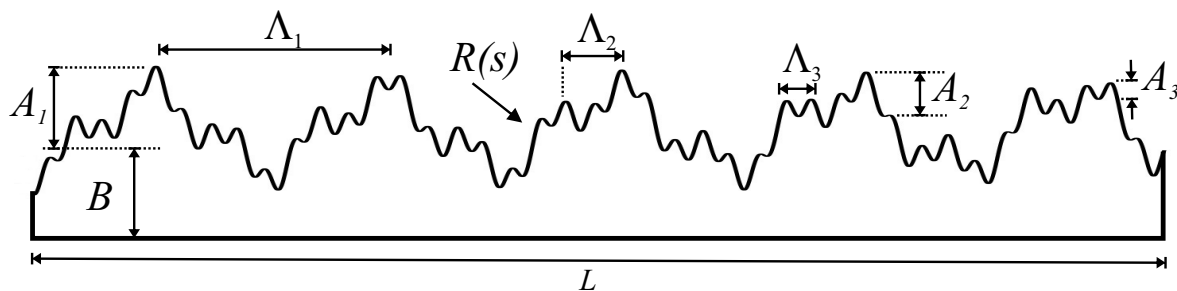
Uma abordagem para a rugosidade de superfície, gerada na fabricação do perfil D por técnicas de polimento, é proposta nesta Tese de Doutorado utilizando uma função fractal. Essa função, denominada de função rugosidade $R(s)$, ilustrada na Figura 40, é expressa na forma

$$R(s) = B + \sum_{i=1}^3 A_i \sin \left[\frac{2\pi}{\Lambda_i} (\eta s) \right], \quad (4.4)$$

em que s é uma variável de varredura no intervalo $[0, L_D]$, em que L_D é o comprimento do perfil D, A_i , com $i = 1, 2, 3$, é a amplitude de i -ésima ordem, conforme ilustrado na Figura 40; B é um parâmetro de translação, utilizado para ajustar a distância entre o plano de amplitude de rugosidade média e a interface do núcleo da fibra óptica, definindo assim a espessura média da casca residual, ou seja, $B = d$; Λ_i é a periodicidade de i -ésima ordem da rugosidade. A função $R(s)$ foi obtida a partir da expansão até o termo de terceira ordem da série que define a função fractal de Weierstrass [160]. A escolha dessa função foi por promover um melhor ajuste para a morfologia da superfície rugosa obtida experimentalmente, como é destacado na Seção 4.5.

Para as simulações, os valores das amplitudes e periodicidades de ordem 1, 2 e 3 são definidos com base no ajuste entre a morfologia modelada pela função rugosidade $R(s)$ e a morfologia da superfície rugosa obtida a partir das imagens processadas no Gwyddion. O parâmetro η pode ser considerado um fator de escala e assume os valores do índice de

Figura 40: Morfologia da rugosidade de superfície modelada pela função $R(s)$.



Fonte: O Autor, 2020.

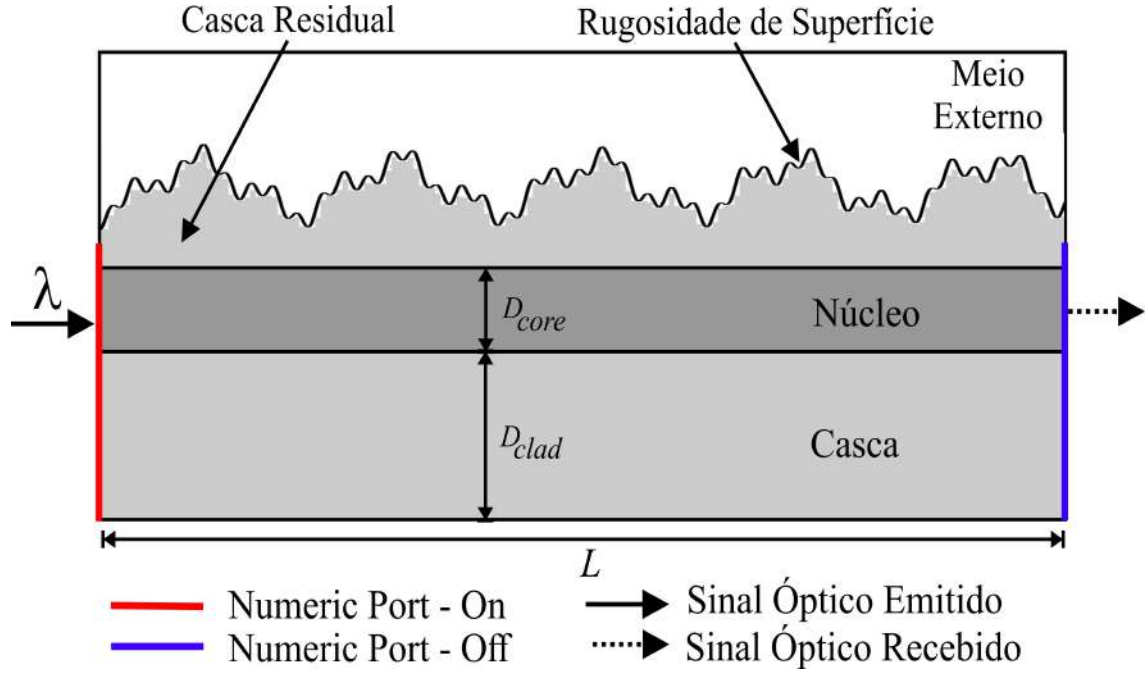
refração do meio externo, conforme utilizado para a função rugosidade descrita em [161]. É importante destacar que em [161], a rugosidade foi gerada por um processo corrosivo e modelada com sucesso por uma função fractal de primeira ordem. Neste trabalho, a rugosidade é gerada por um processo abrasivo, onde uma função fractal de terceira ordem foi necessária para uma melhor modelagem.

4.4.3 Modelo Computacional com Rugosidade de Superfície

A Figura 41 ilustra a geometria 2D do modelo, implementado no COMSOL, de uma fibra óptica com perfil D de superfície rugosa, definida pela função rugosidade $R(s)$. Diferentemente da simples abordagem para a modelagem de uma fibra óptica com perfil D de superfície lisa, apresentada na Seção 4.2 para a seção transversal, a abordagem para uma fibra óptica com perfil D de superfície rugosa requer uma modelagem mais complexa, que explora a seção longitudinal. Isso porque a rugosidade das amostras F1-F3 é analisada ao longo do comprimento do perfil D, na direção paralela ao núcleo da fibra óptica. O módulo *Wave Optics* também é usado como base para essa modelagem. Na configuração 2D mostrada na Figura 41, um sinal óptico com comprimento de onda $\lambda = 1310$ nm é injetado na extremidade esquerda, definida no COMSOL como uma *Numeric Port* configurada como um emissor (*status On*), estabelecendo um sinal óptico não polarizado no núcleo da estrutura [164]. O sinal óptico é detectado na extremidade direita, que corresponde no COMSOL a uma *Numeric Port* configurada como detector (*status Off*).

A medida da intensidade do sinal óptico transmitido é dada através da transmitância, T , que é obtida a partir do parâmetro de espalhamento S_{21} , definido na teoria de linhas de

Figura 41: Geometria 2D do modelo computacional.



Fonte: O Autor, 2020.

transmissão e é utilizado pelo módulo *Wave Optics* [164] através da seguinte expressão

$$T = \|S_{21}\|^2 = \frac{\int_{porta2} \|\mathbf{E}_t\|^2 dy}{\int_{porta1} \|\mathbf{E}_e\|^2 dy'} \quad (4.5)$$

em que $\mathbf{E}_e$ é o vetor campo elétrico emitido pela *Numeric Port* com *status On* (porta 1) e $\mathbf{E}_t$ é o vetor campo elétrico detectado pela *Numeric Port* com *status off* (porta 2), ou seja, o campo elétrico do sinal óptico transmitido.

Uma malha retangular foi utilizada para discretizar o núcleo e a casca. Para a casca residual, na presença da rugosidade, foi utilizada uma malha triangular, por ser mais adequada para os contornos irregulares. O tamanho do elemento finito para os dois tipos de malhas foi $\lambda/20$. Para resolver o modelo da Figura 41, foram usados dois estudos de análise modal de fronteira (*Boundary Mode Analysis*), com um para cada porta, e um estudo no domínio da frequência (*Frequency Domain Study*), para resolver o problema da propagação da onda eletromagnética no guia de onda.

Em relação aos parâmetros utilizados na simulação, os índices de refração do núcleo e da casca da fibra óptica são os mesmos definidos na Seção 4.2, assim como os índices de refração do meio externo. Para os parâmetros geométricos que definem a fibra óptica com perfil D, tem-se: $D_{core} = 8 \mu\text{m}$, para o diâmetro do núcleo; $D_{clad} = 20 \mu\text{m}$, para a espessura

da casca e $L_D = 13$ mm, para o comprimento do perfil D. É importante destacar que a espessura reduzida para a casca da fibra foi empregada para diminuir o uso da memória RAM necessária nas simulações numéricas. Além disso, não há perda de generalidade, pois o comprimento de penetração da luz na casca da fibra óptica é menor que $20\text{ }\mu\text{m}$ [33].

Por fim, a eficiência de uma geometria retangular para modelar um fibra óptica é verificada em [161], onde é observado boa concordância entre resultados de uma modelagem desse tipo com resultados experimentais para fibras ópticas. Além disso, recentemente foi provado por A. A. D. Silva *et al.* [14], através de um comparativo entre modelos em 2D e 3D para uma fibra óptica, que esse modelo de geometria retangular é compatível com a estrutura tridimensional de uma geometria cilíndrica de uma fibra óptica. Com isso, o modelo proposto nesta seção apresenta consistência e deve promover confiabilidade aos resultados. No entanto, deve-se considerar a complexidade introduzida devido ao perfil D, que quebra a simetria cilíndrica da fibra óptica, fazendo do modelo 2D proposto nesta seção uma aproximação, por meio da seção longitudinal, para uma fibra óptica com perfil D rugoso.

4.5 RESULTADOS PARA O SENSOR À FIBRA DE PERFIL D COM RUGOSIDADE

Os resultados apresentados nesta seção estão divididos em duas categorias. A primeira categoria é a caracterização, do ponto de vista morfológico, da rugosidade de superfície das amostras de fibra óptica com perfil D, através do processamento das imagens de microscopia óptica realizado no Gwyddion pelo método de Mapeamento Paramétrico Estatístico [155]. Já a segunda categoria, é a caracterização, do ponto de vista óptico, do sensor de índice de refração construído a partir das fibras ópticas de perfil D rugoso.

4.5.1 Morfologia da Rugosidade de Superfície

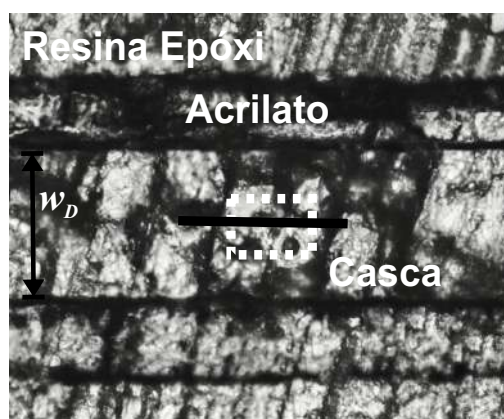
As imagens de microscopia óptica de uma seção da superfície polida das amostras F1, F2 e F3 são mostradas na Figura 42. Analisando as imagens 2D da coluna da esquerda, figuras 42(a)-(c), pode-se notar a diferença da superfície polida das amostras F1, F2 e F3, que foram geradas polindo a superfície das amostras de fibra óptica com os discos abrasivos 1, 2 e 3, respectivamente. Em que tal diferença está relacionada com o tamanho do grão de cada disco. Na amostra F1, observa-se que ela recebeu um polimento mais agressivo do disco 1, com muitas imperfeições em sua superfície (mais rugosa), enquanto que na amostra F3, observa-se que o polimento do disco 3 resultou numa superfície mais suave (menos rugosa).

Para a amostra F2, considera-se uma superfície com nível de imperfeições intermediário ao observado nas amostras F1 e F3. Além disso, nas imagens da coluna da esquerda, pode-se identificar as fronteiras de cada meio material que compõem as amostras e foi atingindo pelo polimento: a resina epóxi, o revestimento de acrilato e a casca da fibra óptica. O parâmetro w_D , que é a largura média da região plana gerada na casca das amostras de fibra óptica, também é destacado nessas imagens 2D. Como destacado no Capítulo 3, através desse parâmetro é possível inferir sobre a espessura da casca residual que separa o núcleo do meio externo, fazendo uso da expressão (3.3). Ainda nas figuras 42(a)-(c), deve-se notar uma inclinação na estrutura da rugosidade em relação ao eixo longitudinal da fibra óptica. Essas inclinações são decorrentes do posicionamento das amostras sobre a superfície dos discos abrasivos.

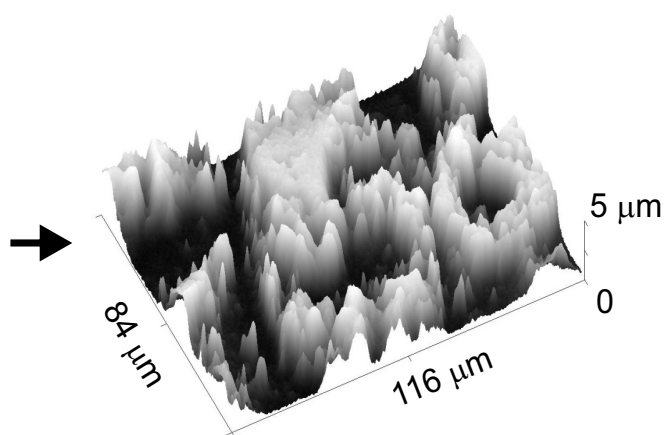
As morfologias 3D da rugosidade de superfície na região central do perfil D, destacada pelo retângulo tracejado nas figuras 42(a)-(c), são mostradas na coluna da direita da Figura 42, pelas figuras 42(d)-(f), para as amostras F1, F2 e F3. Tais morfologias são fornecidas pelo Gwyddion, a partir do processamento das imagens de microscopia óptica. Observando-se a escala vertical, que define os valores dos vales e picos da superfície rugosa, nota-se que tais valores são da ordem de micrômetros para as amostras F1 e F2 e da ordem de nanômetros para a amostra F3, que sugere a redução do nível de rugosidade. Essa observação é corroborada quando nota-se uma redução nas irregularidades na superfície rugosa, quando se vai da amostra F1 à F3, em que as estruturas de vales e picos que definem a rugosidade tendem a uma forma comum ao longo da extensão da superfície.

A Figura 43 mostra a topologia do eixo z da rugosidade ao longo do eixo x (eixo de propagação da luz na fibra óptica) da superfície das amostras F1-F3, obtida pelo Gwyddion (curva vermelha) e sua representação através da função rugosidade (curva preta). As topologias experimentais mostradas na Figura 43 são obtidas a partir das imagens 42(a)-(c), processadas em Gwyddion, utilizando a ferramenta *Roughness*, obtendo a topologia ao longo da linha, destacada nas figuras 42(a)-(c), na direção de propagação da luz. Como pode ser observado, a representação da topologia pela função rugosidade apresenta um comportamento semelhante ao observado nos dados experimentais (imagens): estrutura periódica com aproximadamente três frequências predominantes e uma distribuição de amplitude parcialmente desordenada. Devido às dimensões da rugosidade de superfície gerada nas amostras F1-F3, diferentes escalas foram adotadas para o eixo x na Figura 43. É importante ressal-

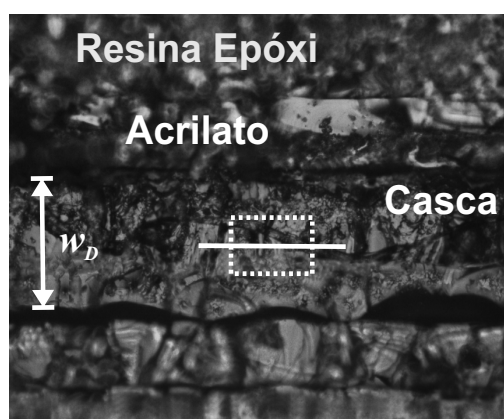
Figura 42: Imagens de microscopia óptica da superfície polida das amostras (a) F1 (b) F2 (c) F3. Morfologia 3D da rugosidade de superfície na região central (indicada no retângulo tracejado) das amostras (d) F1 (e) F2 (f) F3.



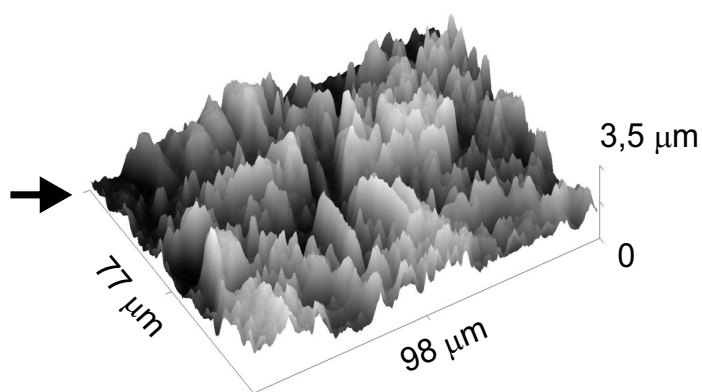
(a)



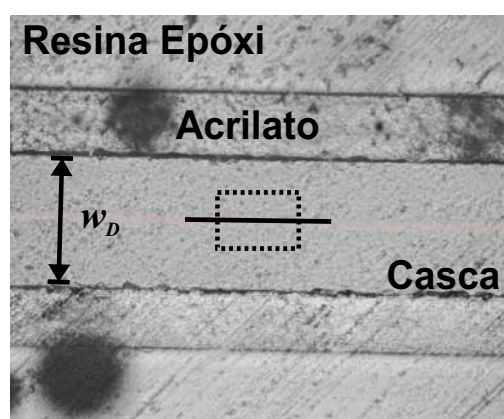
(d)



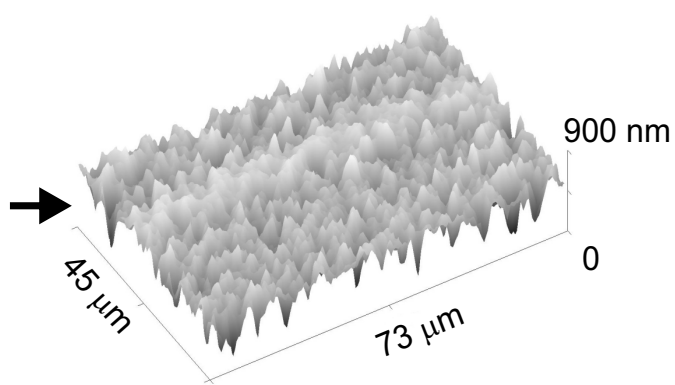
(b)



(e)



(c)

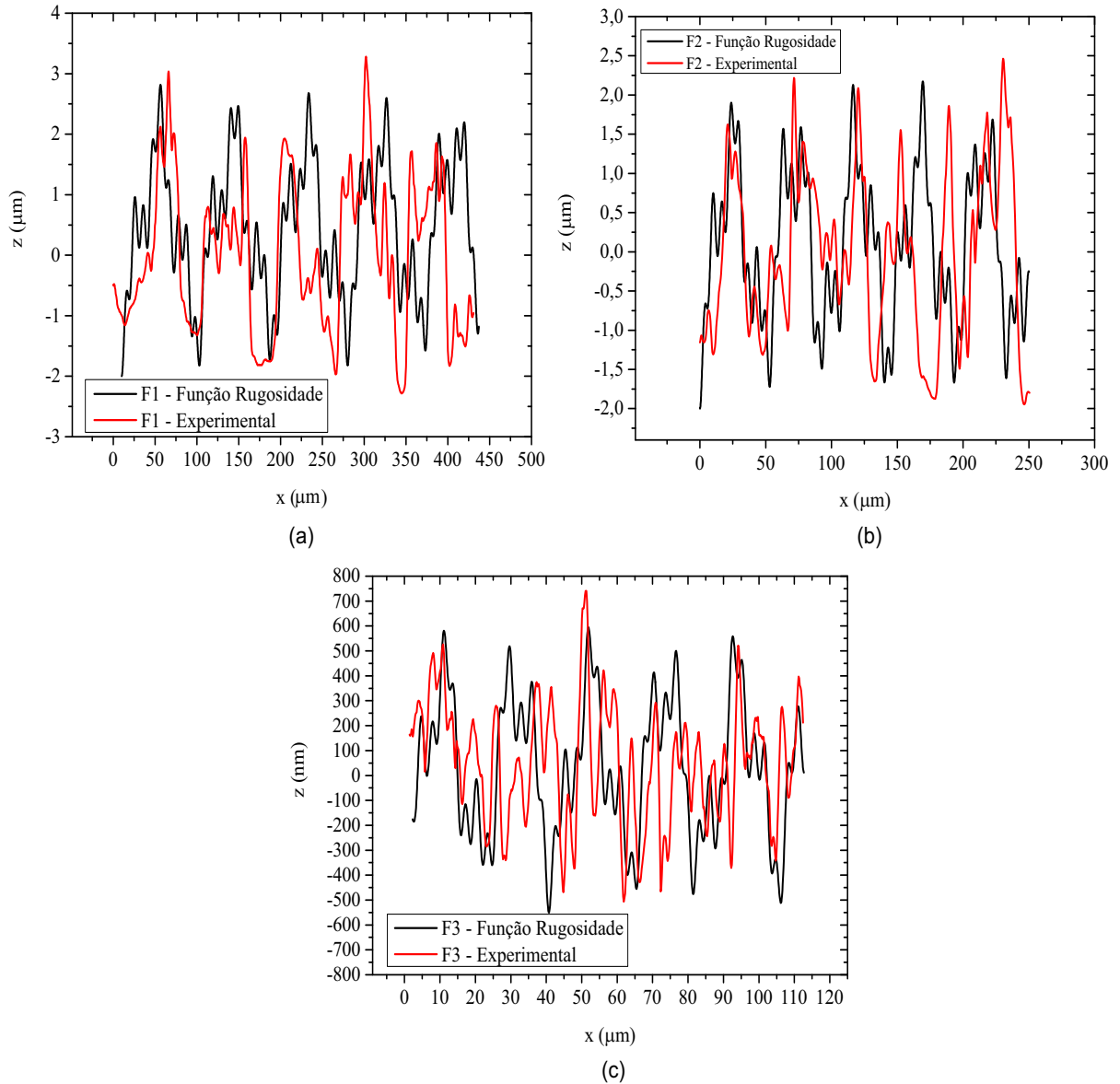


(f)

Fonte: O Autor, 2020.

tar que as curvas experimentais representam a topologia de superfície de seções da região central do perfil D, na direção do eixo de propagação do sinal óptico na fibra óptica. Dessa forma, representam a rugosidade percebida pela onda evanescente que se propaga no núcleo da fibra óptica.

Figura 43: Topologia da superfície rugosa obtida através das imagens de microscopia óptica processadas no Gwyddion (curva vermelha) e sua representação pela função rugosidade (curva preta), para as amostras (a) F1 (b) F2 (c) F3.



Fonte: O Autor, 2020.

Em relação às curvas que definem a topologia definida pela função rugosidade, é importante destacar que elas foram obtidas atribuindo-se valores para os parâmetros que definem essa função, A_i , Λ_i , com $i = 1, 2, 3$ e B , tal que a topologia resultante apresentasse aspectos semelhantes, aos observados experimentalmente, para a distribuição de picos e vales

e de frequências. No entanto, é mostrado na Seção 4.5.2 que esses parâmetros são corrigidos com base em medidas ópticas obtidas para o sensor de índice de refração. Tal correção irá implicar que, através da função rugosidade, é feita uma conexão entre as características morfológicas, que definem as amostras F1-F3, de fibra óptica com perfil D rugoso, com as características ópticas, que definem o desempenho do sensor de índice de refração baseado nessas amostras.

Os valores dos parâmetros R_q e λ_q obtidos a partir das imagens de microscopia com o *software* Gwyddion são apresentados na Tabela 9, para as amostras F1-F3, bem como os valores para o tamanho de partícula de cada disco de polimento utilizado. Como pode ser visto, apenas a amostra F1 apresentou um valor *rms* de rugosidade R_q da ordem de micrômetros. Este é um resultado interessante, uma vez que o tamanho de partícula dos discos abrasivos 1-3 é muito maior do que o valor *rms* da rugosidade gerada. No entanto, há uma influência maior do tamanho das partículas dos discos abrasivos no comprimento de onda λ_q do perfil gerado, pois possuem valores próximos. Além disso, quanto menor o tamanho da partícula do disco abrasivo, maior o número de vales e picos da rugosidade gerada. Ou seja, o comprimento de onda médio do perfil da superfície rugosa é menor. A Tabela 9 também mostra os valores obtidos para a espessura d da casca residual. O parâmetro d foi calculado a partir da expressão (3.3) usando os valores $D_{core} = 8 \mu\text{m}$, $D_{clad} = 125 \mu\text{m}$ e a largura da região polida das amostras F1, F2 e F3, $w_{F1} = 123,78 \mu\text{m}$, $w_{F2} = 123,95 \mu\text{m}$ e $w_{F3} = 124,43 \mu\text{m}$, respectivamente.

Tabela 9: Parâmetros que caracterizam a superfície rugosa das amostras de fibra óptica com perfil D.

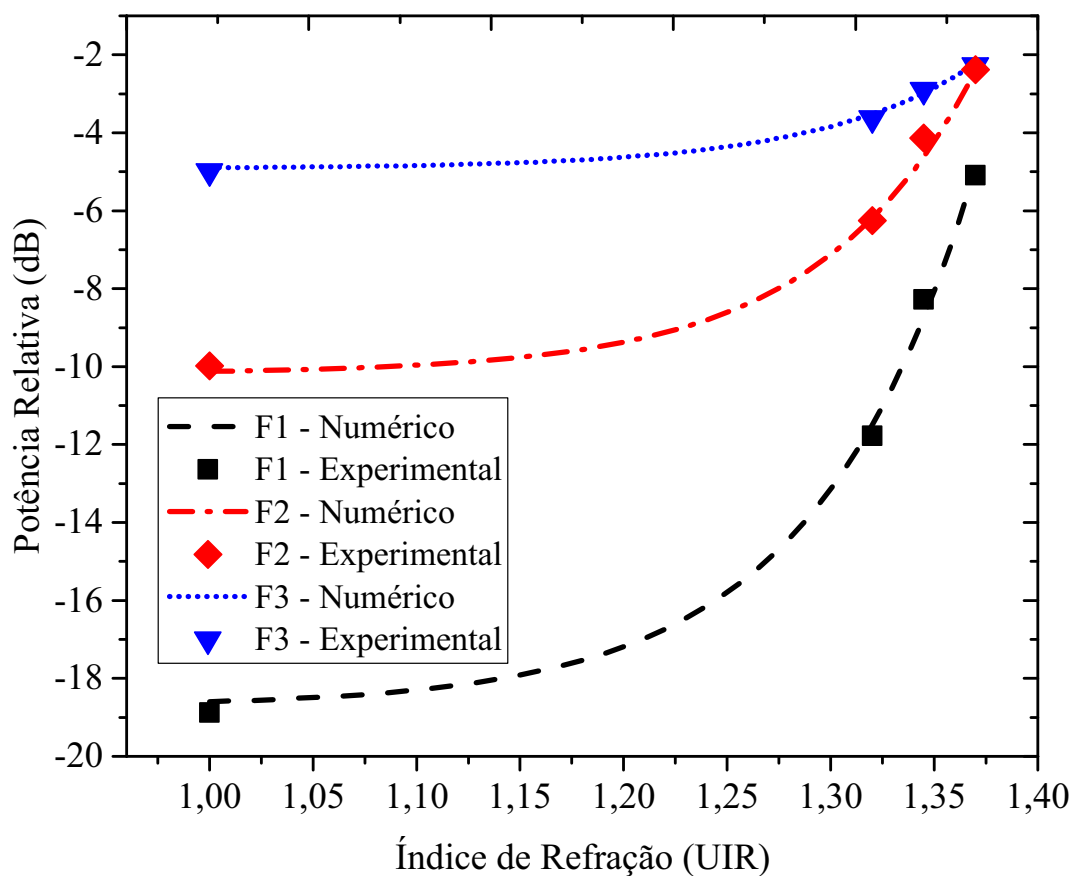
Parâmetros	Amostras		
	F1	F2	F3
R_q	1,165 μm	990 nm	333,1 nm
λ_q	27,01 μm	17,38 μm	8,75 μm
d	4,7 μm	4,1 μm	1,97 μm
Grão dos discos abrasivos	25 μm	15 μm	7 μm

4.5.2 Desempenho do Sensor de Índice de Refração

A potência óptica relativa do sinal óptico transmitido como função do índice de refração do meio externo, para as amostras F1, F2 e F3, é mostrada na Figura 44. Essa

potência óptica é relativa ao sinal óptico transmitido na ausência do perfil D, de modo que também representa a perda por inserção do elemento sensor (perfil D). Os pontos discretos representam os resultados experimentais e as linhas representam os resultados da modelagem numérica. Como pode ser observado, as amostras F1 e F2, que foram fabricadas com discos que podem gerar maiores valores *rms* de rugosidade, apresentam maiores perdas de sinal óptico. Enquanto que, com a diminuição da rugosidade *rms*, o sinal óptico transmitido aumenta, como pode ser visto para a amostra F3. Ainda na Figura 44, o aumento do índice de refração do meio externo resulta num aumento da potência relativa, ou seja, uma diminuição da perda por inserção. Isso porque, à medida que o índice de refração do meio externo aumenta, aproximando-se do índice de refração da casca, o efeito da rugosidade diminui, pois a interface se comporta como se fosse um meio homogêneo, ou seja, como se houvesse um perfil D de superfície lisa na fibra óptica. No entanto, como observado na Seção 4.3.1, quando o índice de refração do meio externo é igual ou superior ao índice de refração da casca, boa parte da luz guiada escapa para o meio externo.

Figura 44: Potência relativa transmitida como função do índice de refração do meio externo, obtida experimentalmente (pontos) e através da modelagem numérica (linhas).



Fonte: O Autor, 2020.

Com os resultados experimentais da potência óptica relativa para cada valor do índice de refração do meio externo, para as amostras F1-F3, foram obtidos os valores dos parâmetros da função $R(s)$, que modela a rugosidade de superfície dessas amostras. Esses valores são mostrados na Tabela 10. Eles foram obtidos comparando-se os valores da potência óptica, medidos com o perfil D exposto ao ar e imerso em cada meio líquido, obtido nas medidas experimentais, com os resultados da modelagem computacional. Calculando a diferença entre esses valores de potência óptica para cada valor de índice de refração do meio externo e adicionando o módulo de cada uma dessas diferenças, o erro total associado ao modelo computacional é obtido. A combinação de valores para A_1 , A_2 e A_3 , B e Λ_1 , Λ_2 e Λ_3 que fornece o erro total mínimo é definida como a solução ótima. Para tanto, são atribuídos valores para esses parâmetros com base no ajuste entre a topologia do eixo z obtida experimentalmente e sua representação pela função de rugosidade, conforme mostrado na Figura 43, a fim de se obter uma solução aproximada que forneça valores de potência para cada valor do índice de refração externo próximo aos valores experimentais. Em seguida, seis desses parâmetros são mantidos fixos e o outro é variado em passos de $\pm 0,01 \mu\text{m}$, a fim de se obter o valor que minimize o erro total. A incerteza nos valores desses parâmetros é obtida analisando-se até quantos incrementos de $\pm 0,01 \mu\text{m}$, em torno do valor de cada parâmetro que fornece a solução ótima, mantêm o erro total em seu valor mínimo. Como resultado, é possível definir os valores dos parâmetros da função de rugosidade conforme mostrado na Tabela 10, em que para cada valor foi atribuída uma incerteza. Esta metodologia foi utilizada para cada amostra F1-F3. Ainda na Tabela 10, são apresentados os valores do erro total obtido para cada amostra F1-F3. Como pode ser visto, o processo de otimização permitiu obter soluções em que o maior erro total é igual a 0,5 dB, que é a diferença entre a potência óptica transmitida experimental e simulada.

Em relação às incertezas das amplitudes e periodicidades, deve-se observar que apenas a amostra F3 apresenta valores para a incerteza da ordem de grandeza das amplitudes de ordem 1, 2 e 3. Isso se deve ao valor *rms* da rugosidade, medido experimentalmente para esta amostra, que é da ordem dos nanômetros. Para essa dimensão, o microscópio óptico possui baixa precisão e, conseqüentemente, o processamento dos dados pelo Gwyddion deve gerar uma topologia com dimensões ligeiramente diferentes dos valores exatos. É importante destacar a boa aproximação entre os valores de d da Tabela 9, obtidos a partir dos dados experimentais, com os valores de B da Tabela 10, obtidos com o ajuste da função rugosidade.

Em que esses parâmetros são equivalentes, mas estão definidos com símbolos distintos para diferenciar sua origem: d , experimental e B , do modelo computacional. Como em ambos os casos d e B foram medidos indiretamente, os valores para o erro relativo observado na Tabela 10 são razoáveis.

Tabela 10: Parâmetros da função rugosidade.

Parâmetros	Amostras		
	F1	F2	F3
A_1 (nm)	1325,70±90	1153,5±80	298,7±28,6
A_2 (nm)	627,6±40	578,5±35	153,9±19,7
A_3 (nm)	297,2±20	290,2±18	79,3±11,5
Λ_1 (μm)	87,9±2,8	48,9±1,1	21,3±1,9
Λ_2 (μm)	30,2±1,9	18,2±0,4	8,3±0,9
Λ_3 (μm)	10,4±0,6	6,8±0,1	3,2±0,5
B (μm)	4,0±0,2	3,5±0,1	1,52±0,08
Erro relativo em B	17,5 %	17,1 %	29,6 %
Erro total na potência óptica	0,5 dB	0,5 dB	0,21 dB

A partir dos parâmetros da função rugosidade, obtidos no modelo do COMSOL, para cada amostra F1-F3 e apresentados na Tabela 10, é possível obter os valores dos parâmetros R_q e λ_q , que caracterizam a rugosidade superficial modelada pela função $R(s)$. Isso foi feito implementando, no MATLAB, a função rugosidade de cada amostra F1-F3. Com isso, é possível obter o valor *rms* dos parâmetros R_q e λ_q implementando a expressão (4.3) neste *software*. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11. Como pode ser observado, os valores se aproximam dos obtidos experimentalmente (por imagens de microscopia), apresentados na Tabela 9, com erro relativo máximo inferior a 4%, exceto para a amostra F3. Os resultados para a potência transmitida relativa em função do índice de refração do meio externo, obtidos a partir da modelagem computacional da fibra óptica com perfil D rugoso, também são mostrados na Figura 44. Uma vez obtidos os parâmetros da rugosidade de superfície para cada amostra F1-F3 (Tabela 10), foi feita uma varredura, com passos de 0,01 UIR, nos valores do índice de refração do meio externo nas simulações. As curvas obtidas com o modelo numérico, representadas como linhas na Figura 44, mostram a tendência dos pontos experimentais. Deve-se destacar a boa correspondência entre os resultados obtidos experimentalmente e com a modelagem numérica.

Tabela 11: Parâmetros que caracterizam a rugosidade de superfície modelada no COMSOL

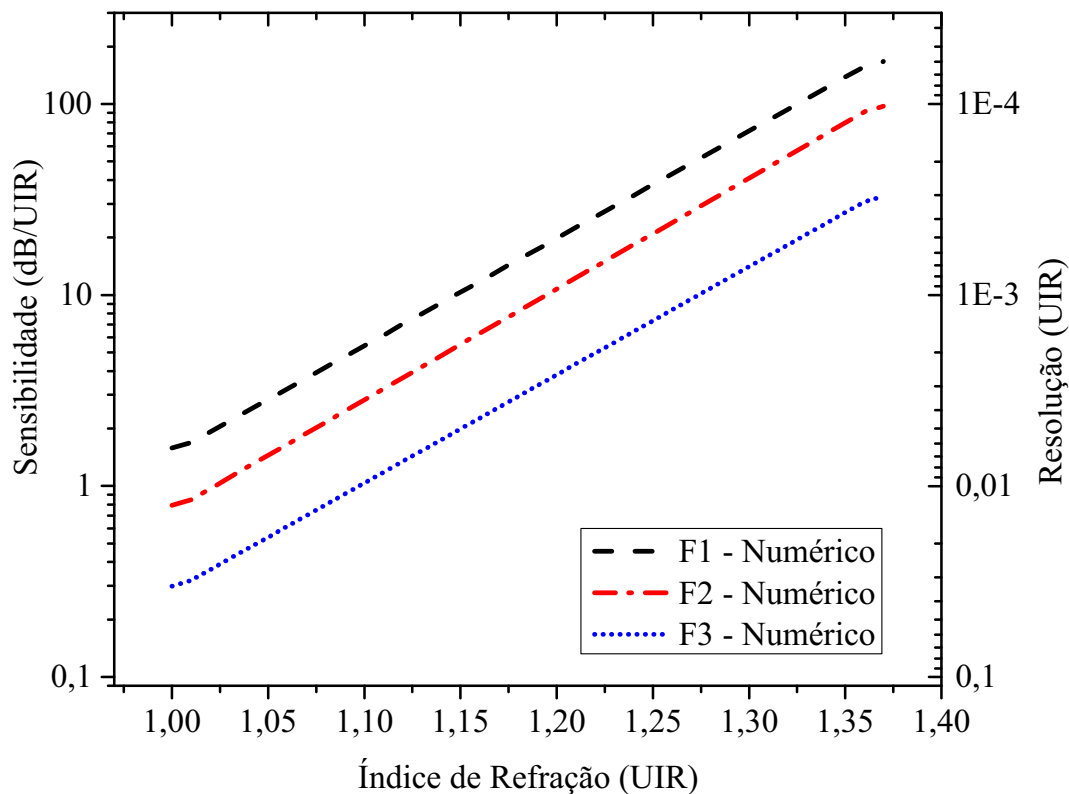
Parâmetros	Amostras		
	F1	F2	F3
R_q	1,185 μm	957 nm	384,9 nm
λ_q	27,54 μm	17,92 μm	9,31 μm
Erro relativo em R_q	1,7 %	3,3 %	15,5 %
Erro relativo em λ_q	2 %	3,1 %	6,4 %

A sensibilidade do sensor é obtida usando a expressão (4.1), a partir dos resultados da modelagem computacional do sensor de índice de refração mostrados na Figura 44, e é traçada na Figura 45, como uma função do índice de refração do meio externo, para cada amostra F1-F3. Como pode ser visto nos gráficos, maiores valores *rms* da rugosidade levam a maiores sensibilidades, conforme mostrado nas curvas de F1 e F2, que atingem até 167 dB/UIR. Porém, deve-se notar um aumento considerável na perda por inserção do dispositivo à medida que a rugosidade de superfície aumenta, chegando a 18 dB para F1 (vide Figura 44). Um equilíbrio entre a sensibilidade e a perda por inserção é, portanto, necessário para projetar um dispositivo sensor com base no valor *rms* da rugosidade de superfície do perfil D. Do ponto de vista experimental, a partir dos valores de potência óptica relativa mostrados nos pontos dos gráficos da Figura 44, para a faixa de detecção de índice de refração de 1,33-1,37 UIR, obtém-se as sensibilidades: $S_1 = 27$ dB/UIR, $S_2 = 77$ dB/UIR e $S_3 = 133,8$ dB/UIR, para as amostras F1, F2 e F3, respectivamente.

Através de uma análise estatística dos resultados obtidos experimentalmente com o sensor de índice de refração construído com a amostra F1 (mais sensível), pode-se obter uma medida para a resolução deste sensor. A partir de uma amostragem de 100 pontos de potência relativa para cada índice de refração do meio externo, a média e o desvio padrão associados a cada valor de potência óptica foram calculados. O desvio padrão é a resolução da medição de potência óptica devido a flutuações no sistema de detecção, flutuações na potência do laser ou outras flutuações e limitações do sistema. Com isso, foi obtida uma resolução de aproximadamente 0,01 dB para o sistema de detecção. Calculando-se a razão desse valor com a sensibilidade obtida para as amostras F1-F3, obtém-se a resolução na medida do índice de refração, em UIR, para o sensor, para cada uma dessas amostras, em função do índice de refração do meio externo. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 45. Como pode ser visto nos gráficos, os sensores que utilizam as amostras F1 e F2 apresentam melhores

resoluções. A inclinação das curvas de resolução indica como a resolução varia ao longo da faixa de detecção do índice de refração, atingindo até 10^{-5} UIR.

Figura 45: Sensibilidade, em dB/UIR e Resolução, em UIR (Unidades de Índice de Refração), como função do índice de refração do meio externo, obtida a partir do modelo numérico para os três perfis de rugosidade de superfície.

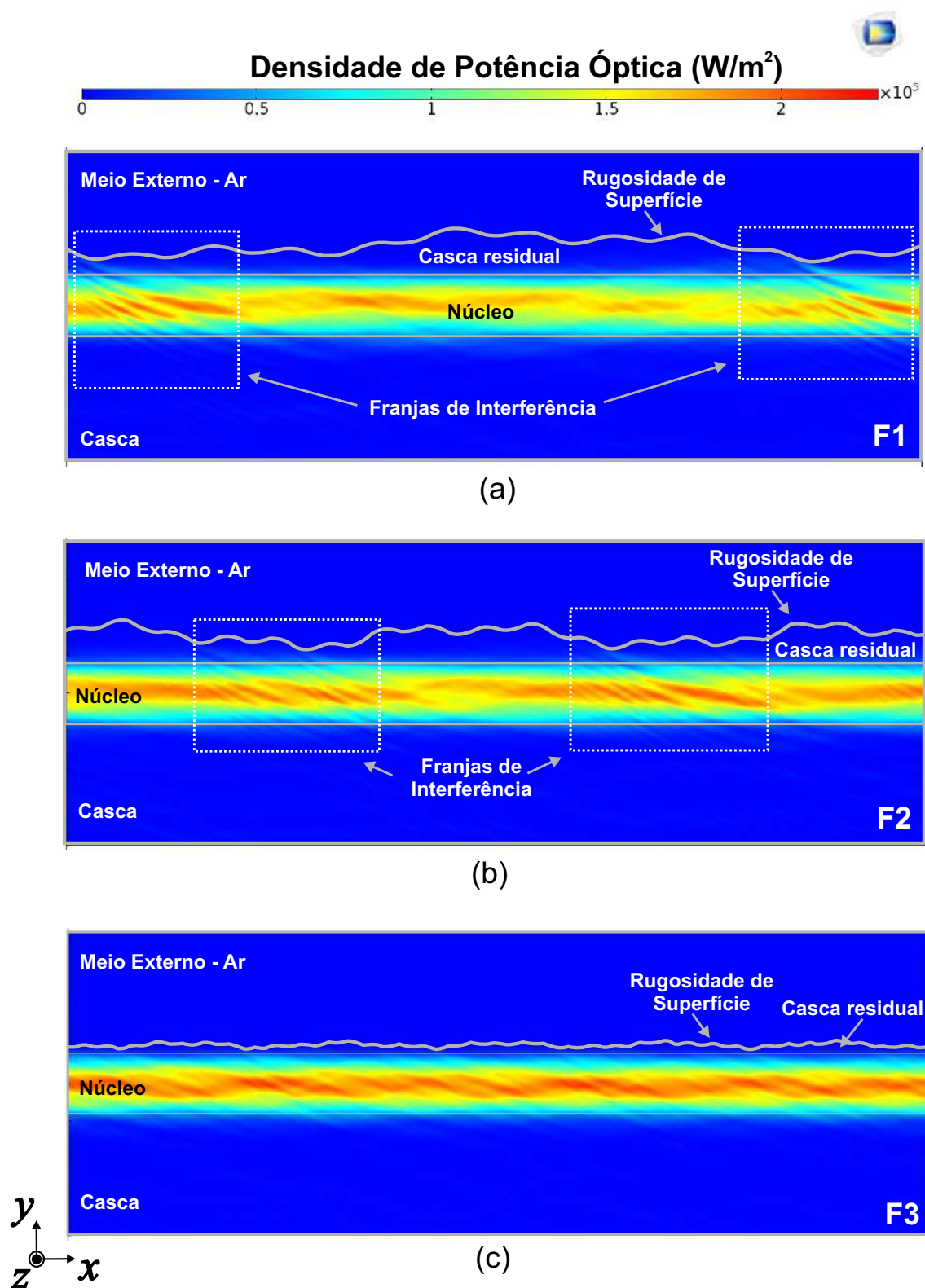


Fonte: O Autor, 2020.

A Figura 46 mostra o comportamento do sinal óptico que se propaga na estrutura 2D, que modela as amostras F1-F3, de fibra óptica com perfil D rugoso. Esses resultados correspondem ao ponto inicial de cada curva mostrada na Figura 44, obtidas nas simulações, para a medida da potência óptica com o perfil D exposto ao ar. Como pode ser observado nas figuras 46(a) e 46(b), para as amostras F1 e F2, respectivamente, tem-se uma modulação do sinal óptico em trechos que a rugosidade de superfície está mais próxima do núcleo. O comportamento observado é semelhante ao de franjas de interferência, que podem estar relacionadas à interação de uma fração da onda evanescente que é espalhada para o núcleo da fibra óptica, devido à rugosidade, e interfere com sinal óptico guiado no núcleo. Deve-se notar, ainda, que essas franjas de interferências estão melhor definidas para a amostra F1, em que o efeito de espalhamento deve ser mais intenso, devido à rugosidade *rms* dessa amostra. Para a densidade de potência óptica na amostra F3, mostrada na Figura 46(c), que apresenta a menor rugosidade *rms*, o sinal óptico guiado no núcleo tem, aproximadamente,

um comportamento uniforme, com uma modulação que não deixa evidente a presença de franjas de interferência.

Figura 46: Densidade de potência óptica para as amostras (a) F1 (b) F2 e (c) F3.



Fonte: O Autor, 2020.

Portanto, dado o comportamento do sensor de índice de refração, visto pela potência relativa (Figura 44) e pela sensibilidade e resolução (Figura 45), para o modelo de fibra óptica com perfil D com diferentes rugosidade *rms*, e corroborado com os resultados da Figura 46, tem-se que as boas figuras de mérito exibidas por esse sensor devem estar relacionadas à combinação de diferentes fenômenos ópticos. Para a faixa de detecção de índice de refração de 1,33-1,37 UIR, foi visto na Seção 4.2 que, na ausência da rugosidade de superfície, o modelo computacional basicamente não consegue distinguir alterações no índice de refração do meio externo nessa faixa de detecção. Isso porque existe pouca interação da onda evanescente com o meio externo. Já, para os resultados apresentados nesta seção, na presença da rugosidade de superfície, o modelo computacional apresenta ótimo desempenho. Isso porque, através de uma interface rugosa, a interação da onda evanescente com o meio externo é amplificada. Como destacado na literatura, isso deve ser corroborado pelo efeito de espalhamento da luz na interface rugosa [165]. No entanto, possíveis efeitos de interferometria, acarretados pelo efeito de espalhamento, como indicado pelos resultados da modelagem computacional, ainda não tinham sido relatados para fibras ópticas com perfil D. Isso pode estar associado à ausência de estudos com viés computacional, que permitem ir além das explorações experimentais.

Na Tabela 12, são apresentadas as figuras de mérito do sensor de índice de refração proposto nesta Tese de Doutorado e dos sensores obtidos na literatura (detalhados no Capítulo 2). Como pode ser observado, além dos sensores que fazem uso de fibra óptica com perfil D exposto, também estão incluídas as arquiteturas mais complexas, que são destacadas na Seção 2.1.1 do Capítulo 2. Isso permite analisar o desempenho do sensor proposto, à base das amostras F1-F3 de fibra óptica com perfil D rugoso, com os demais sensores. Além disso, na Tabela 12 também estão as figuras de mérito obtidas para o Sensor 1, que fez uso de uma fibra óptica com perfil D que foi produzido com uma sequência de polimentos para se obter uma superfície com baixo nível de rugosidade, e para o Sensor 2, que é obtido a partir de uma fibra com perfil D de uso comercial, que são apresentadas na Seção 4.3. Para a faixa de operação, pode-se notar que cada estrutura de elemento sensor possui uma faixa de variação de índice de refração distinta. No entanto, existe uma concordância entre a faixa de operação definida para o sensor proposto com a dos sensores da literatura, em que o índice de refração de 1,3 UIR é limite inferior dessas faixas de operação. Em relação à sensibilidade, o comparativo fica restrito apenas aos sensores com perfil D exposto

(D-Exposto) e metalizados (D-FM), que fornecem medidas de sensibilidade com base em alterações na intensidade do sinal óptico, definida em unidades de dB/UIR, pois a maioria das estruturas é baseada em análise de espectro, com sensibilidade definida em unidades de nm/UIR. Com isso, não é possível comparar a sensibilidade desses sensores, visto que são técnicas distintas para detecção de índice de refração. No entanto, entre os sensores que apresentam sensibilidade em dB/UIR, com células da Tabela 12 destacadas em amarelo, é possível realizar um comparativo. Deve-se notar que a sensibilidade exibida pelas amostras F1-F3 encontra-se de acordo com o obtido para os elementos sensores baseados apenas em perfil D exposto. Já para o Sensor 1 e o Sensor 2, apresentados na Seção 4.3, eles apresentam os maiores valores, em módulo, para a sensibilidade em dB/UIR, para faixa de detecção de índice de refração de 1,37-1,45 UIR, que é uma faixa de detecção usualmente explorada pelos sensores à fibra com perfil D exposto. Para a resolução desses sensores, definida em unidades de UIR, é possível comparar todos os elementos sensores apresentados na Tabela 12. O destaque está para a resolução exibida pelo sensor construído com a amostra F1 (que tem alto valor *rms* de rugosidade de superfície), pelo Sensor 1 e pelo Sensor 2 (comercial), que exibem uma resolução da ordem de 10^{-5} UIR, em que tal valor é observado apenas em estruturas mais complexas, que envolvem deposição de material transdutor sobre o perfil D (D-FM, D-MnM), uso de guia de onda planar acoplado ao perfil D (D-PWG) e em fibra de cristal fotônico com perfil D (PCF-D). Além disso, deve-se destacar o comprimento de onda de operação do sensor proposto, que é compatível com o comprimento de onda usado pelos sistemas de comunicações ópticas, enquanto boa parte dos sensores da Tabela 12 operam em comprimentos de onda no espectro visível.

Por fim, a partir dos resultados apresentados neste capítulo, pode-se concluir que com uma estrutura relativamente simples, que explora apenas a rugosidade *rms* gerada na superfície do perfil D, foi possível obter um sensor de índice de refração com boas figuras de mérito. Esse sensor é competitivo com estruturas mais difíceis de serem fabricadas, que funcionam à base de fenômenos que exigem instrumentação experimental mais robusta para detecção do índice de refração. Como destacado na revisão da literatura apresentada no Capítulo 2, as faixas de operação do sensor proposto, que são de 1,33-1,37 UIR e 1,37-1,45 UIR, são usualmente explorada nas aplicações bioquímicas, em que o monitoramento de reações químicas, concentração de substâncias, proteínas e entre outros, é baseado no sensoriamento do índice de refração do composto sob análise. Adicionalmente, o desempenho

do sensor proposto para a faixa de detecção de índice de refração de 1,37-1,45 UIR (Sensor 1) confirma o comportamento esperado para as fibras ópticas com perfil D, que é exibir alta sensibilidade para essa faixa de detecção.

Tabela 12: Figuras de mérito dos sensores de índice de refração à fibra óptica com perfil D.

Elemento Sensor	Figuras de Mérito				
	Faixa de Operação	Sensibilidade	Resolução	λ	Ref.
Proposto					
F1	1,33-1,37 UIR	133,8 dB/UIR	$7,48 \times 10^{-5}$ UIR	1310 nm	-
F2		77 dB/UIR	$1,3 \times 10^{-4}$ UIR		
F3		27 dB/UIR	$3,7 \times 10^{-4}$ UIR		
Sensor 1	1,37-1,45 UIR	-556,2 dB/UIR	$1,8 \times 10^{-5}$ UIR		
Sensor 2	1,37-1,45 UIR	-563,5 dB/UIR	$1,8 \times 10^{-5}$ UIR		
Obtidos na Literatura					
D-Exposto ¹	1,417-1,48 UIR	36,3 dB/UIR	10^{-3} UIR	660 nm	[13]
	1,33-1,44 UIR	179,8 dB/UIR	$3,3 \times 10^{-4}$ UIR	635 nm	[51]
D-FM ²	1,32-1,37 UIR	5200 nm/UIR	$3,7 \times 10^{-6}$ UIR	630 nm	[55]
	1,3333-1,3338 UIR	390 dB/UIR	2×10^{-5} UIR	690 nm	[70]
	1,33-1,37 UIR	917 nm/UIR	$1,1 \times 10^{-2}$ UIR	1550 nm	[71]
D-MnM ³	1,321-1,339 UIR	5855 nm/UIR	$1,7 \times 10^{-7}$ UIR	1420 nm	[78]
	1,4487-1,4490 UIR	304360 nm/UIR	$3,28 \times 10^{-9}$ UIR	1420 nm	[78]
D-PWG ⁴	1,33-1,458 UIR	270 nm/UIR	4×10^{-4} UIR	845 nm	[84]
	1,36-1,38 UIR	5300 nm/UIR	$1,9 \times 10^{-5}$ UIR	1310 nm	[84]
D-FBG ⁵	1,38-1,45 UIR	30 nm/UIR	10^{-2} UIR	1567 nm	[87]
D-PCF ⁶	1,31-1,43 UIR	315 nm/UIR	$3,17 \times 10^{-5}$ UIR	1364 nm	[96]

¹ D-Exposto - Perfil D Exposto; ² D-FM - Perfil D com Filmes Metálicos; ³ D-MnM - Perfil D com Materiais não-Metálicos; ⁴ D-PWG - Perfil D Acoplado com Guia de Onda Planar;

⁵ D-FBG - Perfil D com Estruturas de Grade; ⁶ D-PCF - Perfil D em Fibra de Cristal Fotônico.

5 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SENSOR DE CORROSÃO BASEADO EM FIBRA ÓPTICA COM PERFIL D

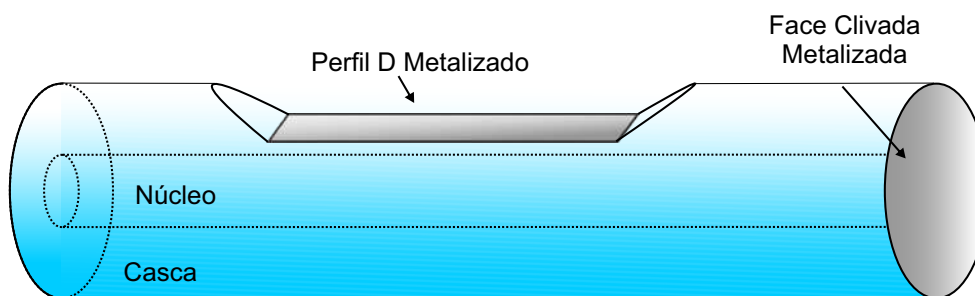
Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento de um sensor de corrosão à fibra óptica com perfil D. Esse sensor é modelado no COMSOL *Multiphysics* e, consequentemente, neste capítulo também é mostrada a eficiência desse *software* para modelagem de dispositivos ópticos. Na Seção 5.1, é apresentado o *design* do sensor tipo I, que é baseado numa estrutura híbrida, que combina uma fibra óptica de perfil D metalizado com um filme fino laminar e uma fibra monomodo com sua face clivada metalizada. Ainda na Seção 5.1, o sensor tipo I é implementado no COMSOL *Multiphysics* em duas modelagens, uma em 2D e outra em 3D, para análise e comparativo das vantagens de cada modelo. Já na Seção 5.3, é apresentado o sensor tipo II, que é um sensor aprimorado, desenvolvido a partir de uma fibra óptica de perfil D, em que a região plana do perfil D é metalizada com um filme fino estruturado, na forma de escada, e que também é combinado com uma fibra monomodo de face clivada metalizada.

5.1 SENSOR TIPO I - FILME FINO LAMINAR

Nesta seção, é apresentado o sensor tipo I, que é obtido da junção de uma fibra óptica de perfil D metalizado com uma fibra óptica de face clivada metalizada. Além disso, também é apresentado seu princípio de funcionamento num sistema de monitoramento da corrosão. Uma representação esquemática para esse elemento sensor é mostrada da Figura 47, que ilustra a construção de duas regiões sensoras ao longo de uma mesma estrutura de fibra óptica. É importante destacar que cada região sensora, ou elemento transdutor, modula o sinal óptico guiado nessa estrutura de maneira distinta. Sobre o perfil D, como destacado em [123, 124], o material metálico causa perdas por absorção, causando uma redução na intensidade do sinal óptico transmitido ou refletido. Sobre a face clivada, como observado em [10, 11], o filme metálico atua como um refletor, em que a intensidade do sinal óptico refletido pode ser controlada pela espessura do filme fino. Ainda em [10, 11], observa-se

que quando o filme metálico ainda é muito espesso, apesar da corrosão, não há alteração da refletividade. Ou seja, existe um dado valor de espessura para o filme metálico, tal que, acima desse valor, a refletividade é mantida constante e, abaixo desse valor, a refletividade é alterada, simultaneamente ao processo corrosivo. Com isso, é possível obter uma configuração para a estrutura do elemento sensor da Figura 47, tal que, usando espessuras diferentes para os filmes metálicos de cada transdutor, seja possível distinguir, analisando o sinal óptico refletido, a modulação gerada por cada elemento transdutor. Isso deve implicar na obtenção de um sensor com dupla faixa de detecção da corrosão. Deve-se destacar que, em termos de estrutura, o elemento sensor da Figura 47 pode ser interpretado como uma combinação dos elementos sensores obtidos em [124], para sensor de corrosão à fibra com perfil D e em [10, 11], para sensor de corrosão multiponto à fibra com face clivada metalizada.

Figura 47: Esquema simplificado do sensor tipo I.

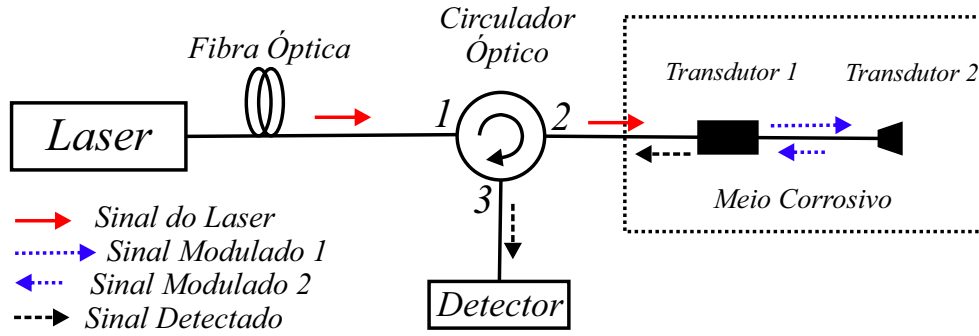


Fonte: O Autor, 2020.

Em relação à operação do sensor, o esquema da Figura 48 ilustra uma proposta para o sistema de detecção do sinal óptico que transporta as informações de um possível processo corrosivo. Como pode ser observado na Figura 48, o sinal óptico emitido por um laser é transmitido no enlace óptico até a entrada (porta 1) de um circulador óptico e, pela porta 2, é direcionado para o elemento sensor. O sinal óptico é modulado pelo transdutor 1 (fibra com perfil D metalizado) e segue para o transdutor 2 (fibra com face clivada metalizada). No transdutor 2, devido à presença do filme metálico na face clivada, boa parte do sinal óptico é refletido para o transdutor 1. Esse sinal é modulado e refletido até a porta 2 do circulador óptico. Pela porta 3 do circulador óptico, esse sinal é direcionado para o detector e sua intensidade é mensurada. É importante destacar que durante a simulação da corrosão, os elementos transdutores 1 e 2 estão simultaneamente inseridos num mesmo meio corrosivo, de modo que a corrosão deverá ocorrer com a mesma taxa em cada elemento sensor. Como destacado no parágrafo anterior, os transdutores são ajustados para proporcionar a distin-

ção entre as modulações que eles introduzem no sinal óptico. Com isso, pode-se dizer que essas modulações ocorrem em série: em primeiro, o sistema de detecção mede a modulação do transdutor 1, enquanto o transdutor 2 permanece saturado (filme metálico espesso); em segundo, quando o transdutor 1 é saturado (filme metálico completamente corroído), o transdutor 2 começa a modular o sinal óptico refletido.

Figura 48: Esquema do sistema de monitoramento da corrosão.



Fonte: O Autor, 2020.

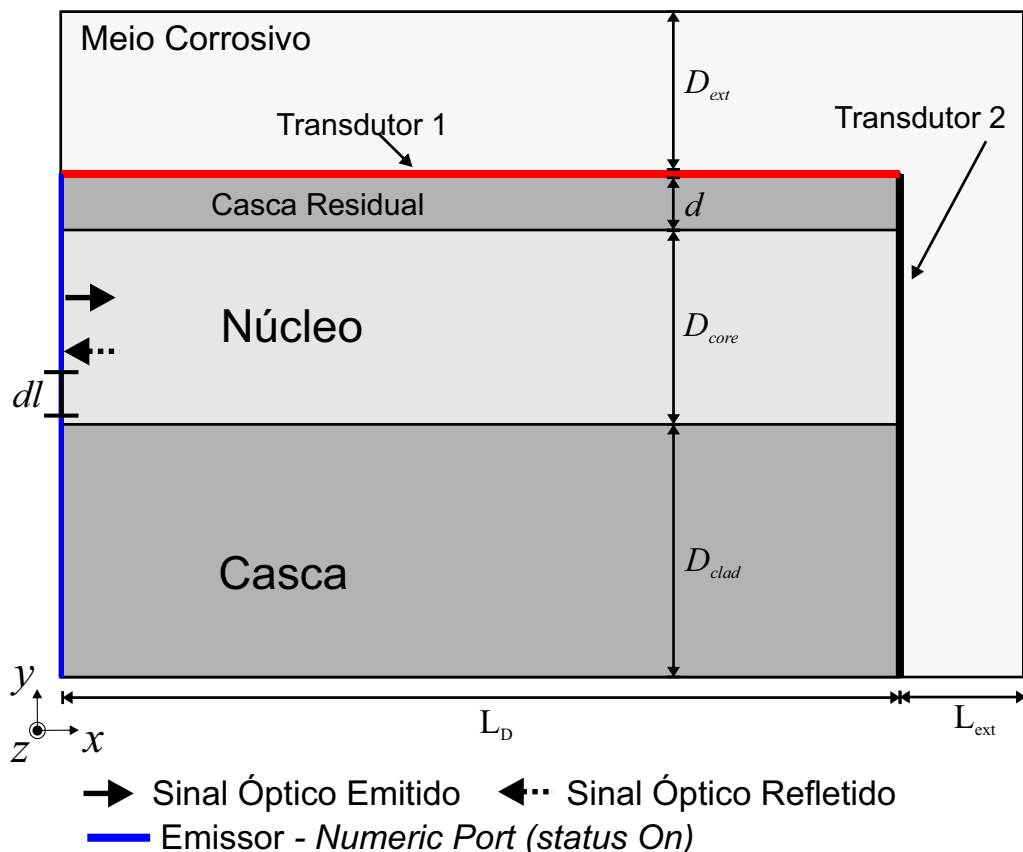
A seguir, através da modelagem computacional, são obtidos os valores para as espessuras dos elementos transdutores 1 e 2, assim como o tipo de material metálico, que otimizam o sensor de corrosão. Além disso, também são definidos os parâmetros geométricos que caracterizam a fibra óptica com perfil D que compõe o sensor proposto.

5.1.1 Modelo Numérico 2D

A modelagem computacional proposta nesta seção é semelhante à apresentada na Seção 4.4 do Capítulo 4, exceto pela ausência de um perfil D com superfície rugosa. O módulo *Wave Optics* também é usado como base para essa modelagem. A geometria 2D do modelo proposto, que representa os transdutores do sensor óptico, é mostrada na Figura 49. Como pode ser observado na Figura 49, os parâmetros geométricos L_D e d são, respectivamente, o comprimento da região plana e a espessura da casca residual, que definem a fibra de perfil D. Já D_{core} e D_{clad} são os diâmetros do núcleo e de parte da casca de uma fibra óptica monomodo padrão, respectivamente. Os parâmetros L_{ext} e D_{ext} são a espessura e a largura da camada que representa o meio externo, respectivamente. O transdutor 1 tem espessura t_1 e o transdutor 2 tem espessura t_2 . Os valores numéricos desses parâmetros estão destacados na Tabela I.

Algumas simplificações e aproximações foram feitas no modelo. Primeiramente,

Figura 49: Geometria 2D do modelo computacional para o sensor tipo I.



Fonte: O Autor, 2020.

tem-se o uso de apenas $20 \mu\text{m}$ como espessura para a casca da fibra óptica (D_{clad}), assim como no modelo da Seção 4.4, que é uma aproximação razoável, porque o comprimento de penetração da luz na casca é inferior a esse valor [33]. A segunda simplificação é a construção do filme fino metálico sobre o perfil D (elemento transdutor 1), destacado em vermelho, junto com o filme fino metálico na interface que representa a face clivada de uma fibra óptica (elemento transdutor 2), destacado em preto. Sem perda de generalidade, tal simplificação não deve causar alterações no perfil de operação do sensor, visto que cada transdutor funciona por um princípio diferente: perda por absorção e refletividade. Além disso, essa aproximação faz com que, no modelo proposto na Figura 49, os dois elementos transdutores, tanto o que faz uso da fibra óptica perfil D, quanto o que faz uso da face clivada, sejam simulados usando uma única estrutura, que implica no uso de menos recursos computacionais. Por fim, os filmes metálicos que constituem os elementos transdutores 1 e 2 são definidos apenas pelas fronteiras em destaque na Figura 49. Isso é possível através de um recurso do COMSOL denominado de *Transition Boundary Condition*, que permite definir o tipo de material metálico da fronteira e sua espessura efetiva, sem a necessidade de se definir

uma camada [164]. Trata-se de um recurso importante para o gerenciamento dos recursos computacionais, visto que a quantidade de elementos finitos pra discretizar uma fronteira é bem inferior à quantidade necessária pra discretizar um domínio (camada) [164]. Com isso, tem-se uma otimização no dos recursos computacionais para a implementação do modelo no COMSOL *Multiphysics*.

A simulação computacional funciona da seguinte forma: um sinal óptico não polarizado, com comprimento de onda $\lambda = 1550$ nm, é emitido pela extremidade esquerda da geometria plana mostrada na Figura 49, por meio de uma *Numeric Port*. Ao longo da propagação, parte da potência óptica desse sinal é absorvida pelo transdutor 1, fazendo com que nesse trecho, o índice de refração efetivo do modo de propagação ganhe uma parte imaginária [166]. Quando esse sinal óptico incide sobre o transdutor 2, uma fração desse sinal é refletida, outra absorvida e, dependendo da espessura desse filme metálico, tem-se uma fração transmitida para o meio externo [166]. Na mesma extremidade em que o sinal óptico é emitido, por meio da *Numeric Port*, o sinal óptico refletido é mensurado. Ou seja, a *Numeric Port* está configurada como emissor e receptor [164]. A medida do sinal óptico refletido é obtida a partir do parâmetro de espalhamento S_{11} [164], semelhante à medida do sinal óptico transmitido mostrada na Seção 4.4.3. Esse parâmetro corresponde ao coeficiente de reflexão [164], de modo que a reflectância R é obtida a partir da seguinte expressão

$$R = \|S_{11}\|^2 = \frac{\int_{porta1} \|\mathbf{E} - \mathbf{E}_0\|^2 dl}{\int_{porta1} \|\mathbf{E}_0\|^2 dl}, \quad (5.1)$$

em que $\mathbf{E}$ é o vetor campo elétrico medido pela *Numeric Port*, $\mathbf{E}_0$ é o vetor campo elétrico emitido e dl é um elemento de linha infinitesimal, definido na linha vertical em azul, que representa a *Numeric Port*, como mostrado na Figura 49. É importante destacar que a diferença $\mathbf{E} - \mathbf{E}_0$ na integral do numerador da expressão 5.1 é necessária, pois a detecção da *Numeric Port* considera a superposição do campo elétrico emitido com o refletido para uma mesma *Numeric Port*. De forma genérica, o campo elétrico emitido pela *Numeric Port* é definido, no COMSOL *Multiphysics*, por

$$\mathbf{E}_0(x, y, z) = \mathbf{E}_0(x, y) \exp(-jk_z z), \quad (5.2)$$

em que $\mathbf{E}_0(x, y)$ é o campo elétrico definido no plano xy e k_z é o número de onda no ma-

terial que compõe o núcleo da fibra óptica, na direção de propagação ao longo do eixo z . É importante destacar que, para a modelagem em 2D no COMSOL *Multiphysics*, a direção de propagação foi definida ao longo do eixo x , de modo que a expressão genérica (5.2) é alterada para

$$E_0(x, y, z) = E_0(y, z) \exp(-jk_x x), \quad (5.3)$$

em que $E_0(y, z)$ é o vetor campo elétrico definido no plano yz e k_x é o número de onda ao longo da direção do eixo x , onde está definido o núcleo da fibra óptica, como pode ser observado na Figura 49.

O sinal óptico refletido depende das propriedades de absorção e reflexão do meio em que se propaga e, conseqüentemente, essas propriedades dependem da presença do filme metálico sobre o perfil D e na face clivada [166]. Com isso, tem-se que à medida que a espessura desses filmes metálicos varia, simulando um processo corrosivo, pode-se associar as mudanças na reflectância à corrosão.

Como ponto de partida para a simulação do modelo da Figura 49, definiu-se dois materiais metálicos para se avaliar seu desempenho como elementos transdutores: níquel e alumínio. Tais metais possuem níveis de absorção e comprimento de penetração da luz distintos para o comprimento de onda de 1550 nm. Com isso, devem exibir respostas diferentes, do ponto de vista da perda por absorção e da refletividade, para os transdutores 1 e 2. Em relação as espessuras iniciais, o filme metálico sobre o perfil D tem 50 nm de espessura, enquanto que o filme metálico sobre a face clivada tem 100 nm de espessura. Na simulação, eles são submetidos a um processo corrosivo simultaneamente. A corrosão é simulada de tal forma que o filme metálico é removido de maneira uniforme e laminar ao longo de todo o processo. Além disso, não são considerados os produtos da corrosão. Ou seja, é usada a aproximação de que os produtos da corrosão são diluídos no meio corrosivo, como explorado em [161].

Por fim, os valores para os parâmetros ópticos e geométricos usados na modelagem são mostrados na Tabela 13. Para o uso do método dos elementos finitos, definiu-se o uma malha retangular com tamanho de elemento dado por $\lambda/16$, usado discretizar a geometria ilustrada na Figura 49.

Tabela 13: Parâmetros usados na modelagem computacional.

Descrição	Parâmetro	Valor	Referência
Comprimento do perfil D	L_D	1-6 mm	-
Espessura da casca residual	d	1-4 μm	-
Diâmetro do núcleo	D_{core}	8 μm	[128]
Espessura da casca	D_{clad}	20 μm	-
Espessura da camada do meio externo	D_{ext}	20 μm	-
Comprimento da camada do meio externo	L_{ext}	100 μm	-
Espessura do transdutor metálico 1	t_1	50 nm	-
Espessura do transdutor metálico 2	t_2	100 nm	-
Comprimento de onda	λ	1550 nm	-
Índice de refração do núcleo em $\lambda = 1550$ nm	n_{core}	1,4443	[128]
Índice de refração da casca em $\lambda = 1550$ nm	n_{clad}	1,4378	[128]
Índice de refração do meio corrosivo em $\lambda = 1550$ nm	n_{ext}	1,3	[167]
Índice de refração do níquel (Ni) em $\lambda = 1550$ nm	n_{Ni}	3,0902-j7,7167	[168]
Índice de refração do alumínio (Al) em $\lambda = 1550$ nm	n_{Al}	1,5137-j15,234	[168]

5.1.2 Modelo Numérico 3D

Nesta seção, é apresentada uma modelagem computacional para o elemento sensor tipo I, através de uma geometria 3D cilíndrica. A estrutura do modelo é mostrada na Figura 50. Além de possibilitar uma validação para o modelo apresentado na Seção 5.1.1, que faz uso de uma geometria 2D retangular para definir o elemento sensor tipo I, a modelagem em 3D traz os artifícios necessários para simulações mais robustas no COMSOL *Multiphysics*. O módulo *Wave Optics* também é usado como base para esta modelagem. No entanto, a interface de ondas eletromagnéticas no domínio da frequência (*EWFD - Electromagnetic Waves Frequency Domain*), usada no modelo 2D, é substituída pela interface de ondas eletromagnéticas em envelope de feixes (*EWBE - Electromagnetic Waves Beam Enveloped*), que pode ser utilizada em algumas simulações em que as dimensões do modelo são muito maiores que o comprimento de onda.

A equação de onda que governa a interface de *Electromagnetic Waves Beam Enveloped* é dada por

$$(\nabla - j\nabla\phi_1) \times \mu_r^{-1}((\nabla - j\nabla\phi_1) \times \mathbf{E1}) - k_0^2 \left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0} \right) \mathbf{E1} = \mathbf{0}, \quad (5.4)$$

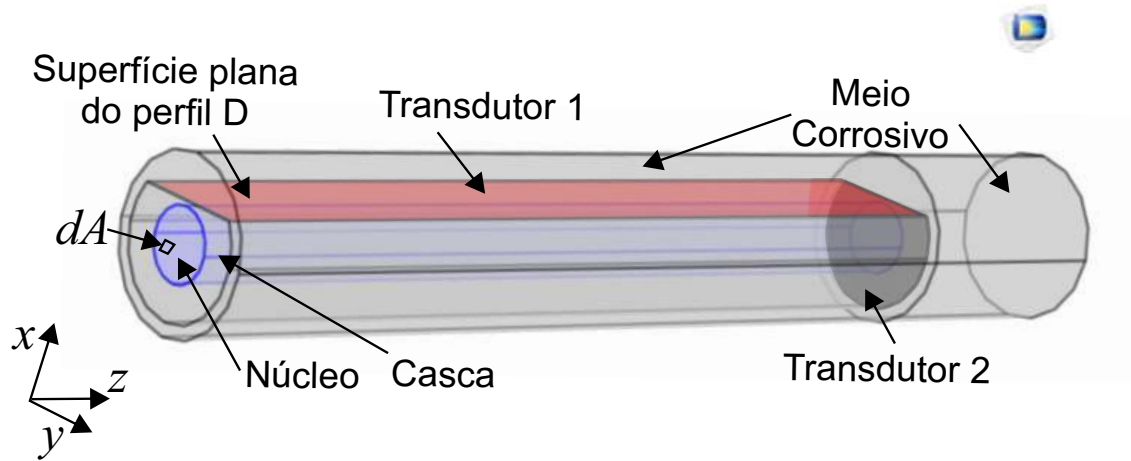
em que μ_r é a permeabilidade magnética relativa, ε_r é a permissividade elétrica relativa, ε_0 é a permissividade elétrica no vácuo, σ é a condutividade elétrica, ω é a frequência angular da onda eletromagnética, k_0 é o número de onda no vácuo, ϕ_1 é a função de fase, em que $\mathbf{k}$ é o vetor de onda, e $\mathbf{E1}$ é a variável dependente, que é resolvida pela interface *EWBE* [164]. É importante destacar que a equação (5.4) foi obtida a partir da equação de Helmholtz [169] para um campo elétrico $\mathbf{E}$ definido por

$$\mathbf{E} = \mathbf{E1} \exp(-j\phi_1), \quad (5.5)$$

em que $\phi_1(\mathbf{r}) = \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$ é a função de fase. Para uso da interface *EWBE*, é necessário um *ansatz* para a função de fase ϕ_1 ou, de forma mais específica, para o vetor de onda $\mathbf{k}$ em cada domínio que compõe a geometria do modelo. Com isso, a interface *EWBE* fica responsável de resolver a equação (5.4) apenas para a variável $\mathbf{E1}$. Deve-se notar que, com essa abordagem, tem-se que a oscilação rápida, dada pela função fase ϕ_1 , é fatorada fora do campo $\mathbf{E}$, de modo que apenas a oscilação lenta, dada por $\mathbf{E1}$, chamada de onda envoltória ou envelope (que dá origem ao termo *enveloped*), precisa ser resolvida [164]. Com a fase fatorada fora do campo, desde que o *ansatz* para o vetor de onda esteja correto, não se tem a necessidade de resolver o modelo em *EWBE* para o comprimento de onda, ou seja, utilizando malhas com tamanho de elemento finito suficientemente pequeno (tipicamente da ordem de $\lambda/6$, em que λ é o comprimento de onda) para discretizar as oscilações rápidas. Isso permite abordagens para modelos com dimensões muito maiores que o comprimento de onda, que precisariam de uma grande quantidade de elementos finitos, com os requisitos de malha sendo significativamente relaxados, ou seja, usando elementos finitos com tamanho superior ao usado tipicamente para uma modelagem por *EWFD*. É importante destacar que, caso o *ansatz* para o vetor de onda não esteja correto, ou não seja uma boa aproximação, poderá ser necessário reduzir os elementos de malha até os tamanhos usados em *EWFD*, onde o uso da interface de *EWBE* deixa de fazer sentido.

Na Figura 50, estão destacadas as estruturas do núcleo e da casca da fibra óptica, a camada externa que representa o meio corrosivo e a superfície plana do perfil D. Os transdutores 1 e 2 também são mostrados. Eles foram definidos, assim como na seção anterior, fazendo uso de uma *Transition Boundary Condition*, que permite reduzir uma dimensão do modelo para definir os filmes finos. Ou seja, para o modelo em 3D, os filmes finos são definidos por superfícies, que têm duas dimensões (2D).

Figura 50: Geometria 3D do modelo computacional para o sensor tipo I.



Fonte: O Autor, 2020.

Nesta modelagem, o sinal óptico é representado por um feixe gaussiano, que é uma boa aproximação para o modo de propagação fundamental de uma fibra óptica monomodo [170]. Esse sinal é emitido pela extremidade esquerda do modelo da Figura 50, na direção do eixo z , a partir de um recurso do COMSOL denominado de *Scattering Boundary Condition*, com o campo elétrico $\tilde{\mathbf{E}}_0$ definido na forma de uma matriz coluna por

$$\tilde{\mathbf{E}}_0 = \begin{bmatrix} E_0^x \\ E_0^y \\ E_0^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1/\sqrt{2}) \exp(-(r/w_0)^2) \\ (1/\sqrt{2}) \exp(-(r/w_0)^2) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

em que E_0^x , E_0^y e E_0^z são as componentes x , y e z do vetor campo elétrico $\tilde{\mathbf{E}}_0$, respectivamente, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ é a coordenada cilíndrica e w_0 o raio modal [171], que é definido por

$$w_0 = \left(\frac{D_{core}}{k_0 n_{core} \sqrt{2\Delta n}} \right)^{1/2}, \quad (5.7)$$

com

$$\Delta n = \frac{n_{core}^2 - n_{clad}^2}{2n_{core}^2}, \quad (5.8)$$

em que D_{core} é o diâmetro do núcleo da fibra óptica, n_{core} e n_{clad} são os índices de refração do núcleo e das casca, respectivamente, e $k_0 = 2\pi/\lambda$ é o número de onda no vácuo. Esses parâmetros são mostrados na Tabela 13.

A medida da intensidade do sinal óptico refletido também é dada pela reflectância R , obtida a partir do parâmetro de espalhamento S_{11} , definida por

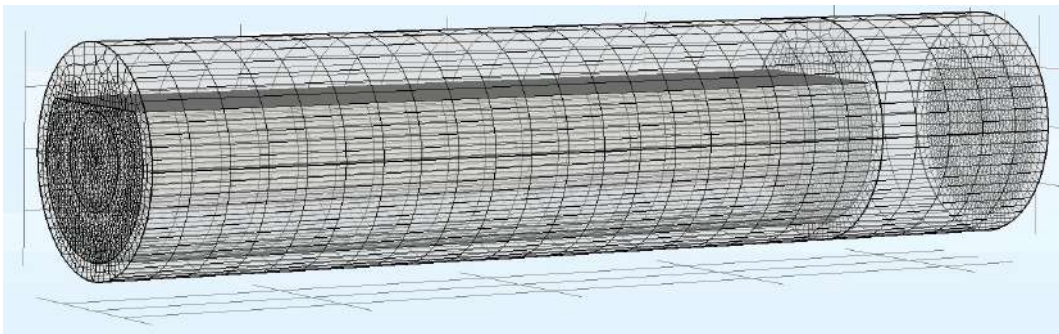
$$R = \|S_{11}\|^2 = \frac{\int_{porta1} \|\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{E}}_0\|^2 dA}{\int_{porta1} \|\tilde{\mathbf{E}}_0\|^2 dA}, \quad (5.9)$$

em que $\mathbf{E}$ é o campo elétrico resultante da soma do campo elétrico incidente e emitido a partir da extremidade esquerda da geometria de fibra óptica, mostrada na Figura 50, $\tilde{\mathbf{E}}_0$ é o campo elétrico do sinal óptico emitido, definido em (5.6), e dA é um elemento infinitesimal de superfície, definido sobre a superfície que representa a face esquerda da estrutura de fibra óptica com perfil D.

Para a discretização da estrutura da Figura 50, foi usado uma malha triangular com elemento finito de tamanho $\lambda/4$, aplicada sobre as faces circulares que representam a seção transversal. O comprimento da estrutura foi discretizado usando uma malha do tipo *swept*, que divide a estrutura em 20 cortes transversais. Na Figura 51 é mostrada a geometria discretizada por essa malha. É importante destacar a redução no tamanho dos elementos finitos fazendo uso do *EWBE*, visto que no modelo 2D da seção anterior foi necessário usar elementos com tamanho de $\lambda/16$.

Por fim, a simulação do processo de corrosão dos transdutores 1 e 2 ocorre da mesma maneira descrita na Seção 5.1.1. Também são usados os mesmos parâmetros ópticos e geométricos do modelo 2D, exibidos na Tabela 13.

Figura 51: Discretização do modelo 3D para o elemento sensor tipo I.

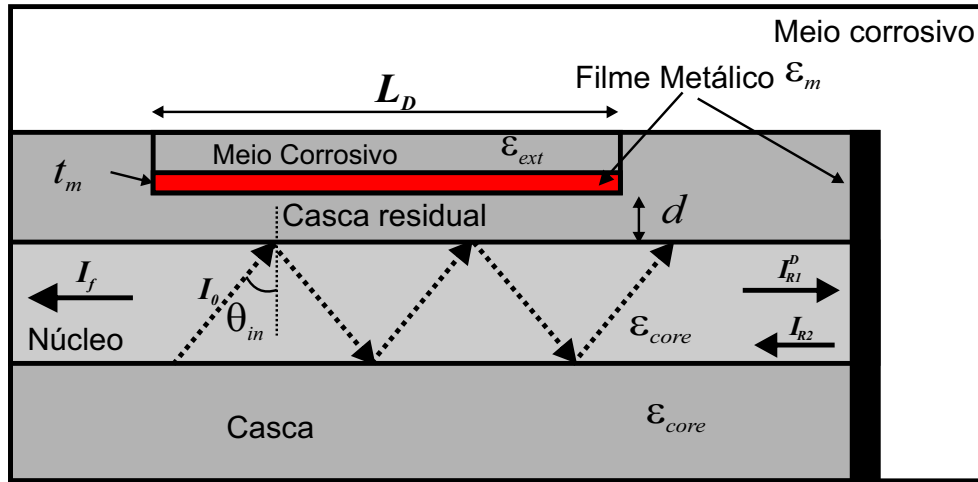


Fonte: O Autor, 2020.

5.1.3 Modelo Analítico

O modelo analítico apresentado nesta seção tem como objetivo corroborar com a análise dos resultados obtidos pela modelagem numérica no COMSOL *Multiphysics*. Isso porque ele é construído com base na teoria de Fresnel para reflexão e transmissão de feixes de luz em meios transparentes e absorvedores [172]. A Figura 52 ilustra esse modelo de Fresnel aplicado à estrutura do sensor tipo I, com permissividade elétrica do núcleo, casca, filme metálico e meio externo representadas, respectivamente, por ϵ_{core} , ϵ_{clad} , ϵ_m e ϵ_{ext} . Os parâmetros geométricos d , D_{core} , t_m e L_D são os mesmos definidos no modelo construído no COMSOL *Multiphysics* e mostrados na Tabela 13.

Figura 52: Esquema do elemento sensor tipo I para auxiliar o modelo analítico.



Fonte: O Autor, 2020.

Inicialmente, é considerada a reflexão de um feixe de luz, de intensidade I_0 , devido à incidência no sistema de multicamadas, composto por núcleo/casca residual/filme metálico/meio corrosivo, que fornece o feixe refletido de intensidade $I_{R1} = R_1 I_0$, em que R_1 é a reflectância desse sistema de multicamadas. Com isso, são consideradas as múltiplas reflexões atenuadas, geradas ao longo do trecho de comprimento L_D , que é o comprimento do sistema multicamada e que representa o transdutor 1 dos modelos numéricos [172]. Essas múltiplas reflexões atenuadas alteram a intensidade desse feixe para $I_{R1}^D = R_1^\rho I_0$, em que ρ é o número de reflexões atenuadas. Com isso, esse feixe incide no segundo sistema multicamadas, dado por núcleo/filme metálico/meio corrosivo, que representa o transdutor 2 do modelo numérico. O feixe refletido por esse sistema tem intensidade $I_{R2} = R_2 I_{R1}^D$, em que R_2 é a reflectância desse sistema de multicamadas. Com isso, se obtém $I_{R2} = R_2 R_1^\rho I_0$. Esse feixe

refletido é direcionado, mais uma vez, para o primeiro sistema de multicamadas, em que, devido as múltiplas reflexões atenuadas, se obtém um feixe refletido de intensidade $I_f = R_1^\rho I_{R_2}$. Logo, $I_f = R_1^\rho R_2 R_1^\rho I_0$. Portanto, a partir da razão entre a intensidade desse feixe refletido final e a intensidade do feixe inicial, tem-se a reflectância final, que equivale à reflectância obtida no modelo numérico, dada por

$$R_f = \frac{I_f}{I_0} = \frac{R_1^\rho R_2 R_1^\rho I_0}{I_0} = R_1^{2\rho} R_2 \quad (5.10)$$

A reflectância do primeiro sistema multicamadas é obtida a partir dos coeficientes de reflexão de Fresnel, calculados da seguinte forma [172]:

$$R_1 = \|r_{1234}\|^2, \quad (5.11)$$

em que r_{1234} representa o coeficiente de reflexão para o sistema de 4 camadas: 1 - núcleo, 2 - casca residual, 3 - filme metálico, 4 - meio corrosivo, determinado por

$$r_{1234} = \frac{r_{12} + r_{234} \exp(jk_{z2}d)}{1 + r_{12}r_{234} \exp(jk_{z2}d)} \quad (5.12)$$

com

$$r_{234} = \frac{r_{23} + r_{34} \exp(jk_{z3}t_m)}{1 + r_{23}r_{34} \exp(jk_{z3}t_m)} \quad (5.13)$$

e

$$r_{ij} = \frac{\varepsilon_j k_{zi} - \varepsilon_i k_{zj}}{\varepsilon_j k_{zi} + \varepsilon_i k_{zj}}, i \neq j. \quad (5.14)$$

Componente do vetor de onda k_{zi} no eixo z e paralela à camada i é dada por

$$k_{zi} = k_0 [\varepsilon_i - \varepsilon_1 \sin^2 \theta_{in}]^{1/2}, \quad (5.15)$$

em que k_0 é o número de onda no vácuo e θ_{in} é o ângulo de incidência do feixe no primeiro sistema multicamadas. O número de reflexões atenuadas é obtido a partir da expressão

$$\rho = \frac{L}{D_{core} t g \theta_{in}}. \quad (5.16)$$

Para o segundo sistema multicamadas, tem-se que

$$R_2 = \|r_{123}\|^2, \quad (5.17)$$

em que r_{123} é o coeficiente de reflexão para o sistema núcleo/filme metálico/meio corrosivo, dado por

$$r_{123} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(jk_{z2}t_{m2})}{1 + r_{12}r_{23} \exp(jk_{z2}t_{m2})} \quad (5.18)$$

com r_{ij} e k_{zi} definidos em (5.14) e (5.15), respectivamente. Portanto, a partir de (5.11), (5.17) e (5.16), é calculada a reflectância R_f em (5.10).

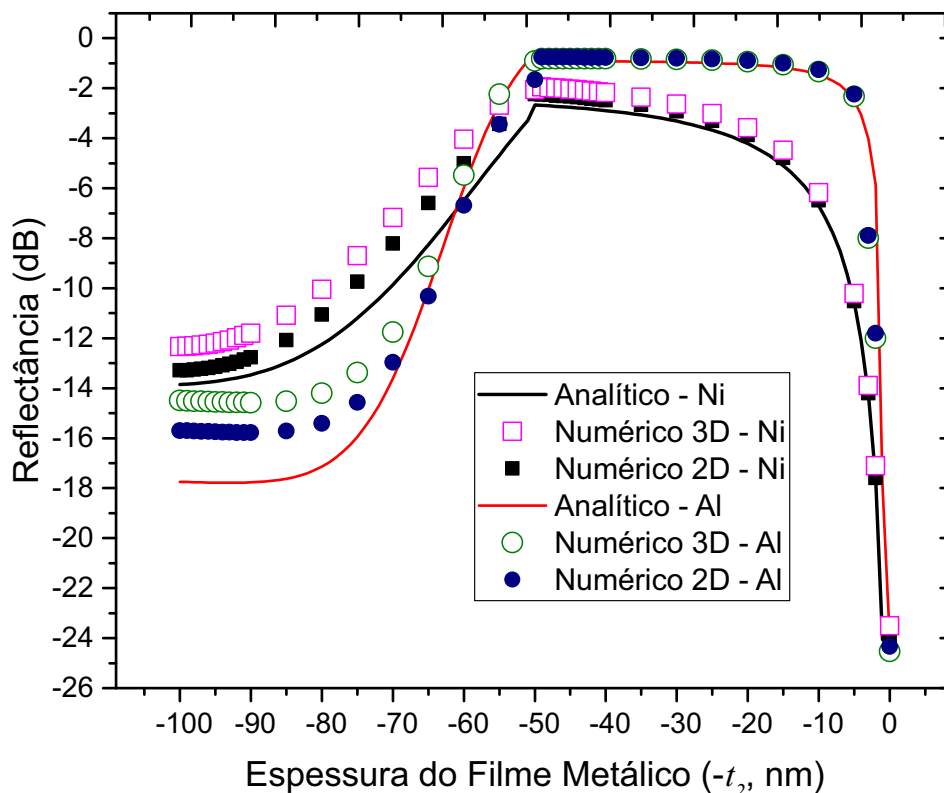
5.2 RESULTADOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SENSOR DE CORRO-SÃO TIPO I

Os resultados obtidos para o sensor de corrosão tipo I, através dos modelos numéricos 2D e 3D e modelo analítico, descritos na Seção 5.1, são mostrados no gráfico da Figura 53, na forma de curvas de reflectância em função da espessura do filme metálico mais espesso (do transdutor 2 com espessura t_2), para os dois metais avaliados como elementos transdutores: alumínio e níquel. Inicialmente, o filme metálico sobre o perfil D tem espessura de $t_1 = 50$ nm (transdutor 1), enquanto que o filme metálico sobre a face clivada tem espessura de $t_2 = 100$ nm (transdutor 2). Na simulação, ambos são submetidos a um processo de corrosão simultânea. Devido a quantidade de informações no gráfico da Figura 53, a análise dos resultados é feita por partes. Primeiramente, destaca-se o mesmo comportamento das curvas obtidas para cada modelo, com suas devidas discrepâncias. Como referência, é adotado o modelo numérico 3D, que apresenta as mesmas formas geométricas de uma estrutura real de fibra óptica com perfil D. Deve-se notar a boa aproximação entre os valores de reflectância obtidos por esse modelo e com o modelo numérico 2D. Nota-se, ainda, que a reflectância medida com o modelo numérico 2D é um pouco menor que a reflectância medida com o modelo numérico 3D, para a primeira faixa de variação da reflectância. Isso pode estar relacionado à interação da onda evanescente com o metal sobre o perfil D, que compõe o transdutor 1. Isso porque, no modelo 2D, essa interação é definida nas interfaces núcleo/casca residual/perfil D metalizado, no corte central ($z = 0$) que representa a seção longitudinal. Já na estrutura definida para o modelo numérico 3D, existe uma menor interação da onda evanescente com

o material transdutor, pois também são incluídas as regiões periféricas definidas para $z > 0$ e $z < 0$, que formam um cone de interação, de modo que a separação efetiva entre a onda evanescente e o metal transdutor é maior para o modelo 3D em comparação com o modelo 2D. Ou seja, para o modelo 3D tem-se uma espessura efetiva para a casca residual d_{eff} , tal que $d_{eff} > d$, em que d é a espessura da casca residual para o modelo 2D. Com isso, no modelo 3D, uma menor fração dessa onda evanescente deve ser absorvida pelo metal transdutor sobre o perfil D. No entanto, por essa diferença ser pequena, com erro relativo máximo de aproximadamente 7%, indica que a interação mais significativa da onda evanescente com o elemento transdutor 1 ocorre em $z = 0$, como esperado. Para o modelo analítico, considera-se que a discrepância observada na primeira faixa de variação da reflectância, em relação aos resultados numéricos, é esperada, visto que esse modelo faz aproximações da estrutura física do sensor à fibra óptica por sistemas de multicamadas. Além disso, especificamente para o transdutor 1, existe uma dependência do modelo analítico com o ângulo de incidência do feixe no sistema de multicamadas, que representa o ângulo de incidência da luz na casca da fibra óptica. Por se tratar de um modelo simples, foi considerado apenas um único ângulo de incidência, enquanto que numa situação mais precisa deve-se considerar uma faixa angular, em que cada feixe incide com ângulo e intensidade diferente [173]. No entanto, como o objetivo da implementação desse modelo foi apenas de contribuir com a compreensão dos resultados obtidos pela simulação numérica, essa abordagem simplificada é suficiente. Para a segunda faixa de variação da reflectância, todos os modelos apresentam uma convergência para aproximadamente uma mesma resposta. É um resultado interessante, que indica que o problema de incidência normal do sinal óptico numa superfície refletora é mais simples de ser resolvido, de modo que até um modelo analítico simples pode fornecer uma solução bem aproximada.

Em relação à modulação do sinal óptico por cada elemento transdutor, destacada na idealização do sensor de corrosão, tem-se que a primeira faixa de variação, que ocorre o aumento da reflectância, é devida à corrosão do transdutor 1, que reduz a perda por absorção devida ao material metálico, que aumenta a intensidade do sinal óptico refletido ou transmitido na estrutura, corresponde à modulação desse transdutor. Para o transdutor 2, sua modulação é representada na segunda faixa de variação, que ocorre a redução da reflectância devido à corrosão do filme metálico sobre a face clivada da fibra óptica, que reduz as propriedades de refletividade da interface fibra/metal. Como destacado anteriormente, ambos

Figura 53: Reflectância em função da espessura total dos transdutores do sensor tipo I.



Fonte: O Autor, 2020.

os transdutores 1 e 2 corroem ao mesmo tempo. No entanto, como a reflectância só é alterada devido a corrosão do segundo transdutor para espessuras a partir de 50 nm, atribuí-se o intervalo de crescimento da reflectância apenas à modulação do transdutor 1. Com isso, as duas modulações presentes na curva de reflectância, que representa a corrosão dos elementos transdutores 1 e 2, fornecem um sensor de corrosão com duas faixas de operação. Além disso, para cada faixa de operação, é possível obter a taxa de corrosão, pois é possível identificar na curva da reflectância o ponto de transição que representa a corrosão total do transdutor 1 e início da corrosão do transdutor 2. Como a espessura de cada transdutor é definida na construção do sensor, sabendo-se o intervalo de tempo necessário para a corrosão de cada transdutor, a razão entre a espessura e esse intervalo de tempo define a taxa de corrosão. É importante destacar que a primeira taxa de corrosão é obtida ao longo do processo de monitoramento, devido o ponto de transição destacado anteriormente. Isso é uma vantagem em relação ao sensor proposto em [10, 11], que fornece a taxa de corrosão uma única vez, após o fim do processo de monitoramento.

Ainda sobre as curvas da Figura 53, pode-se observar que o uso de um filme de níquel apresenta uma maior faixa de detecção da corrosão, visto que ao longo de toda a

variação da espessura, percebe-se variações na reflectância. Já o uso de um filme de alumínio apresenta regiões do gráfico em que a reflectância é praticamente constante ao longo da diminuição da espessura desse filme metálico. Isso implica que o sensor que faz uso do níquel em seus transdutores deverá detectar a corrosão primeiro que um sensor que faz uso do alumínio. De acordo com [24], esse comportamento se deve ao comprimento de penetração da luz no níquel ser maior que no alumínio. Para o comprimento de onda de 1550 nm, obtém-se o comprimento de penetração de 32 nm para a luz no níquel e de 16 nm para a luz no alumínio [168]. Definindo o tamanho do intervalo de valores de espessura que se observa crescimento e decrescimento da reflectância, como as faixas de operação Δw_+ e Δw_- , respectivamente, na Tabela 14, são apresentadas as faixas de operação para o sensor de corrosão que faz uso de filmes fino de níquel e alumínio como materiais transdutores.

Tabela 14: Faixa de operação do sensor de corrosão tipo I.

Material Metálico	Δw_+	Δw_-
Níquel	50 nm	50 nm
Alumínio	30 nm	10 nm

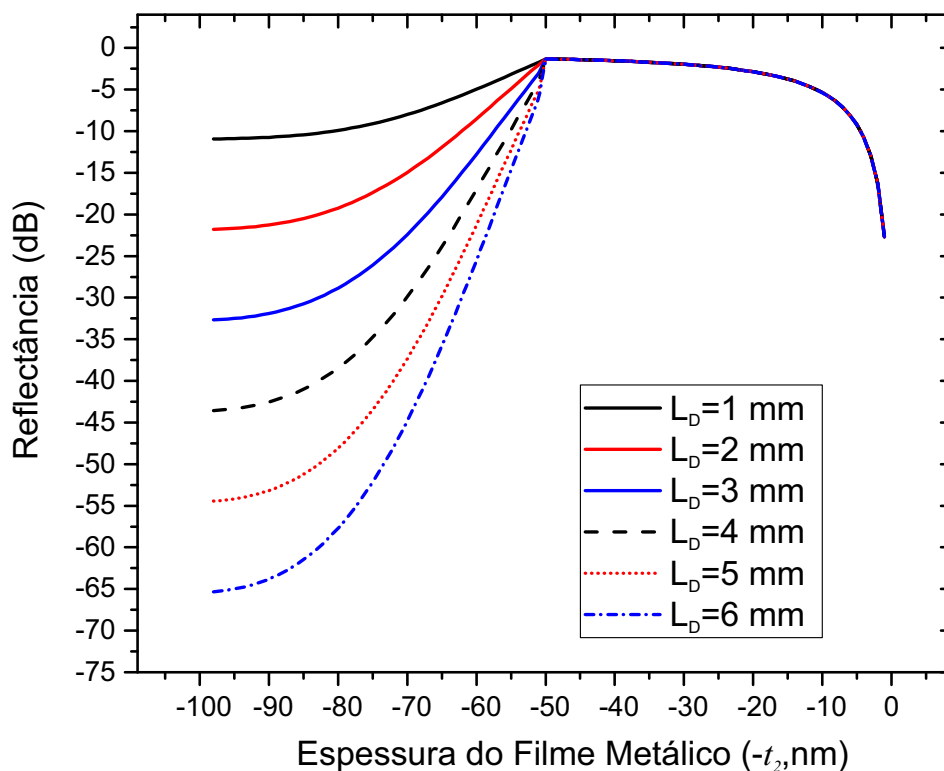
De acordo com os resultados mostrados na Figura 53, o modelo numérico 2D é uma boa aproximação para o modelo numérico 3D, como destacado em [14]. Além disso, o uso do filme fino de níquel como material transdutor proporciona uma maior faixa de operação para o sensor e permite detectar a corrosão mais rapidamente, quando comparado com o filme fino de alumínio. Neste sentido, algumas explorações da influência dos parâmetros geométricos que definem a fibra óptica com perfil D usada no sensor tipo I, que usa níquel como material transdutor, são apresentadas a seguir, usando como base o modelo numérico 2D.

5.2.1 Explorações Adicionais

A Figura 54 mostra a influência do comprimento da região plana do perfil D, L_D , que é metalizada com o filme fino de níquel com 50 nm de espessura, para compor o transdutor 1 do sensor de corrosão. A espessura da casca residual foi mantida em $d = 1,5 \mu\text{m}$, como nas simulações que geraram os resultados da Figura 53. A configuração do transdutor 2 foi mantida a mesma, com 100 nm de espessura para o filme de níquel, visto que apenas a espessura desse metal sobre a face clivada da fibra óptica influencia na modulação do

transdutor 2. Além disso, essa espessura fornece a faixa de operação $\Delta w_- = 50$ nm, que foi o maior valor obtido nas simulações com material metálico sobre a face clivada. Como pode ser observado no gráfico da Figura 54, quanto maior o comprimento do perfil D metalizado, maior a variação da reflectância ao longo da corrosão do transdutor 1, ou seja, maior a sensibilidade do sensor. No entanto, observa-se que a faixa de operação $\Delta w_+ = 50$ nm se mantém constante.

Figura 54: Influência do comprimento do perfil D metalizado na resposta do sensor tipo I.

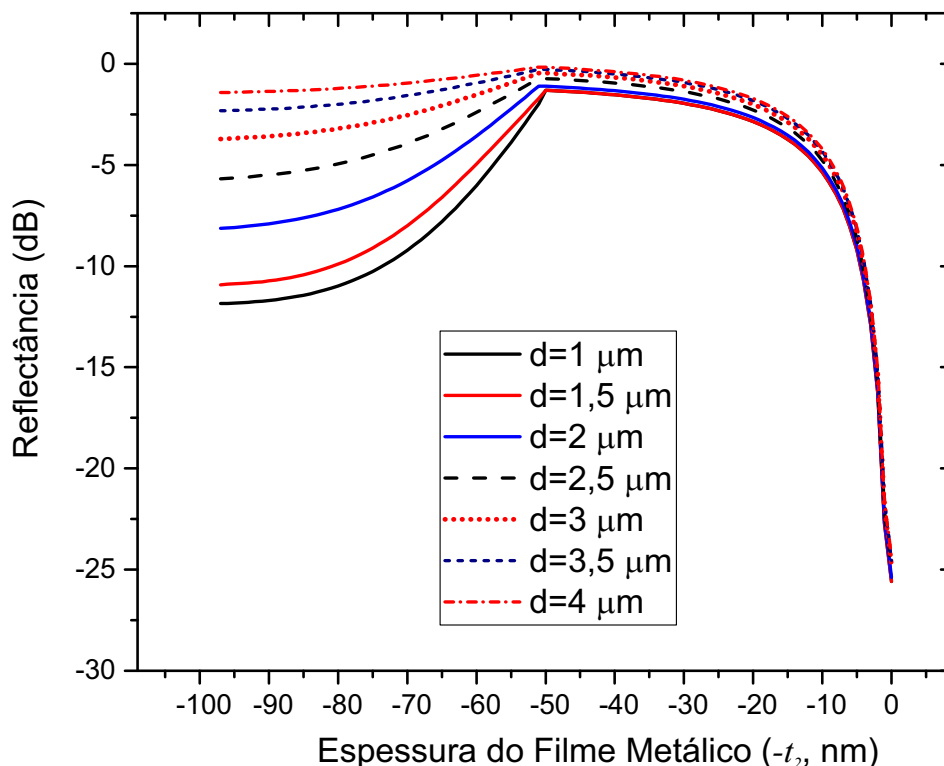


Fonte: O Autor, 2020.

A influência da espessura da casca residual, d , na resposta do sensor de corrosão, é mostrada na Figura 55. O comprimento do perfil D metalizado foi mantido em $L_D = 1$ mm. Como pode ser observado, quanto maior a espessura da casca residual, menor é a variação da reflectância ao longo do processo de corrosão do transdutor 1. Consequentemente, pode-se perder uma das faixas de operação do sensor, como observado para a curva gerada com $d = 4$ μ m, que basicamente só é detectada a corrosão do transdutor 2. No entanto, assim como observado nos resultados da Figura 54, para os valores de d que se observa variação da reflectância à medida que a espessura do transdutor 1 é reduzida (corrosão), a faixa de operação $\Delta w_- = 50$ nm também é mantida constante.

Portanto, com base nesses resultados, para a construção do sensor de corrosão tipo

Figura 55: Influência da espessura da casca residual na resposta do sensor tipo I.

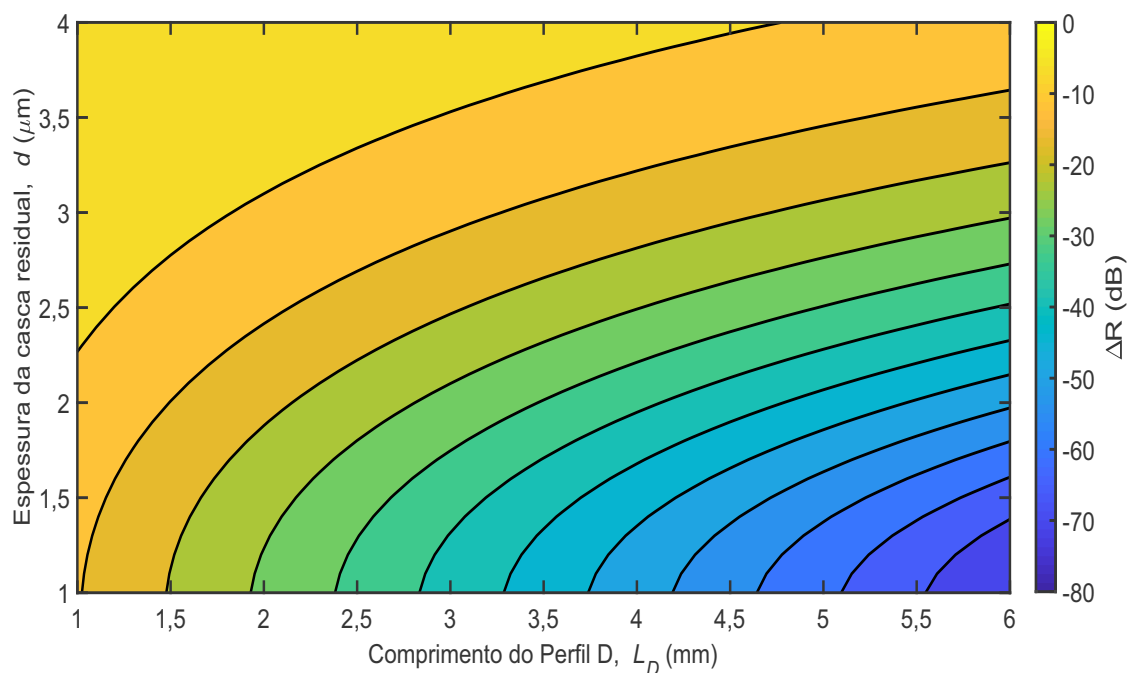


Fonte: O Autor, 2020.

1, deve-se considerar que a faixa de operação do sensor será determinada e limitada pela espessura do filme fino de níquel. Além disso, uma faixa dinâmica para a variação da reflectância, devido à corrosão do transdutor 1, pode ser definida com base nos parâmetros L_D e d . Isso é observado na Figura 56, que mostrada uma generalização para a influência dos parâmetros L_D e d na variação total, ΔR , medida para a reflectância após a corrosão completa do filme fino de níquel, com 50 nm de espessura, sobre o perfil D (transdutor 1). Com isso, dependendo da faixa de detecção do sistema de medição da intensidade do sinal óptico refletido, pode-se definir o ΔR apropriado para esse sistema apenas com a escolha dos parâmetros L_D e d . Por exemplo, num sistema de medição com 60 dB de faixa de detecção, fazer uso do sensor 1 exibindo $\Delta R = 80$ dB pode implicar na saturação desse sistema, de modo que a corrosão será detectada apenas em momento posterior ao seu início, quando o sistema sair da saturação.

Na Figura 57, é mostrada a distribuição de potência óptica da luz guiada na estrutura de fibra óptica de perfil D modelada no COMSOL *Multiphysics*. Na Figura 57(a), é mostrado o resultado da modelagem em 3D, e na Figura 57(b) é mostrado o resultado da modelagem em 2D. Essa distribuição de potência foi obtida para o ponto de máximo da curva da re-

Figura 56: Curvas de nível para a variação total da reflectância ΔR em função do comprimento do perfil D metalizado e da espessura da casca residual.

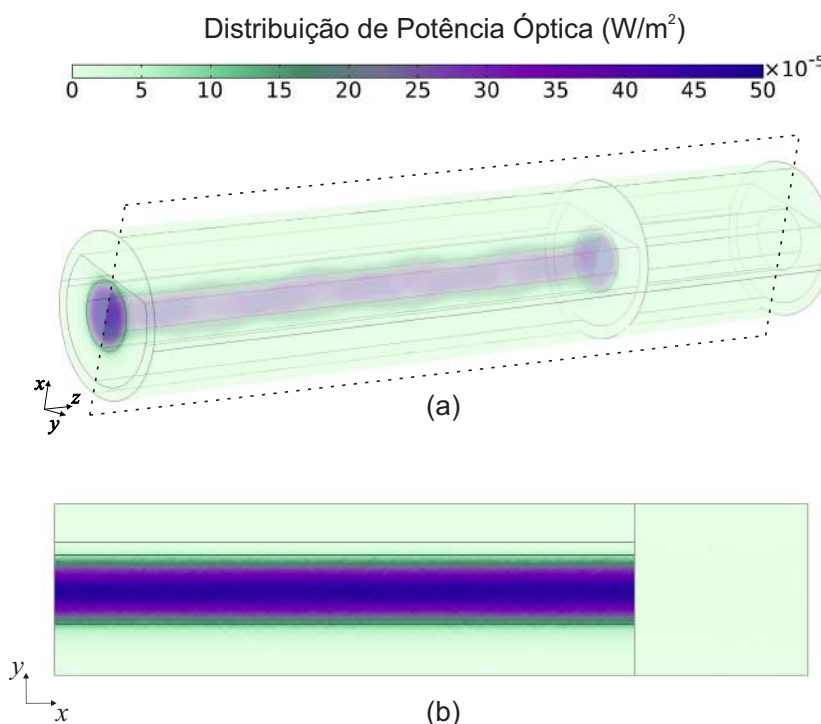


Fonte: O Autor, 2020.

flectância da Figura 53, em que o transdutor sobre o perfil D foi completamente removido pela corrosão, restando apenas o filme metálico sobre a face clivada com 50 nm de espessura. Devido essa espessura, nenhuma luz é transmitida para o meio externo. Deve-se notar a concordância entre os modelos 3D e 2D para a representação da distribuição de potência óptica, com o modelo 2D representando o corte longitudinal indicado pelo plano tracejado na representação em 3D.

Por fim, é importante destacar que na modelagem computacional proposta nesta seção, o índice de refração dos metais foi obtido a partir do modelo de Drude para a permissividade elétrica dos metais [174]. Nesse modelo, não são considerados possíveis efeitos de espessura na permissividade de filmes finos metálicos com espessuras abaixo de 10 nm, onde esses filmes fino são tratados como ultrafinos [175]. Tais efeitos são observados em nanopartículas metálicas (ou coloides), com diâmetro inferior a 10 nm, que exigem correções no modelo para a função permissividade [176]. Ou seja, ao longo de toda a corrosão dos filmes metálicos que compõem os transdutores do sensor óptico modelado, a permissividades elétrica de cada metal é mantida constante e, conseqüentemente, o índice de refração de cada metal também é mantido constante. Essa abordagem também é utilizada na Seção 5.3.

Figura 57: Distribuição de potência óptica (a) para o modelo 3D; (b) para o modelo 2D.



Fonte: O Autor, 2020.

5.3 SENSOR TIPO II - FILME FINO ESTRUTURADO

Com base nos resultados obtidos para o sensor de corrosão tipo I, que possui duas faixas de operação e, conseqüentemente, permite obter a taxa de corrosão duas vezes, devido o ponto de transição observado nas curvas da reflectância em função da espessura (Figura 53), nesta seção, é apresentada uma configuração aprimorada para o sensor de corrosão, denominado de sensor tipo II. Para esse sensor, será possível definir vários pontos de transição para a curva da reflectância, que permitem ampliar a faixa de operação do sensor e obter a taxa de corrosão várias vezes até a corrosão completa de todos os seus elementos transdutores.

A Figura 58 ilustra a estrutura do sensor tipo II, que é formado por uma fibra óptica de perfil D que está metalizado com um filme fino estruturado na forma de uma escada. Os parâmetros geométricos que caracterizam esse elemento sensor estão destacados na Figura 58, em que L_D e d são o comprimento do perfil D e espessura da casca residual, respectivamente. A estrutura da escada é definida pelo número n de degraus, o comprimento L_S e i -ésima altura h_i , com $i = 1, \dots, n$, de cada degrau. Para a ilustração da Figura 58, tem-se $n = 3$. A ideia é que esse tipo de elemento sensor indique os pontos de transição da corrosão

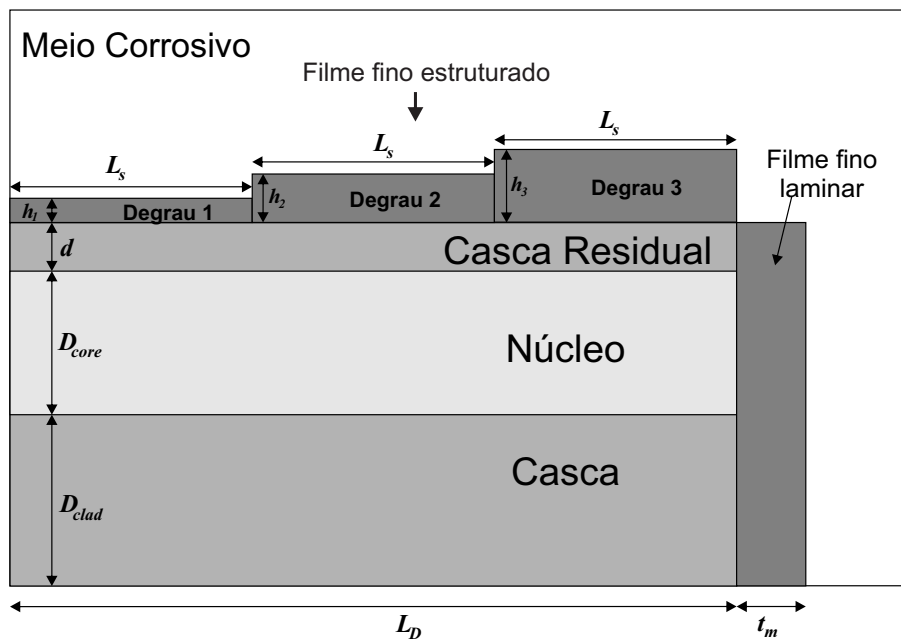
de cada degrau. Com isso, sabendo a altura do degrau e o tempo necessário para sua corrosão, pode-se estimar a taxa de corrosão à medida que cada degrau for completamente corroído. Com a modelagem computacional, os valores para a quantidade, altura e comprimento dos degraus, que otimizam o desempenho desse elemento sensor são obtidos.

Ainda na Figura 58, deve-se notar que também é explorado o uso da face clivada metalizada como elemento transdutor, assim como para o sensor tipo I. A espessura t_m do filme metálico é definida de tal forma que esse elemento transdutor atue como último detector do processo corrosivo (também fornecendo a taxa de corrosão), após a estrutura em escada sobre o perfil D ser completamente corroída. Para isso, define-se $t_m = h_n + t_{ef}$, em que h_n é a altura do último degrau da estrutura em escada (degrau mais alto) e t_{ef} é uma espessura efetiva, que permite detectar o processo corrosivo a partir das alterações na intensidade do sinal óptico refletido. Como visto para o sensor tipo I, fazendo uso de um filme fino de níquel, essa espessura é de 50 nm.

5.3.1 Modelagem Computacional para o Sensor Aprimorado

A modelagem computacional proposta nesta seção segue a mesma abordagem dos modelos numéricos 2D, apresentados ao longo desta Tese de Doutorado, para a seção longitudinal de uma fibra óptica com perfil D. A geometria 2D do modelo implementado é

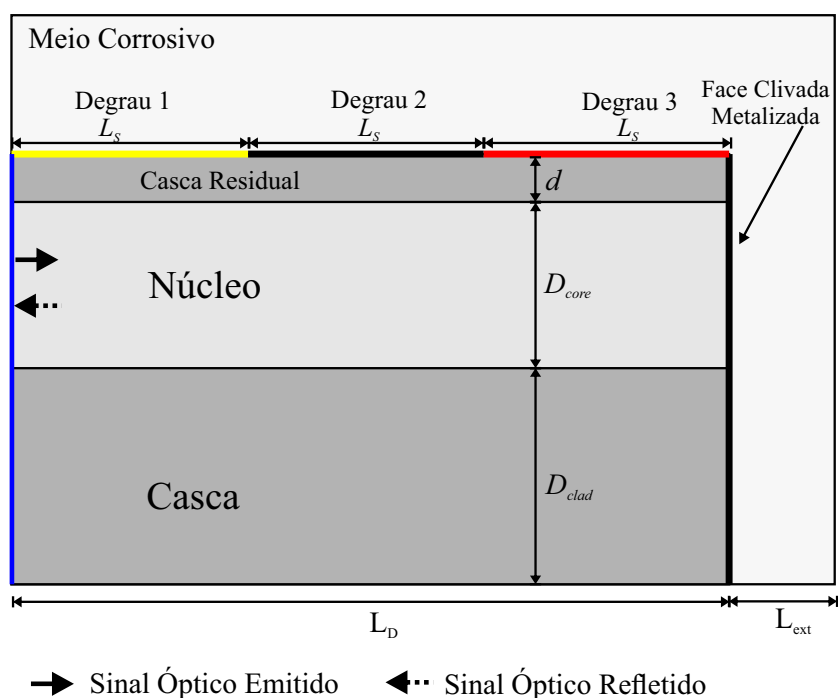
Figura 58: Esquema simplificado do sensor tipo II.



Fonte: O Autor, 2020.

mostrada na Figura 59, em que as camadas que definem o núcleo, a casca, a casca residual e o meio corrosivo estão destacadas. Os filmes metálicos que constituem os elementos sensores descritos na Seção 5.3, são definidos apenas pelas fronteiras em destaque na Figura 59, em que os degraus 1-3 definem a estrutura da escada. Isso é possível através do recurso do COMSOL *Multiphysics* denominado de *Transition Boundary Condition*, já destacado anteriormente, que permite definir o tipo de material metálico da fronteira e sua espessura efetiva, sem a necessidade de se definir uma camada [164].

Figura 59: Geometria 2D para o modelo computacional do sensor de corrosão tipo II.



Fonte: O Autor, 2020.

Na simulação, um sinal óptico com comprimento de onda $\lambda = 1550$ nm é emitido através da extremidade esquerda da geometria 2D mostrada na Figura 59. Dois perfis de sinais ópticos, não-polarizado e polarizado, são simulados para avaliar o desempenho do sensor tipo II. Definindo a extremidade esquerda da estrutura 2D como uma *Numeric Port* [164], configurada como emissor, um sinal óptico não-polarizado é estabelecido no núcleo da estrutura. Para a simulação de um sinal óptico polarizado, como utilizado em [14], é conveniente substituir a *Numeric Port* por uma *Scattering Boundary Condition*, que faz uso de um campo elétrico para definir o perfil do sinal óptico e estabelecer um modo de propagação a partir da diferença de índices de refração do núcleo e da casca da fibra óptica [14]. Esse campo elétrico está definido na expressão (5.19), que é análoga à expressão

definida em (5.6), que modela o sinal óptico por um feixe gaussiano, com adaptações para a modelagem em 2D.

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} E_0^x \\ E_0^y \\ E_0^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \exp(-(y/w_0)^2) \\ \sin \theta \exp(-(y/w_0)^2) \end{bmatrix}, \quad (5.19)$$

em que E_0^x , E_0^y e E_0^z são as componentes x , y e z do campo elétrico emitido $\tilde{E}_0$, respectivamente, e $w = D_{core}/2$ é a largura do feixe gaussiano. θ é o ângulo de polarização, em que $\theta = 0^\circ$ corresponde à polarização P, com o campo elétrico definido no plano xy (plano de modelagem), que gera o modo de propagação TM e $\theta = 90^\circ$ corresponde à polarização S, com campo elétrico fora do plano xy , que gera modo de propagação TE [14].

A medida da reflectância do sinal óptico não-polarizado, pela *Numeric Port*, é realizada através da expressão (5.1), com base no parâmetro de espalhamento S_{11} . Para a reflectância do sinal óptico polarizado, a reflectância R_{pol} é dividida em componentes R_P e R_S , como mostrado na expressão (5.20), que correspondem às reflectâncias das polarizações P e S, respectivamente.

$$R_{pol} = R_P + R_S = \frac{\int_{porta1} \|E_y - E_0^y\|^2 dy}{\int_{porta1} \|\tilde{E}_0\|^2 dy} + \frac{\int_{porta1} \|E_z - E_0^z\|^2 dz}{\int_{porta1} \|\tilde{E}_0\|^2 dz} \quad (5.20)$$

em que E_y é a componente do campo elétrico no plano de modelagem, medida pelo COMSOL, que representa a polarização P [14]. Já E_z é a componente do campo elétrico fora do plano xy , medida pelo COMSOL, que representa a polarização S [14].

Os valores para os parâmetros ópticos e geométricos que definem a fibra óptica com perfil D são os mesmos da Tabela 13. Para o sensor tipo II, além do uso de níquel ou alumínio para compor os elementos transdutores, como simulado para o sensor tipo I, também é verificado o desempenho de filmes finos de zinco (Zn) e de uma liga de aço-carbono (Fe-C) como materiais transdutores. Tais metais são encontrados nos mais diversos tipos de estruturas do setor industrial e da construção civil [177]. O índice de refração do Zn e Fe-C, para o comprimento de onda de 1550 nm, é dado por $n_{Zn} = 4,6686 - j11,709$ e $n_{Fe-C} = 3,1252 - j5,1281$, respectivamente. Além disso, especificamente para o índice de refração a liga de Fe-C, ele foi obtido com base na expressão para permissividade relativa de

uma liga binária [178], definida como

$$\varepsilon_{Alloy}(f, \lambda) = (1 - f)\varepsilon_{Fe}(\lambda) + f\varepsilon_C(\lambda), \quad (5.21)$$

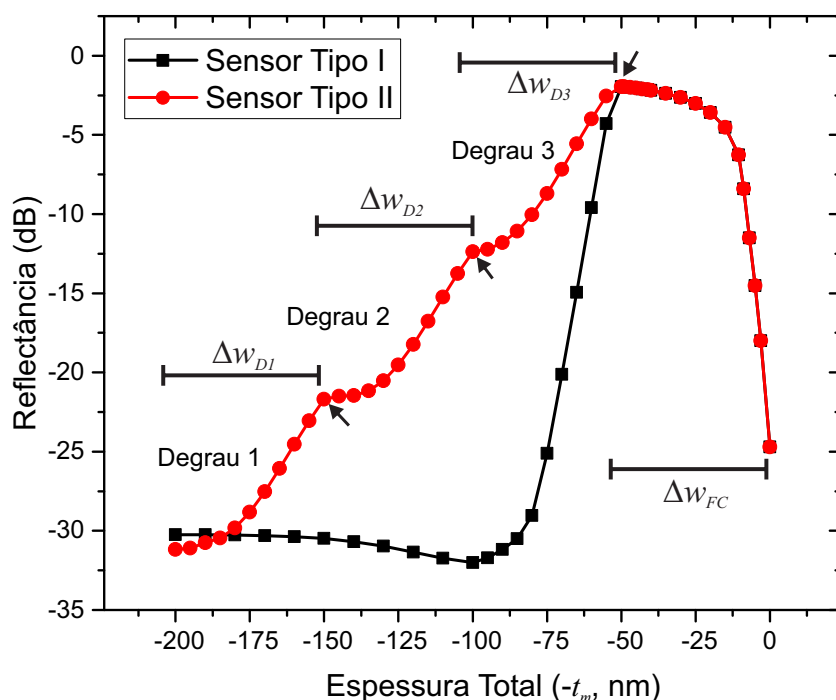
em que $\varepsilon_{Fe}(\lambda)$ e $\varepsilon_C(\lambda)$ são as permissividades relativas do ferro e do carbono em função do comprimento de onda [168], respectivamente, e f é a fração do carbono na liga. Para o aço-carbono, tem-se no máximo $f = 2\%$, enquanto que para o ferro fundido, tem-se f na faixa de 2-6,67% [177]. Na simulação, foi usado $f = 2\%$, que é um valor estratégico, que se aplica abordando a liga de Fe-C como aço-carbono ou ferro fundido. Além disso, devido a fração do carbono ser relativamente pequena, o índice de refração é predominantemente definido pelo ferro. Para f na faixa de 2-6,67%, observa-se uma diferença relativa do índice de refração complexo da liga para o índice do ferro puro de apenas 0,1% para a parte real e 3% para a parte imaginária (coeficiente de extinção). Por fim, uma malha retangular com tamanho de elemento finito definido por $\lambda/16$ também foi usada para discretizar a geometria da Figura 59, assim como na modelagem do sensor tipo I.

5.4 RESULTADOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SENSOR DE CORROÇÃO APRIMORADO

O gráfico da reflectância em função da espessura total, que é a espessura do metal sobre a face clivada t_m , é mostrado na Figura 60. A curva com pontos em vermelho representa a corrosão simultânea dos transdutores do sensor tipo II, para uma estrutura em escada com três degraus de altura $h_1 = 50$ nm, $h_2 = 100$ nm e $h_3 = 150$ nm, com comprimento $L_S = 1$ mm para cada degrau e composta por filmes finos de níquel. O filme fino sobre a face clivada tem espessura $t_m = 200$ nm. Deve-se notar que, de um degrau para outro, a diferença de altura é de 50 nm, assim como a diferença $t_m - h_3 = 50$ nm. Como esses degraus são de níquel, para esse metal, o processo corrosivo é detectado a partir da corrosão de filmes finos com 50 nm de espessura, como destacado na Seção 5.2. Como a corrosão é simultânea, significa que quando o primeiro degrau for completamente corroído, os demais degraus têm sua espessura reduzida em 50 nm, além do filme metálico sobre a face clivada. Consequentemente, o degrau posterior atinge a espessura necessária para detecção da corrosão (50 nm). Isso ocorre sucessivamente até a corrosão completa da estrutura em escada, restando apenas o metal sobre a face clivada com 50 nm de espessura, para uma

última detecção da corrosão. Como resultado desse processo, tem-se o comportamento observado para a curva em vermelho do gráfico da Figura 60, que permite identificar a corrosão de cada degrau a partir dos pontos de transição da reflectância (apontados pelas setas). Com isso, sabendo-se o intervalo de tempo necessário para ocorrer cada transição, pode-se obter a taxa de corrosão em que cada degrau foi corroído. Além disso, uma última taxa de corrosão pode ser obtida com a corrosão dos 50 nm finais do filme fino sobre a face clivada. Definindo a faixa de operação total do sensor tipo II, Δw_{total} , como a soma das variações de espessura que implicam em variações de reflectância, destacadas na Figura 60, obtém-se $\Delta w_{total}^{II} = \Delta w_{D1} + \Delta w_{D2} + \Delta w_{D3} + \Delta w_{FC} = 200$ nm.

Figura 60: Reflectância em função da espessura para o sensor tipo I (pontos em preto) e tipo II (pontos em vermelho).



Fonte: O Autor, 2020.

Ainda na Figura 60, a curva com pontos em preto representa a corrosão simultânea dos transdutores do sensor tipo I. A estrutura desse sensor foi definida com um perfil D com 3 mm de comprimento, metalizado com um filme de níquel com 150 nm espessura. Assim como no sensor tipo II, o filme fino sobre a face clivada também tem 200 nm de espessura. Como pode ser observado para a curva em preto, o processo corrosivo é detectado apenas a partir da corrosão dos 50 nm finais do metal sobre o perfil D. No entanto, é observada uma maior variação da reflectância na corrosão desses 50 nm, que implica numa maior sensibilidade. Esse comportamento é esperado, com base nos resultados mostrados na Figura 54.

Consequentemente, para essa configuração, o sensor tipo I apresenta uma faixa de operação total $\Delta w_{total}^I = 100 \text{ nm}$, que é metade da faixa de operação exibida pelo sensor tipo II. Com isso, a grande faixa de operação, a rápida detecção da corrosão e a possibilidade de obter a taxa de corrosão quatro vezes até a remoção completa dos transdutores, justificam o uso de um filme fino estruturado ao invés de um filme fino laminar na construção de um sensor de corrosão à fibra óptica de perfil D. Ou seja, o sensor tipo II apresenta melhor performance com base em sua ampla faixa de operação e quantidade de medições para a taxa de corrosão. Já o sensor tipo I apresenta maior sensibilidade, com faixa de operação e número de medições para a taxa de corrosão reduzidos pela metade.

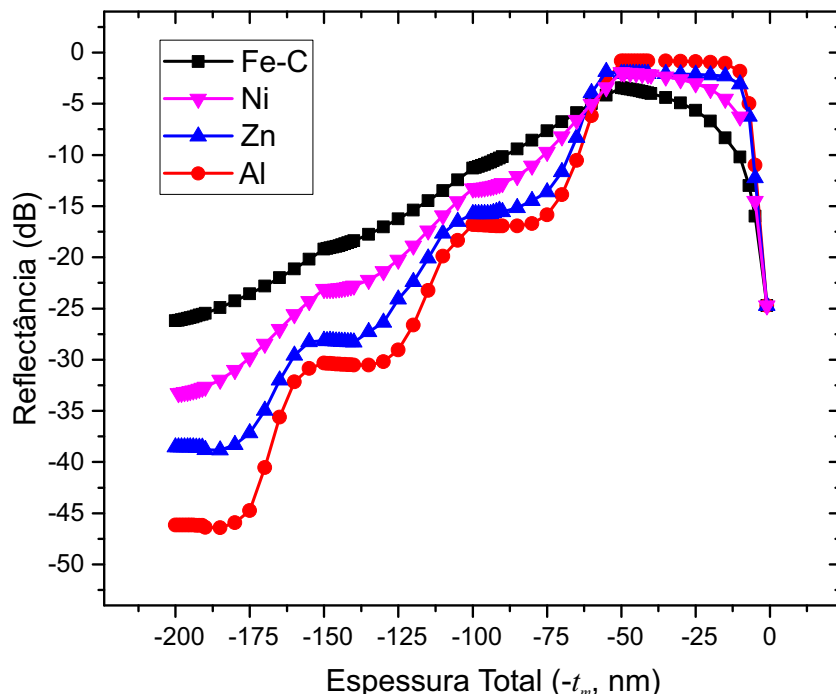
Os resultados mostrados no gráfico da Figura 60, para o sensor tipo II, foram obtidos a partir de uma estrutura em escada pré-definida, baseada nos pontos de transição devido à altura entre degraus de 50 nm, em que tal valor está definido desde as simulações do sensor tipo I. Com as vantagens destacadas anteriormente, a estrutura em escada para os transdutores sobre o perfil D aprimora o desempenho do sensor de corrosão. Com o objetivo de otimizar tal estrutura, é analisada a influência dos parâmetros que definem a estrutura em escada na resposta do sensor tipo II, incluindo número de degraus, suas alturas e comprimentos, e também o tipo de material metálico. Adicionalmente, é investigada a influência da polarização da luz na resposta do sensor.

5.4.1 Performance do Sensor Aprimorado para Diferentes Metais

O gráfico da Figura 61 mostra as curvas de reflectância em função da espessura total, obtidas através de simulações do sensor tipo II, com as mesmas especificações que definiram a estrutura dos degraus e do filme fino sobre a face clivada, que geraram o resultado mostrado na Figura 60. Além disso, essa estrutura foi testada usando quatro tipos de materiais metálicos como elementos transdutores: aço-carbono (Fe-C), níquel (Ni), alumínio (Al) e zinco (Zn). Como pode ser observado, os resultados obtidos com transdutores de Fe-C (curva preta) e Ni (curva rosa) apresentam comportamento semelhante, em que a reflectância varia ao longo de toda a corrosão desses transdutores. Além disso, para o Fe-C, observa-se que os pontos de transição da corrosão de cada degrau não estão bem definidos, pois a curva da reflectância apresenta um comportamento aproximadamente linear ao longo da corrosão da estrutura em escada. Tal comportamento será discutido posteriormente e está relacionado ao comprimento de penetração da luz no filme de Fe-C. Em relação aos resultados para os

transdutores de Al (curva vermelha) e Zn (curva azul), as curvas de reflectância também apresentam comportamento semelhante, em que pode-se observar os pontos de transição devido a corrosão de cada degrau.

Figura 61: Reflectância em função da espessura para o sensor tipo II com diferentes transdutores metálicos.



Fonte: O Autor, 2020.

Ainda na Figura 61, deve-se notar que para cada tipo de metal a curva da reflectância apresenta faixas de variações distintas. Para a corrosão completa da estrutura em escada, o uso do Al fornece a maior variação total da reflectância, de aproximadamente 46 dB, enquanto que o uso do Fe-C fornece a menor variação total, de aproximadamente 26 dB. Isso implica na sensibilidade exibida pelo sensor simulado para cada tipo de metal. O comportamento da curva da reflectância, para cada metal, pode ser compreendido através da análise do coeficiente de absorção, α , e comprimento de penetração, λ_p , obtidos na Tabela 15, para o comprimento de onda de 1550 nm. Como pode ser observado, os maiores comprimentos de penetração da luz no metal ocorrem para o Fe-C e o Ni. Especificamente para o Fe-C, tem-se λ_p aproximadamente igual a diferença de altura de cada degrau, $\Delta h = 50$ nm. Isso explica o comportamento aproximadamente linear para a curva preta no gráfico da Figura 61. Consequentemente, para os outros metais, como λ_p é inferior a $\Delta h = 50$ nm, tem-se que o sensor fica ligeiramente saturado até que, com a corrosão, a espessura de cada degrau atinja o valor λ_p , e o sensor volte a detectar a corrosão desse degrau. Com isso, pode-se concluir

que a origem dos pontos de transição está na breve saturação do sensor no início da corrosão de cada degrau, devido o comprimento de penetração da luz em cada metal transdutor. Em relação à faixa de variação da reflectância, com a corrosão da estrutura em escada, a faixa exibida para cada metal pode estar relacionada à absorção da luz pelo metal. Como pode ser observado na Tabela 15, o Fe-C possui o menor valor para α , com a curva da corrosão da estrutura em escada usando esse metal, no gráfico da Figura 61, apresentando a menor variação da reflectância ΔR_{escada}^{Fe-C} . Essa tendência também é observada para o Ni, Zn e Al, que possuem coeficientes de absorção, em relação ao do Fe-C, tal que $\alpha_{Fe-C} < \alpha_{Ni} < \alpha_{Zn} < \alpha_{Al}$, que implica em $\Delta R_{escada}^{Fe-C} < \Delta R_{escada}^{Ni} < \Delta R_{escada}^{Zn} < \Delta R_{escada}^{Al}$.

Tabela 15: Coeficiente de absorção, comprimento de penetração e variação da reflectância para diferentes transdutores metálicos do sensor tipo II.

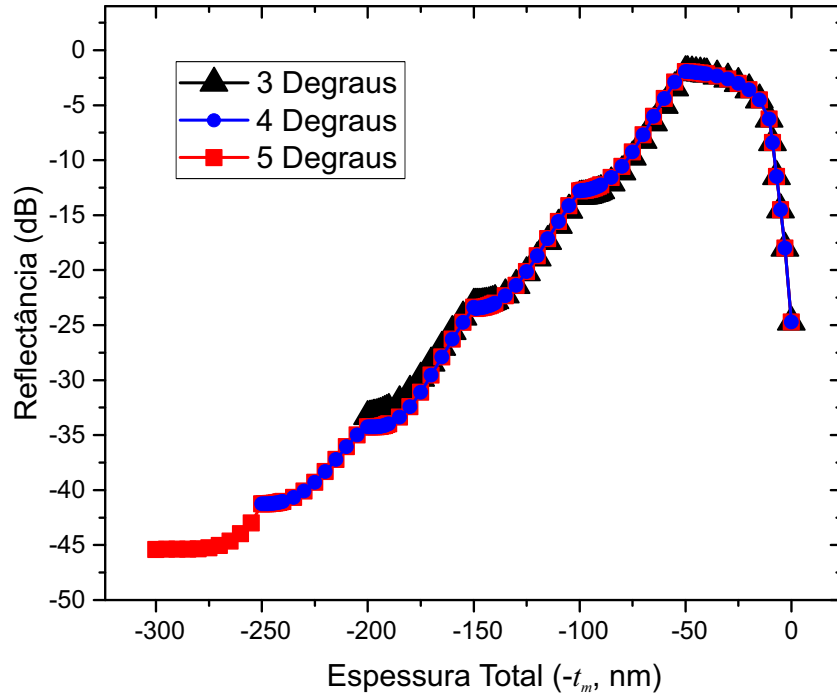
Metal	α (nm⁻¹)	λ_p (nm)	ΔR_{escada} (dB)
Fe-C	0,0208	48	26,4
Ni	0,0313	32	33,8
Zn	0,0475	21	38,5
Al	0,0618	16	46,2

5.4.2 Influência dos Parâmetros Geométricos da Estrutura em Escada

Nesta seção, é verificada a influência dos parâmetros geométricos que definem a estrutura em escada do transdutor sobre o perfil D do sensor tipo II. Na Figura 62, é mostrada a reflectância em função da espessura total para um sensor simulado com uma estrutura em escada com três (curva preta), quatro (curva azul) e cinco degraus (curva vermelha). Essa simulação fez uso de níquel como metal transdutor, a diferença de altura entre cada degrau é de 50 nm e cada degrau tem comprimento de 1 mm, como definido para as simulações anteriores. O filme fino sobre a face clivada tem espessura de 300 nm, para a estrutura com cinco degraus, 250 nm, para a estrutura com quatro degraus e 200 nm, para a estrutura com três degraus. Como pode ser observado, a adição de mais degraus, na estrutura em escada do transdutor, implica na introdução de mais faixas de operação para o sensor de corrosão e, consequentemente, mais medições para a taxa de corrosão, como discutido anteriormente. O aumento de 3 para 4 degraus implica no aumento de 7 dB na variação total da reflectância, devido a corrosão completa da estrutura em escada, enquanto que o aumento de 4 para 5 degraus causa um aumento de 4 dB em ΔR_{escada} . Com isso, observa-se que a tendência é

a saturação dessa variação, com o aumento do número de degraus. Portanto, o número de degraus influencia na resposta do sensor, promovendo o aumento de sua faixa de operação. No entanto, para um número de degraus superior a quatro, a variação da reflectância com a corrosão de cada degrau tende a ser menor, devido a saturação.

Figura 62: Reflectância em função da espessura para o sensor tipo II para estruturas de escada com três (curva preta), quatro (curva azul) e cinco (curva vermelha) degraus.

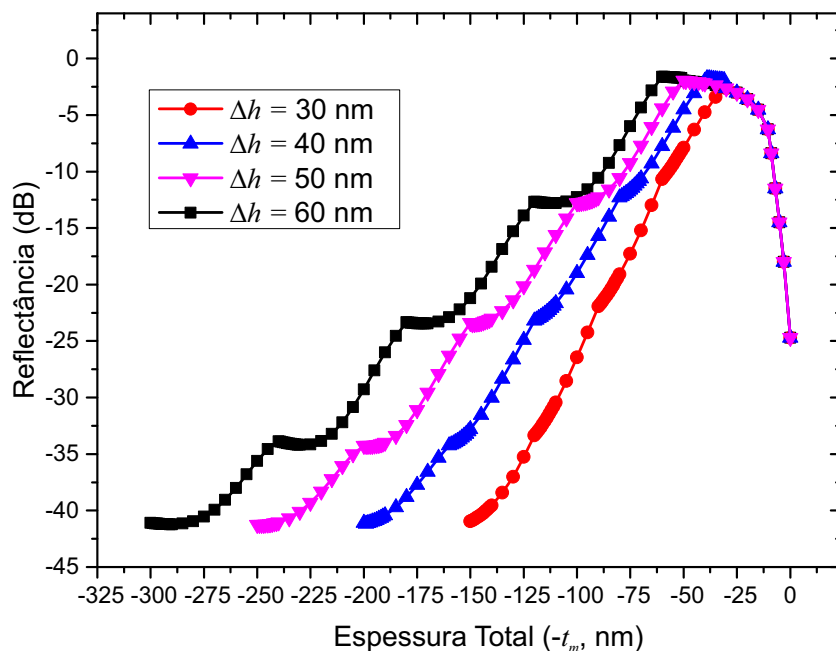


Fonte: O Autor, 2020.

Na Figura 63, tem-se o gráfico da reflectância em função da espessura total, para simulações do sensor tipo II que avaliam a influência da diferença de altura entre cada degrau, Δh . Na simulação, a estrutura em escada tem quatro degraus com comprimento de 1 mm. Como pode ser observado, quanto maior o Δh , melhor a definição dos pontos de transição que indicam a corrosão de cada degrau. Deve-se notar também que para $\Delta h = 30$ nm, basicamente a curva de reflectância não possui os pontos de transição. Ou seja, ela apresenta um comportamento aproximadamente linear. Isso pode estar relacionado à estrutura em escada se comportar como uma rampa, visto que a diferença de altura entre cada degrau é pequena e aproximadamente igual ao comprimento de penetração da luz no metal, ou seja, $\Delta h \approx \lambda_p$, para o níquel, como discutido na Seção 5.4.1. Em adicional, deve-se notar que a diferença de altura, Δh , não influencia na variação total da reflectância com a corrosão completa da estrutura. Para os valores de Δh avaliados, essa variação foi mantida em aproximadamente 40 dB. Observa-se, ainda, que para $\Delta h = 60$ nm, o processo corrosivo é detectado pos-

teriormente ao seu início, visto que a reflectância inicialmente se mantém constante com a redução da altura de cada degrau. Como destacado anteriormente, para o níquel, as variações de reflectância são detectadas a partir dos 50 nm. Portanto, a diferença de altura de cada degrau influencia na ocorrência dos pontos de transição da curva da reflectância, que permitem identificar a corrosão de cada degrau e obter a taxa de corrosão. A diferença $\Delta h = 60$ nm torna esses pontos de transição mais evidentes.

Figura 63: Reflectância em função da espessura para o sensor tipo II para estruturas de escada com degraus de diferentes alturas.

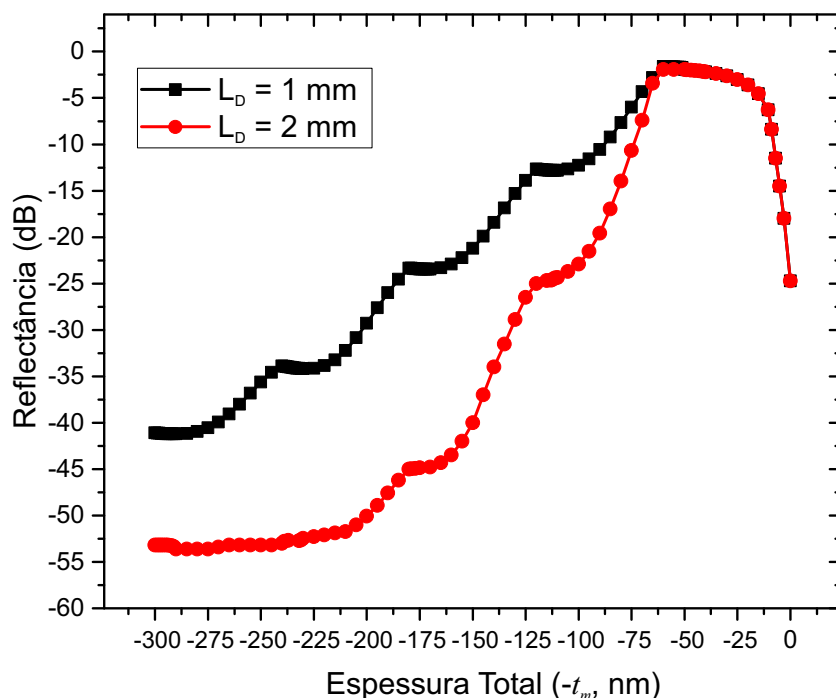


Fonte: O Autor, 2020.

A influência do comprimento dos degraus da estrutura em escada, do transdutor sobre o perfil D, é mostrada na Figura 64, para o gráfico da reflectância em função da espessura total. Na simulação, a estrutura em escada tem quatro degraus, com $\Delta h = 60$, e é composta por níquel. Como pode ser observado, para a estrutura com degraus de 2 mm de comprimento (curva vermelha), a corrosão dessa estrutura apresenta apenas duas faixas de operação bem definidas para a curva da reflectância. Tais faixas são decorrentes da corrosão dos degraus 3 e 4. Para a corrosão do degrau 1, basicamente não se observa alterações na reflectância, enquanto que, para a corrosão do degrau 2, a reflectância é alterada em apenas 7 dB, a partir da corrosão dos 20 nm finais desse degrau. Esse comportamento é decorrente da alta absorção do sinal óptico ao longo da propagação na estrutura de fibra óptica com perfil D metalizado com 8 mm de comprimento, de modo que não se tem luz refletida com intensidade suficiente para detectar alterações na espessura dos degraus 1 e 2. Com a remoção

desses dois degraus, a perda por absorção é reduzida, permitindo a detecção da corrosão dos demais degraus. Com isso, a estrutura com degraus de 2 mm tem melhor performance se definida uma escada com apenas dois degraus.

Figura 64: Reflectância em função da espessura para o sensor tipo II com estruturas de escada com degraus com 1 mm de comprimento (curva preta) e 2 mm de comprimento (curva vermelha).



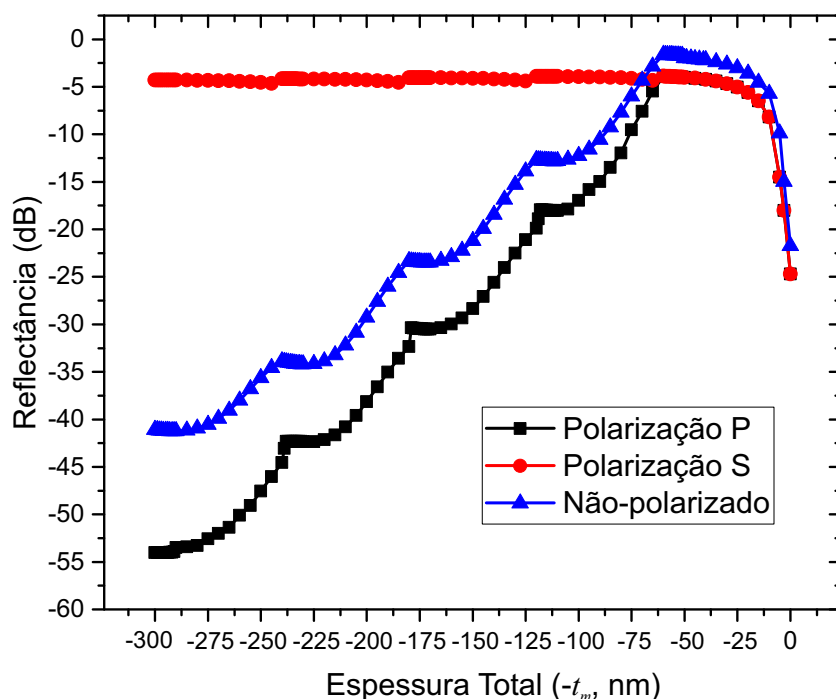
Fonte: O Autor, 2020.

Por fim, deve-se notar que o aumento do comprimento dos degraus, de 1 mm para 2 mm, implica na perda de duas faixas de operação para o sensor de corrosão, que causa a perda de duas medições para a taxa de corrosão. No entanto, do ponto de vista da fabricação do dispositivo, caso não se tenha precisão para construir degraus com 1 mm de comprimento, a estrutura com degraus de 2 mm de comprimento, para o sensor tipo II, ainda apresentará vantagem em relação ao sensor tipo I, que usa o filme metálico não-estruturado como transdutor sobre o perfil D, pois apresentará três faixas de detecção da corrosão, com cada faixa causando alterações da ordem de 20 dB na reflectância. É importante destacar que os resultados mostrados até esta seção, da Figura 60 até a Figura 64, foram obtidos com a simulação de um sinal óptico não-polarizado guiado na estrutura da Figura 59. Na próxima seção, é mostrada influência da polarização na resposta do sensor de corrosão Tipo II.

5.4.3 Influência da Polarização na Resposta do Sensor de Corrosão Aprimorado

O gráfico da reflectância para corrosão dos transdutores do sensor tipo II é mostrado na Figura 65, para um sistema de detecção polarizado. Na simulação, a estrutura da escada é definida com quatro degrau de 1 mm de comprimento, diferença de altura de 60 nm e composta por níquel. O filme fino sobre a face clivada tem 300 nm de espessura. Como pode ser observado, a corrosão da estrutura em escada causa alterações na reflectância que podem ser detectadas apenas pelo sinal óptico com polarização P (curva preta), que tem o campo elétrico perpendicular à interface do perfil D com o filme fino estruturado. Para a polarização S (curva vermelha), que tem o campo elétrico paralelo a interface perfil D/metal, a reflectância é mantida aproximadamente constante ao longo da corrosão do transdutor sobre o perfil D. O comportamento das polarizações P e S verifica o que foi destacado em [124], que uma fibra óptica com perfil D metalizado atua como um polarizador de alta birrefringência. Para a corrosão do filme fino sobre a face clivada, observa-se que não há dependência da polarização, pois a curva da reflectância apresenta o mesmo comportamento para as polarizações P e S.

Figura 65: Curvas de reflectância em função da espessura obtidas através de sinais ópticos com polarização P (curva preta), polarização S (curva vermelha) e não-polarizado (curva azul).



Fonte: O Autor, 2020.

Ainda nos resultados da Figura 65, tem-se uma curva para a reflectância obtida para

um sinal óptico não-polarizado (curva azul), que contém as componentes de polarização P e S. Como pode ser observado para essa curva, tem-se uma menor variação total da reflectância após a corrosão da estrutura em escada. Como as polarizações P e S coexistem, a variação ΔR_{escada} ocorre devido a fração do sinal óptico com componente P, que interage com o transdutor sobre o perfil D. Em relação à corrosão do filme fino sobre a face clivada, observa-se uma diferença de aproximadamente 3 dB entre as curvas dos sinais ópticos polarizados e não-polarizado. Essa diferença representa 50% da intensidade do sinal óptico refletido, indicando que a intensidade desse sinal está igualmente dividida entre as componentes P e S. Por fim, o sistema com polarização P promove um aumento na variação total ΔR_{escada} de aproximadamente 15 dB, que implica no aumento da sensibilidade do sensor de corrosão tipo II. No entanto, do ponto de vista da construção desse sistema de detecção, os custos com fibras mantenedoras de polarização, polarizadores, analisadores e outros dispositivos que mantenham a polarização do sinal óptico, não justificam sua construção, considerando que o sistema não-polarizado já fornece uma excelente performance para a detecção da corrosão.

Por fim, na Tabela 16 é mostrado um comparativo entre os sensores tipo I e II, propostos neste capítulo, com os sensores de corrosão obtidos na literatura, que fazem uso de filmes metálicos, apresentados no Capítulo 2. Para o sensor tipo II, definiu-se como configuração ótima aquela que a estrutura em escada é definida com $n = 4$, $\Delta h = 60$ nm, $L_S = 1$ mm, é composta por níquel e o filme fino sobre a face clivada tem 300 nm de espessura. Pois ela fornece cinco faixas de detecção da corrosão, que permitem obter cinco medições para a taxa de corrosão, com uma variação total da reflectância de 40 dB. Considerando que alguns dos sensores mostrados na Tabela 16 possuem princípios de detecção distintos, baseados em medições da reflectância [10, 11], do deslocamento do comprimento de onda de Bragg [125] e da relação de extinção entre modos TE e TM [112], atribuiu-se como parâmetro de comparação a faixa de operação desses sensores, definida como a espessura do transdutor metálico que permite detectar o início do processo corrosivo. Como pode ser observado na Tabela 16, a maior faixa de operação é fornecida pelo sensor tipo II, proposto nesta Tese de Doutorado. É importante destacar que uma larga faixa de operação implica numa maior vida útil para o sensor. Especificamente para o sensor tipo II, além de fornecer a maior faixa de operação, tem-se a maior quantidade de medições para a taxa de corrosão. Isso é outra vantagem em relação aos demais sensores, pois se as propriedades corrosivas do ambiente forem alteradas, tais alterações podem ser detectadas nas medições seguintes para a taxa de corrosão, até

que todos os transdutores sejam corroídos. Com isso, a construção do sensor de corrosão aprimorado (sensor tipo II) representa um avanço em relação as estruturas já existentes.

Tabela 16: Performance dos sensores de corrosão à fibra óptica.

Estrutura do Sensor	Faixa de Operação	Medições da TC	Ref.
SMF com face clivada metalizada com Al	10 nm	1	[10, 11]
Fibra de Perfil D metalizado com Fe-C	50 nm	1	[112]
FBG	55 nm	-	[125]
Sensor tipo I - Filme fino laminar de Ni	100 nm	2	Proposto
Sensor tipo II - Filme fino estruturado de Ni	300 nm	5	Proposto

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esta Tese de Doutorado apresenta a construção de um aparato experimental para a fabricação automatizada de perfil D em fibras ópticas por técnicas de polimento. A fibra com perfil D produzida no Laboratório de Sensores e Instrumentação do Grupo de Fotônica da UFPE, pelo método de fabricação proposto nesta Tese, foi comparada com uma fibra comercial, através de seu desempenho como elemento sensor para detecção de índice de refração. Os resultados obtidos mostraram que a fibra produzida em laboratório apresenta resposta semelhante à fibra comercial para a faixa de variação de índice de refração em torno de 1,4 UIR. Adicionalmente, ela apresenta melhor performance para as faixas de detecção de índice de refração em que a fibra comercial não possui resposta sensora, em torno de 1,3 UIR. A análise dos resultados obtidos com a fibra de perfil D produzida em laboratório e com a fibra comercial foi corroborada por uma simulação numérica, no COMSOL *Multiphysics*, que apontou a influência da rugosidade de superfície no desempenho do sensor de índice de refração obtido com a amostra produzida com o método apresentado nesta Tese.

O aparato experimental foi usado para construção de perfil D com diferentes níveis de rugosidade de superfície em amostras de fibra óptica monomodo padrão. Essas amostras foram usadas como elementos sensores para um sistema de detecção de índice de refração. A rugosidade de superfície foi caracterizada no *software* Gwyddion, a partir da análise de imagens de microscopia óptica da superfície polida das amostras de fibra óptica com perfil D. Além disso, essa análise foi corroborada com uma modelagem computacional para a seção longitudinal de uma fibra óptica de perfil D rugoso, com uma abordagem para a rugosidade de superfície através de uma função fractal de ordem 3, denominada de função rugosidade. Verificou-se que as amostras com maior rugosidade *rms* melhoram o desempenho do sensor de índice de refração, permitindo atingir uma sensibilidade da ordem de 100 dB/UIR e resolução da ordem de 10^{-4} UIR, para uma faixa de detecção de índice de refração observada em aplicações bioquímicas. Os resultados do modelo computacional apresentaram boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente. Adicionalmente, a modelagem das

superfícies rugosas através da função rugosidade mostrou-se compatível com as morfologias observadas experimentalmente, observando-se a distribuição de vales, picos e periodicidades que caracterizam essas superfícies.

Além do sensor de índice de refração baseado em fibra óptica com perfil D, esta Tese de Doutorado apresenta o *design* e implementação de dois modelos computacionais para sensores de corrosão à base de fibra óptica com perfil D. Os resultados da modelagem computacional mostram que com uma estrutura simples, que combina uma fibra óptica de perfil D metalizado com um filme fino laminar e uma fibra óptica com face clivada metalizada, é possível obter um sensor de corrosão com duas faixas de operação, que é capaz de fornecer uma medição para a taxa de corrosão ao longo do processo e outra medição ao término da corrosão completa de todos os seus elementos transdutores. Impulsionado pelo desempenho obtido para esse sensor, idealizou-se um sensor de corrosão aprimorado. Esse sensor é obtido a partir da combinação de uma fibra óptica de perfil D metalizado com um filme fino estruturado, na forma de escada, com uma fibra óptica com face clivada metalizada. Através de explorações da modelagem computacional, analisando a influência de parâmetros ópticos, geométricos e materiais transdutores, definiu-se a estrutura que promove o melhor desempenho para o sensor de corrosão, tomando como base a faixa de operação a determinação da taxa de corrosão. O sensor de corrosão obtido com essa estrutura possui cinco faixas de detecção e, conseqüentemente, é capaz de fornecer cinco medições para a taxa de corrosão.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DA TESE DE DOUTORADO

Esta Tese contribui com os seguintes aspectos:

- ▷ Construção de um aparato experimental para fabricação de perfil D em fibras ópticas monomodo. A técnica de polimento empregada é capaz de gerar diferentes níveis de rugosidade na superfície do perfil D. Esse aparato também pode ser usado na fabricação de perfil D em outros tipos de fibras ópticas. O processo de fabricação de perfil D em fibras ópticas, a aplicação dessas fibras num sensor de índice de refração e o comparativo do desempenho desse sensor com outro que faz uso de uma fibra de perfil D comercial, foram apresentados na conferência MOMAG 2018, que ocorreu no Inatel, em Santa Rita do Sapucaí - MG. O artigo produzido recebeu uma Menção Honrosa,

sendo reconhecido como um dos artigos em destaque, na área de óptica, apresentado nessa conferência.

- ▷ Obtenção de um sensor de índice de refração que usa como elemento sensor uma fibra óptica de perfil D rugoso exposto ao meio sob análise. Esse sensor exhibe boas figuras de mérito, em termos de sensibilidade e resolução, que são compatíveis com figuras de mérito exibidas por estruturas mais complexas de elementos sensores.
- ▷ Construção de um modelo computacional para uma fibra óptica de perfil D rugoso, com uma representação para a morfologia da rugosidade de superfície através de um fractal de ordem 3. Esse modelo representa uma expansão da função rugosidade proposta por H. P. Alves *et al.* [161], que é considerada como um fractal de ordem 1. Os resultados desse modelo computacional, juntamente com os resultados do item anterior, estão organizados em um artigo, que encontra-se em fase final, a ser submetido em um periódico.
- ▷ Implementação de modelos computacionais para dois tipos de sensores de corrosão à base de fibra óptica com perfil D. O sensor tipo I, que possui estrutura simples, resultante da junção de uma fibra com perfil D metalizado e uma fibra com face clivada metalizada, apresenta duas faixas de operação. Os resultados do sensor tipo I foram apresentados na conferência IMOC 2019, que ocorreu na cidade de Aveiro, em Portugal. O sensor tipo II, que possui elemento sensor com estrutura mais complexa, que usa filme fino estruturado na forma de escada para metalizar o perfil D, apresenta cinco faixas de operação. Os resultados do sensor tipo II estão sendo organizados para compor um artigo a ser submetido em um periódico.
- ▷ Realização de uma abrangente revisão da literatura sobre os sensores de onda evanescente à base de fibra óptica com perfil D. São apresentadas categorizações para a estrutura dos elementos sensores, classificação qualitativa quando às aplicações na detecção de diversas grandezas e fenômenos e classificação quantitativa, com base em análise de faixa de operação, sensibilidade e resolução, para os sensores de índice de refração. Essa revisão, combinada com a revisão da literatura sobre as técnicas de fabricação de perfil D em fibras ópticas, resultará num artigo de revisão da literatura que com a seguinte temática: fabricação de fibra óptica com perfil D para aplicações em sensoriamento - uma revisão.

- ▷ Realização de uma revisão da literatura com as principais técnicas para monitoramento da corrosão usando fibra óptica. Obtenção de uma análise qualitativa dos sensores de corrosão revisados, com base em parâmetros como perfil de elemento sensor e obtenção da taxa de corrosão. Essas análises também serão usadas para compor um artigo de revisão da literatura com a seguinte temática: sensores a fibra óptica para monitoramento da corrosão - uma revisão.

6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuação desta Tese de Doutorado, são listadas as seguintes propostas:

- ▷ Testar o sensor de índice de refração à fibra óptica com perfil D para detecção de índices de refração em faixas específicas, para aplicações em bioquímica, tais como: detecção de óleo em água e reações químicas em baterias.
- ▷ Testar diferentes direções preferenciais da rugosidade gerada sobre o perfil D e sua influência na resposta do sensor de índice de refração. Longitudinal, transversal e aleatória.
- ▷ Verificar o desempenho do sensor de índice de refração para o comprimento de onda de 1550 nm, que implica num maior diâmetro modal e, conseqüentemente, numa maior profundidade de penetração da onda evanescente na casca da fibra óptica.
- ▷ Construção e caracterização do sensor de corrosão tipo I e comparativo com os resultados da modelagem computacional desse sensor.
- ▷ Construção e caracterização do sensor de corrosão tipo II e comparativo com os resultados de sua modelagem computacional. Especificamente para esse sensor, o filme fino estruturado pode ser construindo com a utilização de máscaras, que delimitem a região de deposição do filme metálico para a construção isolada de cada degrau.
- ▷ Caracterizar o desempenho dos sensores tipo I e II quanto a detecção da corrosão em meios ácidos com diferentes taxas de corrosão.
- ▷ Construção de um sistema multiponto para detecção da corrosão através da técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo (do inglês, OTDR), fazendo uso dos

elementos sensores tipo I e II. Esse sistema pode ser obtido substituindo as cabeças sensoras do sensor proposto em [10, 11] pelos elementos sensores tipo I e II.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Udd and W. B. Spillman Jr, *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, and J. H. Cole, “Optical-fiber sensors challenge the competition: Resistance to corrosion and immunity to interference head the list of benefits in detecting stimuli ranging from pressure to magnetism,” *IEEE spectrum*, vol. 23, no. 9, pp. 44–50, 1986.
- [3] J. Haus, *Optical sensors: basics and applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [4] M. Benounis, N. Jaffrezic-Renault, G. Stremsdoerfer, and R. Kherrat, “Elaboration and standardization of an optical fibre corrosion sensor based on an electroless deposit of copper,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 90, no. 1-3, pp. 90–97, 2003.
- [5] S. Dong, Y. Liao, Q. Tian, Y. Luo, Z. Qiu, and S. Song, “Optical and electrochemical measurements for optical fibre corrosion sensing techniques,” *Corrosion science*, vol. 48, no. 7, pp. 1746–1756, 2006.
- [6] G. Qiao, Z. Zhou, and J. Ou, “Thin fe-c alloy solid film based fiber optic corrosion sensor,” in *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. IEEE, 2006, pp. 541–544.
- [7] F. Deng, Y. Huang, and F. Azarmi, “In-line fiber bragg grating sensors for steel corrosion detection,” in *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2016*, vol. 9803. International Society for Optics and Photonics, 2016, p. 98031G.
- [8] M. S. P. e Silva, T. H. Barros, H. P. Alves, J. F. Nascimento, and J. F. Martins-Filho, “Evaluation of fiber optic raman scattering distributed temperature sensor between-196 and 400° c,” *IEEE Sensors Journal*, 2020.
- [9] V. M. da Silva, J. F. Martins Filho, and J. F. do Nascimento, “Computational modeling of transducer elements of temperature sensors using surface plasmon resonance in a d-shaped optical fiber,” in *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [10] J. F. Martins-Filho, E. Fontana, J. Guimaraes, D. Pizzato, and I. S. Coelho, “Fiber-optic-based corrosion sensor using otdr,” in *SENSORS, 2007 IEEE*. IEEE, 2007, pp. 1172–1174.
- [11] J. F. Nascimento, M. J. Silva, I. J. Coêlho, E. Cipriano, and J. F. Martins-Filho, “Amplified otdr systems for multipoint corrosion monitoring,” *Sensors*, vol. 12, no. 3, pp. 3438–3448, 2012.

- [12] H. J. B. de Oliveira, J. F. Martins Filho, and J. F. do Nascimento, "Computational modeling of h₂s gas sensor using surface plasmon resonance in a d-shaped optical fiber," in *2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*. IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [13] R. M. Ribeiro, J. L. P. Canedo, M. M. Werneck, and L. R. Kawase, "An evanescent-coupling plastic optical fibre refractometer and absorptionmeter based on surface light scattering," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 101, no. 1-2, pp. 69–76, 2002.
- [14] A. A. D. da Silva, H. P. Alves, F. C. Marcolino, J. F. do Nascimento, and J. F. Martins-Filho, "Computational modeling of optical fiber-based magnetic field sensors using the faraday and kerr magneto-optic effects," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, no. 9, pp. 1–9, 2020.
- [15] A. K. Sharma, A. K. Pandey, and B. Kaur, "A review of advancements (2007–2017) in plasmonics-based optical fiber sensors," *Optical Fiber Technology*, vol. 43, pp. 20–34, 2018.
- [16] A. R. Camara, P. M. Gouvêa, A. C. M. Dias, A. M. Braga, R. F. Dutra, R. E. de Araujo, and I. C. Carvalho, "Dengue immunoassay with an lspr fiber optic sensor," *Optics express*, vol. 21, no. 22, pp. 27 023–27 031, 2013.
- [17] N. Paliwal and J. John, "Lossy mode resonance (lmr) based fiber optic sensors: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 10, pp. 5361–5371, 2015.
- [18] X. Bao and L. Chen, "Recent progress in brillouin scattering based fiber sensors," *Sensors*, vol. 11, no. 4, pp. 4152–4187, 2011.
- [19] P. Lu, N. Lalam, M. Badar, B. Liu, B. T. Chorpening, M. P. Buric, and P. R. Ohodnicki, "Distributed optical fiber sensing: Review and perspective," *Applied Physics Reviews*, vol. 6, no. 4, p. 041302, 2019.
- [20] A. Rogers, "Polarisation optical time domain reflectometry," *Electronics Letters*, vol. 16, no. 13, pp. 489–490, 1980.
- [21] A. J. Rogers, "Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions," *Applied optics*, vol. 20, no. 6, pp. 1060–1074, 1981.
- [22] J. N. Ross, "Birefringence measurement in optical fibers by polarization-optical time-domain reflectometry," *Applied optics*, vol. 21, no. 19, pp. 3489–3495, 1982.
- [23] J. B. Rosolem, C. Floridia, D. C. Dini, C. A. Hortencio, F. Borin, J. Neto, and J. Sanz, "Tecnologias de monitoração de hidrogeradores utilizando sensores ópticos," *Cad. CPqD Tecnologia*, vol. 6, no. 1, pp. 21–30, 2010.
- [24] A. Leung, P. M. Shankar, and R. Mutharasan, "A review of fiber-optic biosensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 125, no. 2, pp. 688–703, 2007.
- [25] P. B. Garland, "Optical evanescent wave methods for the study of biomolecular interactions," *Quarterly reviews of biophysics*, vol. 29, no. 1, pp. 91–117, 1996.

- [26] S. Korposh, S. W. James, S.-W. Lee, and R. P. Tatam, "Tapered optical fibre sensors: Current trends and future perspectives," *Sensors*, vol. 19, no. 10, p. 2294, 2019.
- [27] T. Venugopalan, T. L. Yeo, T. Sun, and K. T. Grattan, "Lpg-based pva coated sensor for relative humidity measurement," *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 7, pp. 1093–1098, 2008.
- [28] A. Iadicicco, D. Paladino, S. Campopiano, W. Bock, A. Cutolo, and A. Cusano, "Evanescent wave sensor based on permanently bent single mode optical fiber," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 155, no. 2, pp. 903–908, 2011.
- [29] Y. Ying, G.-y. Si, F.-j. Luan, K. Xu, Y.-w. Qi, and H.-n. Li, "Recent research progress of optical fiber sensors based on d-shaped structure," *Optics & Laser Technology*, vol. 90, pp. 149–157, 2017.
- [30] J. Han, M. Qi, H. Wu, R. Wang, D. Li, M. Jiang, and Z. Ren, "All-optical modulator based on reduced graphene oxide coated d-shaped fiber waveguide," *Applied Physics Express*, vol. 12, no. 11, p. 112002, 2019.
- [31] S. Chen, F. Tian, L. Li, H. Qu, Z. Su, and J. Zhang, "Double d-shaped hole optical fiber coated with graphene as a polarizer," *Applied optics*, vol. 57, no. 27, pp. 7659–7666, 2018.
- [32] A. Méndez and T. F. Morse, *Specialty optical fibers handbook*. Elsevier, 2011.
- [33] G. Liu and D. Feng, "Evanescent wave analysis and experimental realization of refractive index sensor based on D-shaped plastic optical fiber," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 127, no. 2, pp. 690–693, 2016.
- [34] M. Ahmad and L. L. Hench, "Effect of taper geometries and launch angle on evanescent wave penetration depth in optical fibers," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 20, no. 7, pp. 1312–1319, 2005.
- [35] S. J. Beecher, R. R. Thomson, B. P. Pal, and A. K. Kar, "Single stage ultrafast laser inscription of a side-polished fiber-like waveguide sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 1263–1266, 2011.
- [36] J. Senosiain, I. Díaz, A. Gastón, and J. Sevilla, "High sensitivity temperature sensor based on side-polished optical fiber," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 6, pp. 1656–1660, 2001.
- [37] C.-H. Lee, J.-H. Kim, J.-H. Park, and J.-W. Song, "Reflective side-polished optical fiber submersion sensor using an optical fiber mirror for remote sensing," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 8, pp. 583–585, 2007.
- [38] K.-R. Sohn, K.-T. Kim, and J.-W. Song, "Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass-overlay-waveguide," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 101, no. 1-2, pp. 137–142, 2002.
- [39] C.-H. Lee, C. Kim, S.-W. Kang, and J.-W. Song, "Remote monitoring of abrupt overflowing in common utility duct using reflective side-polished optical fiber submersion sensor," *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 12, no. 3, pp. 166–169, 2008.

- [40] A. Duduś, R. Blue, and D. Uttamchandani, “Comparative study of microfiber and side-polished optical fiber sensors for refractometry in microfluidics,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 5, pp. 1594–1601, 2013.
- [41] Y. S. Ong, W. Kam, S. W. Harun, R. Zakaria, and W. S. Mohammed, “Low-cost transducer based on surface scattering using side-polished D-shaped optical fibers,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 1–10, 2015.
- [42] J. Tang, J. Zhou, J. Guan, S. Long, J. Yu, H. Guan, H. Lu, Y. Luo, J. Zhang, and Z. Chen, “Fabrication of side-polished single mode-multimode-single mode fiber and its characteristics of refractive index sensing,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 238–245, 2016.
- [43] Y. Dong, S. Xiao, H. Xiao, J. Liu, C. Sun, and S. Jian, “An optical liquid-level sensor based on d-shape fiber modal interferometer,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 13, pp. 1067–1070, 2017.
- [44] Y.-S. Sun, C.-J. Li, and J.-C. Hsu, “Integration of curved D-type optical fiber sensor with microfluidic chip,” *Sensors*, vol. 17, no. 1, p. 63, 2017.
- [45] X. Wang, K. Tian, L. Yuan, E. Lewis, G. Farrell, and P. Wang, “A High-Temperature Humidity Sensor Based on a Singlemode-Side Polished Multimode-Singlemode Fiber Structure,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 13, pp. 2730–2736, 2018.
- [46] M. Lomer, A. Quintela, M. López-Amo, J. Zubia, and J. M. López-Higuera, “A quasi-distributed level sensor based on a bent side-polished plastic optical fibre cable,” *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 7, p. 2261, 2007.
- [47] L. Bilro, N. Alberto, L. M. Sá, J. de Lemos Pinto, and R. Nogueira, “Analytical analysis of side-polished plastic optical fiber as curvature and refractive index sensor,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 6, pp. 864–870, 2011.
- [48] F. De-Jun, Z. Mao-Sen, G. Liu, L. Xi-Lu, and J. Dong-Fang, “D-shaped plastic optical fiber sensor for testing refractive index,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 5, pp. 1673–1676, 2014.
- [49] N. Jing, C. Teng, F. Yu, G. Wang, and J. Zheng, “Temperature dependence of a refractive index sensor based on side-polished macrobending plastic optical fiber,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 355–358, 2015.
- [50] A. G. L. Junior, A. Frizera, and M. J. Pontes, “Analytical model for a polymer optical fiber under dynamic bending,” *Optics & Laser Technology*, vol. 93, pp. 92–98, 2017.
- [51] C. Teng, F. Yu, N. Jing, Y. Ding, Z. Si, and J. Zheng, “Investigation of refractive index sensors based on side-polished plastic optical fibers,” *Optical Fiber Technology*, vol. 36, pp. 1–5, 2017.
- [52] N. Jing, J. Zheng, X. Zhao, and C. Teng, “Refractive index sensing based on a side-polished macrobending plastic optical fiber,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2898–2901, 2014.
- [53] H. Raether, “Surface plasmons on smooth surfaces,” in *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings*. Springer, 1988, pp. 4–39.

- [54] Y. Ying, G.-y. Si, F.-j. Luan, K. Xu, Y.-w. Qi, and H.-n. Li, "Recent research progress of optical fiber sensors based on D-shaped structure," *Optics & Laser Technology*, vol. 90, pp. 149–157, 2017.
- [55] H. Esmailzadeh, E. Arzi, F. Légaré, M. Rivard, and A. Hassani, "A super continuum characterized high-precision SPR fiber optic sensor for refractometry," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 229, pp. 8–14, 2015.
- [56] S.-F. Wang, M.-H. Chiu, and R.-S. Chang, "New idea for a d-type optical fiber sensor based on kretschmann's configuration," *Optical Engineering*, vol. 44, no. 3, p. 030502, 2005.
- [57] —, "Numerical simulation of a d-type optical fiber sensor based on the kretschmann's configuration and heterodyne interferometry," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 114, no. 1, pp. 120–126, 2006.
- [58] M.-H. Chiu and C.-H. Shih, "Searching for optimal sensitivity of single-mode d-type optical fiber sensor in the phase measurement," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 131, no. 2, pp. 596–601, 2008.
- [59] Y.-C. Lin, Y.-c. Tsao, W.-H. Tsai, T.-S. Hung, K.-S. Chen, and S.-C. Liao, "The enhancement method of optical fiber biosensor based on surface plasmon resonance with cold plasma modification," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 133, no. 2, pp. 370–373, 2008.
- [60] Y.-L. Lo, C.-H. Chuang, and Z.-W. Lin, "Ultrahigh sensitivity polarimetric strain sensor based upon D-shaped optical fiber and surface plasmon resonance technology," *Optics letters*, vol. 36, no. 13, pp. 2489–2491, 2011.
- [61] J.-C. Hsu, S.-W. Jeng, and Y.-S. Sun, "Simulation and experiments for optimizing the sensitivity of curved D-type optical fiber sensor with a wide dynamic range," *Optics Communications*, vol. 341, pp. 210–217, 2015.
- [62] K. Gasior, T. Martynkien, P. Mergo, and W. Urbanczyk, "Fiber-optic surface plasmon resonance sensor based on spectral phase shift interferometric measurements," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 257, pp. 602–608, 2018.
- [63] J. Zhao, S. Cao, C. Liao, Y. Wang, G. Wang, X. Xu, C. Fu, G. Xu, J. Lian, and Y. Wang, "Surface plasmon resonance refractive sensor based on silver-coated side-polished fiber," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 230, pp. 206–211, 2016.
- [64] Z. Bai, M. Li, J. Zhao, S. Cao, Y. Wang, C. Liao, and Y. Wang, "Influence of Side-Polished Fiber Surface Topography on Surface Plasmon Resonance Wavelengths and the Full Width at Half-Maximum," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 1–13, 2017.
- [65] K. T. Kim, H. S. Song, J. P. Mah, K. B. Hong, K. Im, S.-J. Baik, and Y.-I. Yoon, "Hydrogen sensor based on palladium coated side-polished single-mode fiber," *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 12, pp. 1767–1771, 2007.
- [66] H. S. Jang, K. N. Park, C. D. Kang, J. P. Kim, S. J. Sim, and K. S. Lee, "Optical fiber SPR biosensor with sandwich assay for the detection of prostate specific antigen," *Optics Communications*, vol. 282, no. 14, pp. 2827–2830, 2009.

- [67] M.-H. Chiu, C.-H. Shih, and M.-H. Chi, "Optimum sensitivity of single-mode d-type optical fiber sensor in the intensity measurement," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 123, no. 2, pp. 1120–1124, 2007.
- [68] R. Slavik, J. Homola, and J. Ctyroky, "Miniaturization of fiber optic surface plasmon resonance sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 51, no. 1-3, pp. 311–315, 1998.
- [69] M. Li, Z. Bai, F. Zhang, M. Hou, Y. Wang, C. Liao, W. Jin, and Y. Wang, "Red shift of side-polished fiber surface plasmon resonance sensors with silver coating and inhibition by gold plating," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1–13, 2017.
- [70] Y.-C. Lin, W.-H. Tsai, Y.-C. Tsao, and J.-K. Tai, "An enhanced optical multimode fiber sensor based on surface plasmon resonance with cascaded structure," *IEEE Photonics technology letters*, vol. 20, no. 15, pp. 1287–1289, 2008.
- [71] H.-T. Yan, Q. Liu, Y. Ming, W. Luo, Y. Chen, and Y.-q. Lu, "Metallic grating on a D-shaped fiber for refractive index sensing," *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 5, p. 4800706, 2013.
- [72] T. D. P. Allsop, R. Neal, C. Mou, K. Kalli, S. Saied, S. Rehman, D. J. Webb, P. F. Culverhouse, J. L. Sullivan, and I. Bennion, "Formation and characterization of ultra-sensitive surface plasmon resonance sensor based upon a nano-scale corrugated multi-layered coated D-shaped optical fiber," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 48, no. 3, pp. 394–405, 2012.
- [73] S. M. Tripathi, A. Kumar, E. Marin, and J.-P. Meunier, "Side-polished optical fiber grating-based refractive index sensors utilizing the pure surface plasmon polariton," *Journal of lightwave technology*, vol. 26, no. 13, pp. 1980–1985, 2008.
- [74] Q. Wang and W.-M. Zhao, "A comprehensive review of lossy mode resonance-based fiber optic sensors," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 100, pp. 47–60, 2018.
- [75] I. Del Villar, F. J. Arregui, C. R. Zamarreño, J. M. Corres, C. Barriain, J. Goicoechea, C. Elosua, M. Hernaez, P. J. Rivero, A. B. Socorro *et al.*, "Optical sensors based on lossy-mode resonances," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 240, pp. 174–185, 2017.
- [76] P. Zubiarte, C. R. Zamarreño, P. Sánchez, I. R. Matias, and F. J. Arregui, "High sensitive and selective C-reactive protein detection by means of lossy mode resonance based optical fiber devices," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 93, pp. 176–181, 2017.
- [77] I. Del Villar, P. Zubiarte, C. R. Zamarreño, F. J. Arregui, and I. R. Matias, "Optimization in nanocoated D-shaped optical fiber sensors," *Optics express*, vol. 25, no. 10, pp. 10 743–10 756, 2017.
- [78] F. J. Arregui, I. Del Villar, C. R. Zamarreño, P. Zubiarte, and I. R. Matias, "Giant sensitivity of optical fiber sensors by means of lossy mode resonance," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 232, pp. 660–665, 2016.

- [79] P. Zubiate, C. R. Zamarreño, I. Del Villar, I. R. Matias, and F. J. Arregui, "Tunable optical fiber pH sensors based on TE and TM Lossy Mode Resonances (LMRs)," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 231, pp. 484–490, 2016.
- [80] A. Alvarez-Herrero, H. Guerrero, T. Belenguer, and D. Levy, "High-sensitivity temperature sensor based on overlay on side-polished fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, no. 8, pp. 1043–1045, 2000.
- [81] A. Alvarez-Herrero, H. Guerrero, and D. Levy, "High-sensitivity sensor of low relative humidity based on overlay on side-polished fibers," *IEEE Sensors Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 52–56, 2004.
- [82] P. Zubiate, C. R. Zamarreno, I. Del Villar, I. R. Matias, and F. J. Arregui, "Experimental study and sensing applications of polarization-dependent lossy mode resonances generated by D-shape coated optical fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 12, pp. 2412–2418, 2015.
- [83] W.-G. Jung, S.-W. Kim, K.-T. Kim, E.-S. Kim, and S.-W. Kang, "High-sensitivity temperature sensor using a side-polished single-mode fiber covered with the polymer planar waveguide," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 11, pp. 1209–1211, 2001.
- [84] A. Andreev, B. Pantchev, P. Danesh, B. Zafirova, E. Karakoleva, E. Vlaikova, and E. Alipieva, "A refractometric sensor using index-sensitive mode resonance between single-mode fiber and thin film amorphous silicon waveguide," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 106, no. 1, pp. 484–488, 2005.
- [85] S.-H. Yeom, B.-H. Kang, C.-T. Seo, D.-I. Lee, H.-J. Shin, S.-C. Lim, M.-C. An, S.-W. Lee, J.-S. Lee, and S.-W. Kang, "VOCs detection based on evanescent wave coupling of dye-coated optical fiber," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 3021–3025, 2014.
- [86] J.-K. Yoon, G.-W. Seo, K.-M. Cho, E.-S. Kim, S.-H. Kim, and S.-W. Kang, "Controllable in-line UV sensor using a side-polished fiber coupler with photofunctional polymer," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 6, pp. 837–839, 2003.
- [87] Q. Wang, C. Liao, L. Xu, J. He, S. Liu, J. Zhao, Z. Li, X. Xu, K. Yang, and Y. Wang, "Refractive index sensor based on side-polished fiber bragg grating," in *2015 Optoelectronics Global Conference (OGC)*. IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [88] H.-W. Chen, C.-L. Tien, W. F. Liu, and S.-W. Lin, "The measurement of liquid refractive index by d-shaped fiber bragg grating," in *2007 IEEE/Leos International Conference on Optical Memos and Nanophotonics*. IEEE, 2007, pp. 119–120.
- [89] C.-L. Tien, T.-C. Cheng, C.-C. Chang, Y.-Z. Cheng, and W.-F. Liu, "Tuning sensitivity of liquid refractive index sensor based on side-polishing fiber bragg gratings," in *2008 Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference*. IEEE, 2008, pp. 1–3.
- [90] F.-T. Weng, Y.-C. Wu, C.-Y. Wei, and C.-T. Ho, "Fabricating the uv polymer bragg grating on the d-shaped fiber," in *16th Opto-Electronics and Communications Conference*. IEEE, 2011, pp. 595–596.

- [91] C. Li, X. Peng, H. Zhang, C. Wang, S. Fan, and S. Cao, "Wearable side-polished fiber bragg grating sensor for pulse wave and throat sound detection," in *2017 IEEE SENSORS*. IEEE, 2017, pp. 1–3.
- [92] C. Li, X. Li, X. Peng, H. Zhang, C. Wang, S. Fan, and S. Cao, "Analyzing the applicability of side-polished fiber bragg grating tilt sensor using liquid pendulum with controllable angle," in *2017 IEEE SENSORS*. IEEE, pp. 1–3.
- [93] B. Jiang, Z. Bai, C. Wang, Y. Zhao, J. Zhao, L. Zhang, and K. Zhou, "In-line mach-zehnder interferometer with d-shaped fiber grating for temperature-discriminated directional curvature measurement," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 3, pp. 742–747, 2017.
- [94] T. L. Lowder, K. H. Smith, B. L. Ipson, A. R. Hawkins, R. H. Selfridge, and S. M. Schultz, "High-temperature sensing using surface relief fiber Bragg gratings," *IEEE photonics technology letters*, vol. 17, no. 9, pp. 1926–1928, 2005.
- [95] K. H. Smith, B. L. Ipson, T. L. Lowder, A. R. Hawkins, R. H. Selfridge, and S. M. Schultz, "Surface-relief fiber bragg gratings for sensing applications," *Applied optics*, vol. 45, no. 8, pp. 1669–1675, 2006.
- [96] D. Yong, X. Yu, G. Ren, H. Zhang, Y. Zhang, C. C. Chan, H. Wei, and W. Tong, "Photonic bandgap fiber for infiltration-free refractive-index sensing," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 18, no. 5, pp. 1560–1565, 2012.
- [97] M. A. Franco, V. A. Serrao, and F. Sircilli, "Side-polished microstructured optical fiber for temperature sensor application," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 21, pp. 1738–1740, 2007.
- [98] D. F. Santos, A. Guerreiro, and J. M. Baptista, "Spr microstructured d-type optical fiber sensor configuration for refractive index measurement," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 10, pp. 5472–5477, 2015.
- [99] N. Luan, R. Wang, W. Lv, and J. Yao, "Surface plasmon resonance sensor based on d-shaped microstructured optical fiber with hollow core," *Optics express*, vol. 23, no. 7, pp. 8576–8582, 2015.
- [100] A. F. Rageh, A. M. Hafez, S. I. Azzam, A. M. Heikal, and S. Obayya, "Ultra-compact plasmonic polarization splitter based on dual-core d-shaped pcf," in *2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES)*. IEEE, 2016, pp. 1–2.
- [101] D. Santos, A. Guerreiro, and J. M. Baptista, "Spr optimization using metamaterials in a d-type pcf refractive index sensor," *Optical Fiber Technology*, vol. 33, pp. 83–88, 2017.
- [102] G. An, S. Li, H. Wang, X. Zhang, and X. Yan, "Quasi-d-shaped optical fiber plasmonic refractive index sensor," *Journal of Optics*, vol. 20, no. 3, p. 035403, 2018.
- [103] X. Lei, J. Chen, F. Shi, D. Chen, Z. Ren, and B. Peng, "Magnetic field fiber sensor based on the magneto-birefringence effect of magnetic fluid," *Optics Communications*, vol. 374, pp. 76–79, 2016.

- [104] G. Violakis, N. Korakas, and S. Pissadakis, “Differential loss magnetic field sensor using a ferrofluid encapsulated D-shaped optical fiber,” *Optics letters*, vol. 43, no. 1, pp. 142–145, 2018.
- [105] M. Hernaez, C. R. Zamarreño, S. Melendi-Espina, L. R. Bird, A. G. Mayes, and F. J. Arregui, “Optical fibre sensors using graphene-based materials: A review,” *Sensors*, vol. 17, no. 1, p. 155, 2017.
- [106] Y. Huang, W. Zhu, Z. Li, G. Chen, L. Chen, J. Zhou, H. Lin, J. Guan, W. Fang, X. Liu, and Others, “High-performance fibre-optic humidity sensor based on a side-polished fibre wavelength selectively coupled with graphene oxide film,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 255, pp. 57–69, 2018.
- [107] A. L. Khalaf, F. S. Mohamad, N. A. Rahman, H. N. Lim, S. Paiman, N. A. Yusof, M. A. Mahdi, and M. H. Yaacob, “Room temperature ammonia sensor using side-polished optical fiber coated with graphene/polyaniline nanocomposite,” *Optical Materials Express*, vol. 7, no. 6, pp. 1858–1870, 2017.
- [108] J. Y. Zhang, E. J. Ding, S. C. Xu, Z. H. Li, X. X. Wang, and F. Song, “Sensitization of an optical fiber methane sensor with graphene,” *Optical Fiber Technology*, vol. 37, pp. 26–29, 2017.
- [109] M. F. Ubeid and M. M. Shabat, “Numerical investigation of a d-shape optical fiber sensor containing graphene,” *Applied Physics A*, vol. 118, no. 3, pp. 1113–1118, 2015.
- [110] A. Patnaik, K. Senthilnathan, and R. Jha, “Graphene-based conducting metal oxide coated d-shaped optical fiber spr sensor,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2437–2440, 2015.
- [111] H.-Q. Liang, B. Liu, and J.-F. Hu, “An ultra-highly sensitive surface plasmon resonance sensor based on d-shaped optical fiber with a silver-graphene layer,” *Optik*, vol. 149, pp. 149–154, 2017.
- [112] W. Hu, H. Cai, M. Yang, X. Tong, C. Zhou, and W. Chen, “Fe-c-coated fibre bragg grating sensor for steel corrosion monitoring,” *Corrosion Science*, vol. 53, no. 5, pp. 1933–1938, 2011.
- [113] S. K. Grattan, S. E. Taylor, T. Sun, P. Basheer, and K. T. Grattan, “Monitoring of corrosion in structural reinforcing bars: performance comparison using in situ fiber-optic and electric wire strain gauge systems,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 11, pp. 1494–1502, 2009.
- [114] M. R. Islam, M. Bagherifaez, M. M. Ali, H. K. Chai, K.-S. Lim, and H. Ahmad, “Tilted fiber bragg grating sensors for reinforcement corrosion measurement in marine concrete structure,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 12, pp. 3510–3516, 2015.
- [115] O. Almubaied, H. K. Chai, M. R. Islam, K.-S. Lim, and C. G. Tan, “Monitoring corrosion process of reinforced concrete structure using fbg strain sensor,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 8, pp. 2148–2155, 2017.

- [116] N. Zhang, W. Chen, X. Zheng, W. Hu, and M. Gao, "Optical sensor for steel corrosion monitoring based on etched fiber bragg grating sputtered with iron film," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 6, pp. 3551–3556, 2015.
- [117] L. Ren, T. Jiang, Z.-g. Jia, D.-s. Li, C.-l. Yuan, and H.-n. Li, "Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology," *Measurement*, vol. 122, pp. 57–65, 2018.
- [118] S. Magne, S. A. Alvarez, and S. Rougeault, "Distributed corrosion detection using dedicated optical fiber sensor (ofs) based steel rebar within reinforced concrete structures by optical frequency-domain reflectometry (ofdr)."
- [119] H. J. Patrick, A. D. Kersey, and F. Bucholtz, "Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction," *Journal of lightwave technology*, vol. 16, no. 9, p. 1606, 1998.
- [120] L. C. C. Coelho, P. S. S. dos Santos, P. A. da Silva Jorge, J. L. Santos, and J. M. M. de Almeida, "Real-time early warning strategies for corrosion mitigation in harsh environments," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 1152–1158, 2018.
- [121] K. D. Bennett and L. McLaughlin, "Monitoring of corrosion in steel structures using optical fiber sensors," in *Smart Structures and Materials 1995: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, vol. 2446. International Society for Optics and Photonics, 1995, pp. 48–59.
- [122] S. Abderrahmane, A. Himour, R. Kherrat, E. Chailleux, N. Jaffrezic-Renault, and G. Stremsdoerfer, "An optical fibre corrosion sensor with an electroless deposit of ni-p," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 75, no. 1-2, pp. 1–4, 2001.
- [123] P. Y. Aisyah, A. M. Hatta, and D. Y. Pratama, "Design of sms (single mode-multi mode coreless-single mode) optical fiber as corrosion sensor," in *Second International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2016)*, vol. 10150. International Society for Optics and Photonics, 2016, p. 101500Q.
- [124] W. Hu, L. Ding, C. Zhu, D. Guo, Y. Yuan, N. Ma, and W. Chen, "Optical fiber polarizer with Fe-C film for corrosion monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 21, pp. 6904–6910, 2017.
- [125] Z. Zheng, X. Sun, and Y. Lei, "Monitoring corrosion of reinforcement in concrete structures via fiber bragg grating sensors," *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, vol. 4, no. 3, pp. 316–319, 2009.
- [126] M. Khan, R. Rahaman, and S.-W. Kang, "Highly sensitive and wide-dynamic-range multichannel optical-fiber pH sensor based on PWM technique," *Sensors*, vol. 16, no. 11, p. 1885, 2016.
- [127] B. Guleryuz, C. Durucan, and M. M. Aslan, "Fabrication of D-type fiber optic sensors with a long interaction length and studying effects of critical parameters on sensor response," in *Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XI*, vol. 9106. International Society for Optics and Photonics, 2014, p. 91060J.

- [128] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons, 2012, vol. 222.
- [129] I. G. Society, “Technical article,” *Disponível em: <https://www.gemsociety.org/article/gem-cutting-abrasives-grit-mesh-microns>*. Acesso em: 09/03/2020.
- [130] M. R. R. Khan, B.-H. Kang, S.-H. Yeom, D.-H. Kwon, and S.-W. Kang, “Fiber-optic pulse width modulation sensor for low concentration VOC gas,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 188, pp. 689–696, 2013.
- [131] X. Zhao, Y.-C. Tsao, F.-J. Lee, W.-H. Tsai, C.-H. Wang, T.-L. Chuang, M.-S. Wu, and C.-W. Lin, “Optical fiber sensor based on surface plasmon resonance for rapid detection of avian influenza virus subtype H6: Initial studies,” *Journal of virological methods*, vol. 233, pp. 15–22, 2016.
- [132] A. O. Dikovska, G. B. Atanasova, N. N. Nedyalkov, P. K. Stefanov, P. A. Atanasov, E. I. Karakoleva, and A. T. Andreev, “Optical sensing of ammonia using ZnO nanostructure grown on a side-polished optical-fiber,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 146, no. 1, pp. 331–336, 2010.
- [133] H. Lehmann, M. E. Lippitsch, W. Ecke, W. Haubenreisser, R. Willsch, and D. Raabe, “Phase-sensitive polarimetric sensing in the evanescent field of single-mode fibres,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 29, pp. 410–415, 1995.
- [134] A. O. Dikovska, P. A. Atanasov, A. T. Andreev, B. S. Zafirova, E. I. Karakoleva, and T. R. Stoyanchoy, “ZnO thin film on side polished optical fiber for gas sensing applications,” *Applied Surface Science*, vol. 254, no. 4, pp. 1087–1090, 2007.
- [135] Y. Han, Z. Chen, D. Cao, J. Yu, H. Li, X. He, J. Zhang, Y. Luo, H. Lu, J. Tang, and Others, “Side-polished fiber as a sensor for the determination of nematic liquid crystal orientation,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 196, pp. 663–669, 2014.
- [136] T. Babeva, A. Andreev, J. Grand, M. Vasileva, E. Karakoleva, B. S. Zafirova, B. Georgieva, J. Koprinarova, and S. Mintova, “Optical fiber-Ta₂O₅ waveguide coupler covered with hydrophobic zeolite film for vapor sensing,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 248, pp. 359–366, 2017.
- [137] K. Schroeder, W. Ecke, and R. Willsch, “Optical fiber Bragg grating hydrogen sensor based on evanescent-field interaction with palladium thin-film transducer,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, no. 10, pp. 1018–1022, 2009.
- [138] J. Zhao, G. Yin, C. Liao, S. Liu, J. He, B. Sun, G. Wang, X. Xu, and Y. Wang, “Rough side-polished fiber with surface scratches for sensing applications,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 1–7, 2015.
- [139] X. Wang, G. Farrell, E. Lewis, K. Tian, L. Yuan, and P. Wang, “A humidity sensor based on a singlemode-side polished multimode–singlemode optical fibre structure coated with gelatin,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 18, pp. 4087–4094, 2017.

- [140] J. Jiang, G.-M. Ma, C.-R. Li, H.-T. Song, Y.-T. Luo, and H.-B. Wang, “Highly sensitive dissolved hydrogen sensor based on side-polished fiber Bragg grating,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 13, pp. 1453–1456, 2015.
- [141] M. Pesavento, L. De Maria, D. Merli, S. Marchetti, L. Zeni, and N. Cennamo, “Towards the development of cascaded surface plasmon resonance POF sensors exploiting gold films and synthetic recognition elements for detection of contaminants in transformer oil,” *Sensing and Bio-Sensing Research*, vol. 13, pp. 128–135, 2017.
- [142] N. Zhong, Z. Wang, M. Chen, X. Xin, R. Wu, Y. Cen, and Y. Li, “Three-layer-structure polymer optical fiber with a rough inter-layer surface as a highly sensitive evanescent wave sensor,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 254, pp. 133–142, 2018.
- [143] Y. Wu, X. Deng, F. Li, and X. Zhuang, “Less-mode optic fiber evanescent wave absorbing sensor: Parameter design for high sensitivity liquid detection,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 122, no. 1, pp. 127–133, 2007.
- [144] R. Gibson, J. Kvavle, R. Selfridge, and S. Schultz, “Improved sensing performance of D-fiber/planar waveguide couplers,” *Optics Express*, vol. 15, no. 5, pp. 2139–2144, 2007.
- [145] D. J. Markos, B. L. Ipson, K. H. Smith, S. M. Schultz, R. H. Selfridge, T. D. Monte, R. B. Dyott, and G. Miller, “Controlled core removal from a D-shaped optical fiber,” *Applied optics*, vol. 42, no. 36, pp. 7121–7125, 2003.
- [146] C.-H. Chen, T.-C. Tsao, J.-L. Tang, and W.-T. Wu, “A multi-d-shaped optical fiber for refractive index sensing,” *Sensors*, vol. 10, no. 5, pp. 4794–4804, 2010.
- [147] X. Y. Sun, D. K. Chu, X. R. Dong, Chu-Zhou, H. T. Li, Luo-Zhi, Y. W. Hu, J. Y. Zhou, Cong-Wang, and J. A. Duan, “Highly sensitive refractive index fiber inline Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining and chemical etching,” *Optics and Laser Technology*, vol. 77, pp. 11–15, 2016.
- [148] C.-H. Chen, T.-C. Chao, L. Wan-Yun, W.-C. Shen, C.-W. Cheng, J.-L. Tang, L.-K. Chau, and W.-T. Wu, “Novel D-type fiber optic localized plasmon resonance sensor realized by femtosecond laser engraving,” *J. Laser Micro/Nanoeng*, vol. 5, no. 1, pp. 1–5, 2010.
- [149] Z. Yin, Y. Geng, Q. Xie, X. Hong, X. Tan, Y. Chen, L. Wang, W. Wang, and X. Li, “Photoreduced silver nanoparticles grown on femtosecond laser ablated, D-shaped fiber probe for surface-enhanced Raman scattering,” *Applied optics*, vol. 55, no. 20, pp. 5408–5412, 2016.
- [150] C. Hnatovsky, D. Grobnc, and S. J. Mihailov, “Nonlinear photoluminescence imaging applied to femtosecond laser manufacturing of fiber Bragg gratings,” *Optics express*, vol. 25, no. 13, pp. 14 247–14 259, 2017.
- [151] J. Mohanraj, V. Velmurugan, S. Sathiyam, and S. Sivabalan, “All fiber-optic ultra-sensitive temperature sensor using few-layer MoS₂ coated D-shaped fiber,” *Optics Communications*, vol. 406, pp. 139–144, 2018.

- [152] O. Frazão, B. V. Marques, P. Jorge, J. M. Baptista, and J. L. Santos, “High birefringence D-type fibre loop mirror used as refractometer,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 135, no. 1, pp. 108–111, 2008.
- [153] R. King, F. Seng, N. Stan, K. Cuzner, C. Josephson, R. Selfridge, and S. Schultz, “Slab-coupled optical sensor fabrication using side-polished Panda fibers,” *Applied optics*, vol. 55, no. 31, pp. 8848–8854, 2016.
- [154] S. Yadhuraj, U. Kumari *et al.*, “Measurement of thickness and roughness using gwyddion,” in *2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, vol. 1. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [155] D. Nečas and P. Klapetek, “Gwyddion: an open-source software for spm data analysis,” *Open Physics*, vol. 10, no. 1, pp. 181–188, 2012.
- [156] Y. Al-Qazwini, P. Arasu, and A. Noor, “Numerical investigation of the performance of an spr-based optical fiber sensor in an aqueous environment using finite-difference time domain,” in *2011 2nd International Conference on Photonics*. IEEE, 2011, pp. 1–4.
- [157] P. D. Antonio, M. Lasalvia, G. Perna, and V. Capozzi, “Scale-independent roughness value of cell membranes studied by means of afm technique,” *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, vol. 1818, no. 12, pp. 3141–3148, 2012.
- [158] J. Li, L. Lü, M. O. Lai, and B. Ralph, *Image-based fractal description of microstructures*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [159] A.-L. Barabási and H. E. Stanley, *Fractal concepts in surface growth*. Cambridge university press, 1995.
- [160] B. B. Mandelbrot, “The fractal geometry of,” *Nature*, pp. 394–397, 1982.
- [161] H. P. Alves, J. F. Nascimento, E. Fontana, I. J. Coêlho, and J. F. Martins-Filho, “Transition layer and surface roughness effects on the response of metal-based fiber-optic corrosion sensors,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 13, pp. 2597–2605, 2018.
- [162] E. N. Fokoua, F. Poletti, and D. J. Richardson, “Analysis of light scattering from surface roughness in hollow-core photonic bandgap fibers,” *Optics express*, vol. 20, no. 19, pp. 20 980–20 991, 2012.
- [163] T. V. Vorburger, E. Marx, and T. R. Lettieri, “Regimes of surface roughness measurable with light scattering,” *Applied optics*, vol. 32, no. 19, pp. 3401–3408, 1993.
- [164] ComsolMultiphysics5.2, “The Wave Optics Module User’s Guide,” Stockholm, 2013.
- [165] F. Sequeira, N. Cennamo, A. Rudnitskaya, R. Nogueira, L. Zeni, and L. Bilro, “D-shaped pof sensors for refractive index sensing—the importance of surface roughness,” *Sensors*, vol. 19, no. 11, p. 2476, 2019.
- [166] E. Fontana, “Thickness optimization of metal films for the development of surface-plasmon-based sensors for nonabsorbing media,” *Applied optics*, vol. 45, no. 29, pp. 7632–7642, 2006.

- [167] K. R. Williams, K. Gupta, and M. Wasilik, "Etch rates for micromachining processing-part ii," *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 12, no. 6, pp. 761–778, 2003.
- [168] A. D. Rakić, A. B. Djurišić, J. M. Elazar, and M. L. Majewski, "Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices," *Applied optics*, vol. 37, no. 22, pp. 5271–5283, 1998.
- [169] J. D. Jackson and R. F. Fox, "Book reviews-classical electrodynamics," *American Journal of Physics*, vol. 67, no. 9, p. 841, 1999.
- [170] D. Marcuse, "Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers," *JOSA*, vol. 68, no. 1, pp. 103–109, 1978.
- [171] A. Kumar, R. K. Varshney, P. Sharma *et al.*, "Transmission characteristics of sms fiber optic sensor structures," *Optics Communications*, vol. 219, no. 1-6, pp. 215–219, 2003.
- [172] S.-F. Wang, M.-H. Chiu, J.-C. Hsu, R.-S. Chang, and F.-T. Wang, "Theoretical analysis and experimental evaluation of D-type optical fiber sensor with a thin gold film," *Optics communications*, vol. 253, no. 4-6, pp. 283–289, 2005.
- [173] E. Fontana, "A novel gold-coated multimode fiber sensor," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 50, no. 1, pp. 82–87, 2002.
- [174] H. Li, S. Zhou, J. Li, Y. Chen, S. Wang, Z. Shen, L. Chen, H. Liu, and X. Zhang, "Analysis of the drude model in metallic films," *Applied optics*, vol. 40, no. 34, pp. 6307–6311, 2001.
- [175] M. Hövel, B. Gompf, and M. Dressel, "Dielectric properties of ultrathin metal films around the percolation threshold," *Physical Review B*, vol. 81, no. 3, p. 035402, 2010.
- [176] D. Rativa and L. A. Gómez-Malagón, "Colloidal plasmonic structures for harvesting solar radiation," *Renewable energy*, vol. 118, pp. 947–954, 2018.
- [177] R. K. Behera, S. Sen, and S. C. Mishra, "Microstructure and property co-relation of 4% carbon fe-c alloy system," in *Hysteresis of Composites*. IntechOpen, 2019.
- [178] W. Wu, P. N. Njoki, H. Han, H. Zhao, E. A. Schiff, P. S. Lutz, L. Solomon, S. Matthews, and M. M. Maye, "Processing core/alloy/shell nanoparticles: Tunable optical properties and evidence for self-limiting alloy growth," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 115, no. 20, pp. 9933–9942, 2011.

APÊNDICE A - LISTA DE PUBLICAÇÕES

A.1 ARTIGO PUBLICADO EM PERIÓDICO

- ▷ H. P. Alves, J. F. Nascimento, E. Fontana, I. J. S. Coêlho and J. F. Martins-Filho, “Transition Layer and Surface Roughness Effects on the Response of Metal-based Fiber-optic Corrosion Sensors”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 13 pp. 2597-2605, 2018.

A.2 ARTIGOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS EM COLABORAÇÃO COM OUTROS PROJETOS

- ▷ M. S. Peixoto e Silva, T. H. Barros, H. P. Alves, J. F. Nascimento and J. F. Martins-Filho, “Evaluation of Fiber Optic Raman Scattering Distributed Temperature Sensor Between-196 and 400° C”, *IEEE Sensors Journal*, 2020.
- ▷ A. A. D. Silva, H. P. Alves, F. C. Marcolino, J. F. Nascimento and J. F. Martins-Filho, “Computational Modeling of Optical Fiber-Based Magnetic Field Sensors Using the Faraday and Kerr Magneto-optic Effects”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, no. 9, pp. 1-9, 2020.
- ▷ M. S. Peixoto e Silva, H. P. Alves, J. F. Nascimento and J. F. Martins-Filho, “Impact of Pulse Width on the Sensitivity and Range of a Raman-based Distributed Fiberoptic Temperature Sensor”, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 17, no. 4, pp. 539-551, 2018.

A.3 ARTIGOS EM FASE DE PREPARAÇÃO PARA PERIÓDICOS

- ▷ H. P. Alves, D. L. S. Nascimento, M. S. Peixoto e Silva, J. F. Nascimento, E. Fontana and J. F. Martins-Filho, “Influence of Surface Roughness on the Sensitivity of a D-shaped Optical Fiber-based Refractive Index Sensor”. *IEEE Journal of Lightwave*

Technology.

- ▷ H. P. Alves, A. A. Dias da Silva, J. F. Nascimento and J. F. Martins-Filho, “Improved Corrosion Sensor based on D-shaped Fiber with Structured Metallic Thin Film”. *Optical Fiber Technology - Elsevier*.
- ▷ H. P. Alves, M. S. Peixoto e Silva, A. A. Dias da Silva, J. F. Nascimento, E. Fontana and J. F. Martins-Filho, “Fabrication of D-shaped Optical Fiber for Sensing Applications: a Review”. *IEEE Sensors Journal*.
- ▷ H. P. Alves, M. S. Peixoto e Silva, H. J. B. Oliveira, J. F. Nascimento, E. Fontana and J. F. Martins-Filho, “Optical Fiber Corrosion Sensors: a Review”. *IEEE Sensors Journal*.

A.4 ARTIGOS PUBLICADOS EM CONFERÊNCIA NACIONAL

- ▷ H. P. Alves, D. L. S. Nascimento, M. S. Peixoto e Silva, J. F. Nascimento, E. Fontana e J. F. Martins-Filho. “Influência da Rugosidade de Superfície na Sensibilidade de um Sensor de Índice de Refração Baseado em Fibra Óptica com Perfil D”. In: MOMAG 2020 - 19º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 14º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Niterói, Rio de Janeiro. Anais do MOMAG 2020.
- ▷ H. P. Alves, M. S. Peixoto e Silva, J. F. Nascimento, E. Fontana e J. F. Martins-Filho. “Processo de Fabricação de Fibra Óptica Perfil D para aplicação em Sensores Ópticos”. In: MOMAG 2018 - 18º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 13º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Santa Rita do Sacupá, Minas Gerais. Anais do MOMAG 2018.

A.5 ARTIGOS PUBLICADOS EM CONFERÊNCIA NACIONAL EM COLABORAÇÃO COM OUTROS PROJETOS

- ▷ A. A. D. Silva, H. J. B. Oliveira, H. P. Alves, J. F. Nascimento e J. F. Martins-Filho. Modelagem Computacional de Sensor de Campo Magnético à Fibra Óptica Considerando Efeitos de Temperatura. In: MOMAG 2020 - 19º SBMO - Simpósio Brasileiro

de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14° CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Niterói-RJ. Anais do MOMAG 2020.

- ▷ J. O. Maciel Neto, E. Fontana, H. P. Alves, R. A. Lima. Protótipo de um Controlador Multiespectral com Lasers de Realimentação Distribuída. In: MOMAG 2020 - 19° SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14° CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Niterói-RJ. Anais do MOMAG 2020.
- ▷ M. S. Peixoto e Silva, H. P. Alves, J. F. Nascimento e J. F. Martins-Filho. Impacto da Largura de Pulso na Sensibilidade e no Alcance de Sensor Distribuído de Temperatura à Fibra Óptica Baseado em Espalhamento Raman. In: MOMAG 2018, Santa Rita do Sacupá-MG. Anais do MOMAG 2018 - Vale da Eletrônica.

A.6 ARTIGO PUBLICADO EM CONFERÊNCIA INTERNACIONAL

- ▷ H. P. Alves, J. F. Nascimento and J. F. Martins-Filho. Computational Modeling of a Fiber-based Corrosion-monitoring Sensor with Two Detection Ranges. In: SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Aveiro, Portugal. Proceedings of IMOC 2019.

APÊNDICE B - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

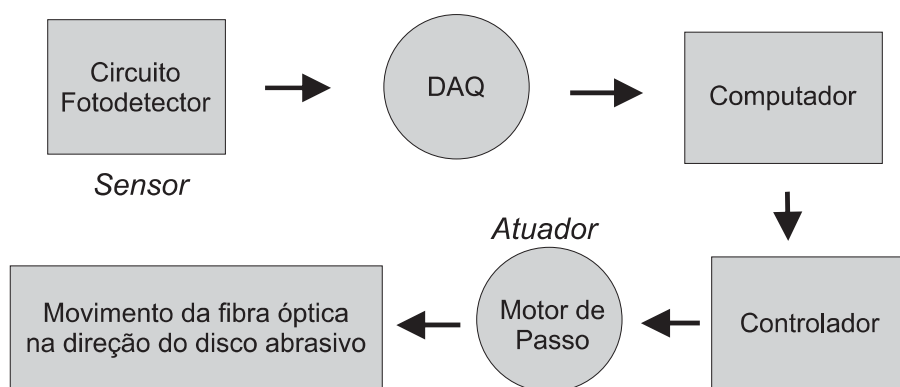
A automação do processo de fabricação de perfil D em fibras ópticas foi realizada como parte integrante das atividades de Iniciação Científica do estudante do curso de Engenharia Eletrônica do DES-UFPE, Daniel Lucas Silva do Nascimento, sob orientação do Prof. Joaquim F. Martins Filho e com minha supervisão. A instrumentação optoeletrônica que foi desenvolvida consiste em um sistema de aquisição de dados (DAQ - *Data Acquisition System*), para monitorar e enviar serialmente para o computador dados correspondentes à potência óptica guiada na fibra e um sistema de controle de movimento programável (PMCS - *Programmable Motion Control System*) que, baseado na potência óptica recebido pelo DAQ, controla um motor de passo da Thorlabs, que realiza passos da ordem de frações de micrômetros, baseado no tempo e potência óptica para aproximar ou afastar a superfície da fibra óptica do disco de polimento.

Para a criação do sistema DAQ, primeiramente, foi necessário a confecção de um circuito eletrônico em uma placa de circuito impresso (PCI), que tem as funções de: conversão do sinal óptico (detectado por um fotodiodo de (GaAs) para elétrico; filtragem do sinal elétrico, eliminando a tensão AC originada do *laser* pulsado utilizado na instrumentação; amplificação desse sinal para que possa ser processado pelo dispositivo DAQ e o computador. O circuito possui quatro saídas com diferentes ganhos de amplificação, pois tem-se uma grande faixa de potência óptica a ser varrida e sinais muito baixos não são detectados no dispositivo DAQ utilizado. O dispositivo DAQ utilizado foi um Arduíno Uno. São usadas quatro entradas analógicas para fazer a conversão, cada entrada é responsável por uma faixa de potência óptica. Através do DAQ, é feita a conversão analógico-digital e, juntamente com o computador, utilizando a conexão serial e ambiente de desenvolvimento integrado do Arduíno, foi possível programar o processamento do sinal e, consequentemente, quantizá-lo. A calibração do sistema DAQ foi realizada com um medidor de potência óptica da ANDO, modelo AQ2150A.

O sistema de controle de movimentos programáveis consiste numa CNC (*Computer*

Numerical Control) de alta precisão, de único eixo, que atua baseada no monitoramento da potência óptica e no tempo. Foi utilizado o motor de passo da Thorlabs, modelo ZFS25B, acoplado a um estágio de movimento e seu controlador, modelo KST101, que é o cérebro do sistema PMCS. Na Figura B.1, é mostrado um esquema simplificado para o funcionamento do sistema automático de fabricação de perfil D em fibra óptica. O PMCS junto ao DAQ compõem o par sensor e atuador, em que o sensor é o circuito fotodetector e o atuador é o motor de passo. Para a integração do PMCS com o sistema DAQ, foi usada a linguagem de programação gráfica Labview, que possibilitou receber os dados seriais da medição da potência óptica e, a partir destes dados, controlar o motor de passo automaticamente e, conseqüentemente, mover a fibra óptica para as posições desejadas, aproximando, afastando ou mantendo em contato com o disco abrasivo.

Figura B.1: Esquema simplificado do processo automatizado de fabricação de perfil D em fibra óptica com técnicas de polimento.



Fonte: O Autor, 2020.

APÊNDICE C - DEDUÇÃO DA EXPRESSÃO PARA A ESPESSURA DA CASCA RESIDUAL

A Figura C.1(a) ilustra a seção transversal de uma fibra óptica com perfil D e os parâmetros geométricos que a definem: raio do núcleo, R_{core} , raio da casca, R_{clad} , espessura da casca residual, d , largura da região plana do perfil D, w . A Figura C.1(b) ilustra o triângulo retângulo que é obtido com a parametrização da seção transversal da fibra óptica de perfil D, que auxilia na dedução de uma expressão para d .

Aplicando o Teorema de Pitágoras ao triângulo retângulo da Figura C.1(b), tem-se que:

$$(R_{core} + d)^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2 = R_{clad}^2 \Rightarrow (R_{core} + d)^2 = R_{clad}^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2 \Rightarrow$$

$$\sqrt{(R_{core} + d)^2} = \sqrt{R_{clad}^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} \Rightarrow d = \sqrt{R_{clad}^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} - R_{core}. \quad (C.1)$$

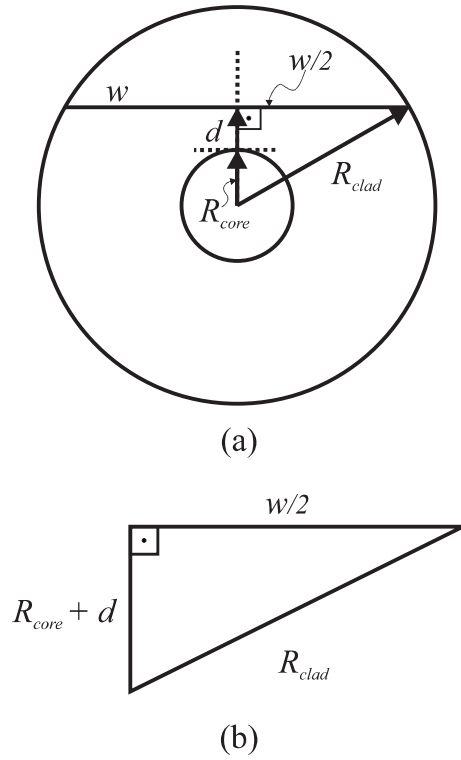
Definindo $R_{core} = D_{core}/2$ e $R_{clad} = D_{clad}/2$, em função dos diâmetros do núcleo, D_{core} , e casca, D_{clad} , respectivamente, tem-se que a expressão (C.1) é alterada para

$$d = \sqrt{\left(\frac{D_{clad}}{2}\right)^2 - \left(\frac{w}{2}\right)^2} - \frac{D_{core}}{2} \Rightarrow$$

$$\boxed{d = \frac{1}{2} \left(\sqrt{D_{clad}^2 - w^2} - D_{core} \right)}. \quad (C.2)$$

Portanto, fica deduzida, com base no Teorema de Pitágoras, a expressão que representa a espessura da casca residual da fibra óptica com perfil D, apresentada na Seção 3.6 do Capítulo 3 desta Tese de Doutorado.

Figura C.1: (a) Seção transversal de uma fibra óptica com perfil D parametrizada em termos dos raios do núcleo e casca, espessura da casca residual e largura da região plana. (b) Triângulo retângulo obtido com a parametrização.



Fonte: O Autor, 2020.