



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

HEBIO JUNIOR BEZERRA DE OLIVEIRA

**SENSORES À FIBRA ÓPTICA COM DUPLA CAMADA METÁLICA NA FACETA
E COM ESTRUTURA HETERONÚCLEO**

Recife

2022

HEBIO JUNIOR BEZERRA DE OLIVEIRA

**SENSORES À FIBRA ÓPTICA COM DUPLA CAMADA METÁLICA NA
FACETA E COM ESTRUTURA HETERONÚCLEO**

Tese submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fotônica.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Jehan Fonseca do Nascimento.

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

O48s Oliveira, Hebio Junior Bezerra de.
 Sensores à fibra óptica com dupla camada metálica na faceta e com
 estrutura heteronúcleo / Hebio Junior Bezerra de Oliveira. 2022.
 149 f: il.

 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, Recife, 2022.
 Inclui referências e apêndice.

 1. Engenharia elétrica. 2. Sensores. 3. Corrosão. 4. Índice de refração. 5.
Bicamada metálica. 6. Fibra óptica heteronúcleo; 7. Cascata. I. Martins Filho,
Joaquim Ferreira (Orientador). II. Nascimento, Jehan Fonseca do
(Coorientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 22

HEBIO JUNIOR BEZERRA DE OLIVEIRA

**SENSORES À FIBRA ÓPTICA COM DUPLA CAMADA METÁLICA NA
FACETA E COM ESTRUTURA HETERONÚCLEO**

Tese apresentada ao Programa de PósGraduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Fotônica.

Aprovada em: 21/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

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

Prof. Dr. Diego José Rátiva Millán (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Maria José Pontes (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedico a José Manoel de Oliveira e a Maria José Bezerra de Oliveira, meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre iluminar meus caminhos.

Ao meu orientador, Prof. 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.

Agradeço ao meu Co-orientador, Prof. Jehan Fonsêca do Nascimento, sempre contribuindo para minha formação de pesquisador e me ajudando no desenvolvimento desta Tese.

Agradeço aos professores Antônio Azevedo do DF-UFPE e Luís Leão do NICEN-UFPE Campus Agreste, pela deposição de filmes metálicos nas fibras ópticas.

Agradeço ao professor Charlie Salvador da UFPB, que contribuiu com a fabricação do suporte para fibras ópticas.

Agradeço ao Dr. Walter Margulis, da RISE Acreo, Suécia, pelas fibras sem núcleo (NCF) usadas nos experimentos.

Agradeço ao Filipe Mateus estudante de doutorado no DQF-UFPE, que colaborou na produção de um dos agentes corrosivos utilizados nos experimentos.

Agradeço aos meus amigos de Pós-Graduação, Henrique, Allamys, Marianne, Valdemir, Raoni, Marcionilo pelos vários momentos descontraídos e pela partilha de suas experiências.

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

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

A todos docentes e funcionários do programa de pós-graduação que contribuíram para minha formação intelectual e pessoal.

E a FACEPE, pela bolsa de Doutorado, ao CNPq, à CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPE pelo suporte financeiro.

"Não tentes ser bem sucedido, tenta antes ser um homem de valor." Albert Einstein.

RESUMO

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de dois dispositivos sensores à base de fibra óptica, um para monitorar corrosão usando uma estrutura com dupla camada metálica na faceta da fibra, o outro para detectar variações de índice de refração usando uma cascata de dispositivos com base em estruturas de fibra heteronúcleo, que funcionam de forma independente, e são interrogados em diferentes comprimentos de onda. Realizamos a caracterização dos dispositivos através de simulações computacionais. Os resultados das simulações são comparados com os resultados experimentais. Fizemos a caracterização experimental dos dois dispositivos sensores. Para o sensor de corrosão, a região de detecção está localizada em uma extremidade da fibra. Os sensores foram fabricados depositando filmes finos metálicos na faceta clivada da fibra óptica usando o método de sputtering. Mostramos que o uso de uma bicamada metálica como transdutor, ao invés de uma monocamada, melhora o intervalo de medição do sensor (20 ± 1 nm) e fornece informações sobre a taxa de corrosão desde o início do processo corrosivo. No segundo dispositivo, demonstramos sensores de índice de refração baseados na cascata de estruturas heteronúcleo usando fibras ópticas multimodo e sem núcleo em sequência. O dispositivo sensor é projetado para ter ressonâncias em diferentes comprimentos de onda usando diferentes comprimentos da região de detecção. Para os experimentos, as duas regiões do sensor são expostas a líquidos com diferentes índices de refração (IR). Para o comprimento de inserção de fibra heteronúcleo de 45 mm, o vale de transmissão é centrado em 1082,5 nm. Para a estrutura heteronúcleo de 30 mm de comprimento, o vale é centrado em 1599,7 nm. As sensibilidades do sensor são de até -476 dB/UIR e 270 nm/UIR. A resolução dos dispositivos é estimada em 2×10^{-5} UIR.

Palavras-chaves: sensores; corrosão; índice de refração; bicamada metálica; fibra óptica heteronúcleo; cascata.

ABSTRACT

The present work deals with the development of two sensor devices based on fiber optics, one to monitor corrosion using a structure with a double metallic layer on the fiber facet, the other to detect refractive index variations using a cascade of devices based on hetero-core fiber structures that function independently, and are interrogated at different wavelengths. We performed the characterization of the devices through computational simulations. Simulation results are compared with experimental results. We performed the experimental characterization of the two sensor devices. For the corrosion sensor, the detection region is located on a fiber end facet. The sensors were fabricated by depositing thin metallic films on the cleaved facet of the optical fiber using the sputtering method. We show that the use of a metallic bilayer as a transducer, instead of a monolayer, improves the sensor's measurement range (20 ± 1 nm) and provides information on the corrosion rate from the beginning of the corrosive process. In the second device, we demonstrate refractive index sensors based on the cascade of hetero-core structures using multimode and coreless optical fibers in sequence. The sensing device is designed to have resonances at different wavelengths using different lengths of the sensing region. For the experiments, the two regions of the sensor are exposed to liquids with different refractive indices (RI). For the hetero-core fiber insertion length of 45 mm, the transmission trough is centered at 1082.5 nm. For the 30 mm long hetero-core structure, the trough is centered at 1599.7 nm. Sensor sensitivities are down to -476 dB/RIU and 270 nm/RIU. Device resolution is estimated at 2×10^{-5} RIU.

Keywords: sensors; corrosion; refractive index; metallic bilayer; hetero-core optical fiber; cascade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de funcionamento do sensor de corrosão através da perda por curvatura na fibra óptica	31
Figura 2 – (a)Configuração do sensor de corrosão por fibra óptica (b) Configuração experimental	32
Figura 3 – Aparato experimental para monitorar o processo corrosivo	32
Figura 4 – (a) Diagrama em bloco do sistema sensor e (b) o filme de Fe-C depositado na face clivada do núcleo da fibra óptica	33
Figura 5 – Diagrama esquemático do sensor de corrosão com as cabeças sensoras numeradas	34
Figura 6 – Princípio de funcionamento do sensor de corrosão	35
Figura 7 – Ilustração do princípio de detecção de corrosão	35
Figura 8 – Esquema da estrutura do sensor baseado em FBG	36
Figura 9 – Sistema amplificado para monitoramento da corrosão	37
Figura 10 – Esquema da região sensora	38
Figura 11 – Esquema da detecção de corrosão por ultrassom	39
Figura 12 – (a) Fotografia de vigas de concreto armado antes da fundição do concreto e (b) após o teste de corrosão acelerada	40
Figura 13 – (a) Esquema da estrutura do sensor de corrosão FBG (b) configuração experimental para monitoramento de corrosão	41
Figura 14 – Diagrama esquemático da configuração para medições de microtensão ao longo da fibra óptica monomodo durante a galvanoplastia	41
Figura 15 – Estruturas de dois tipos de sensores hetero-core e esquema de curvatura utilizado no experimento	43
Figura 16 – Estruturas de dois tipos de sensor heteronúcleo	44
Figura 17 – (a), (b) e (c) Três esquemas de configuração experimental disponível	44
Figura 18 – Arranjo experimental	45
Figura 19 – Espectros de absorção	45
Figura 20 – Estrutura do sensor com camada de prata de 50 nm de espessura na superfície de revestimento da fibra SMF	46

Figura 21 – (a) Esquema experimental (b) Comprimento de onda da ressonância experimental em função do índice de refração para as várias espessuras de Au e Intensidade da luz transmitida em função do índice de refração (c) experimento em tempo real	47
Figura 22 – (a) Configuração experimental das roupas sensoriais (b) resposta do sensor localizado em um ombro no movimento de adução pelas roupas sensoriais .	48
Figura 23 – (a) Diagrama esquemático da estrutura da fibra heteronúcleo (b) e (c) Espectros de perda em soluções de teste	49
Figura 24 – (a) Configuração da luva sensora (b) Sistema de monitoramento da postura da mão em realidade virtual (c) resposta de perda óptica em tempo real dos sensores durante a flexão periódica do dedo polegar, (d) dedo indicador e (e) dedo anular	50
Figura 25 – Aparato experimental	50
Figura 26 – (a) O diagrama esquemático da fibra heteronúcleo incluindo o NCF de 20 mm de comprimento e o SMF (b) espectros de transmissão para medir diferentes índices de óleos	51
Figura 27 – (a) estrutura heteronúcleo (b) Características de umidade dos sensores de umidade de fibra óptica hetero-core sensores-1 e (c) sensores-2 usando LED de 1,31 μm (d) sensores-1 e (e) sensores -2 usando dois tipos de LEDs, 1,31 μm e UV	53
Figura 28 – (a) Fibra SMS metalizada (b) corrosão da região metalizada da SMS (c) Configuração experimental do sensor de corrosão baseado em SMS	54
Figura 29 – (a) Configuração do perfil heteronúcleo tradicional e modificado (b) diagrama esquemático do experimento	54
Figura 30 – Tecido inteligente com fibra óptica hetero-core	56
Figura 31 – Configuração experimental	56
Figura 32 – (a) diagrama esquemático da estrutura de fibra heteronúcleo (b) resposta espectral	57
Figura 33 – (a) Configuração esquemática do heteronúcleo FBG. (b) Espectro refletido do heteronúcleo FBG	59
Figura 34 – Diagrama esquemático do dispositivo de fibra óptica proposto	60

Figura 35 – (a) Diagrama esquemático e configuração experimental (b) resposta espectral do sensor à tensão sofrida (c) resposta do espectral do sensor à temperatura	61
Figura 36 – (a) diagrama esquemático da estrutura do sensor (b) espectros de transmissão do dispositivo	62
Figura 37 – (a) diagrama esquemático da estrutura do sensor (b) Os espectros de frequência e transmissão do interferômetro modal composto	63
Figura 38 – Diagrama esquemático baseado na estrutura SNS-núcleo deslocado com espelho rotador Faraday	64
Figura 39 – (a) Configuração do MZI proposto. (b) Fotografia microscópica da conicidade aumentado (c) Espectros de transmissão da resposta à temperatura com diferentes índices de refração do material	64
Figura 40 – Diagrama esquemático da fibra óptica com dupla camada metálica na face	66
Figura 41 – Suporte para preparar múltiplas estruturas sensoras	67
Figura 42 – Equipamento de <i>sputtering</i> utilizado na deposição (a) com câmara de vácuo fechada (b) com câmara de vácuo aberta	68
Figura 43 – (a) Câmara do <i>sputtering</i> onde podem ser vistos os eletrodos e a posição das fibras dentro da câmara (b) Posição onde é colocado o suporte com as fibras	68
Figura 44 – Esquema de fabricação fibra Heteronúcleo a) Perfil 1 e b) Perfil 2	69
Figura 45 – Esquema de fabricação fibra Heteronúcleo a) Perfil 3 e b) Perfil 4	70
Figura 46 – Esquema de fabricação da cascata de dispositivos de estrutura heteronúcleo	70
Figura 47 – Diagrama dos efeitos ópticos na ponta metalizada durante o processo de corrosão (a) com dois metais (b) com um metal (c) com parte do metal 1 (d) sem metal	72
Figura 48 – Estrutura heteronúcleo convencional (a) MSM (b) SMS (c) SMS composta por uma fibra sem núcleo (NCF) e (d) MNM composta por fibra NCF na região sensora	73
Figura 49 – Cascata de dispositivos com estrutura heteronúcleo MNM	75
Figura 50 – (a) Elemento sensor com bicamada metálica. (b) Sistema multicamada usado pelo modelo analítico (c) monocamada metálica	76
Figura 51 – (a) Diagrama da modelagem computacional em 2D do elemento sensor com dupla camada metálica (b) Malha triangular aplicada na modelagem .	83

Figura 52 – Morfologia proposta para a rugosidade de superfície gerada nos filmes metálicos	86
Figura 53 – Diagrama da modelagem computacional em 2D do elemento sensor com dupla camada metálica	87
Figura 54 – Esquema experimental para do sensor de corrosão com dupla camada metálica	92
Figura 55 – Reflectância (a) em função da espessura da bicamada Al(10nm)/Ni(10nm) (b) em função do tempo de corrosão da bicamada Al(10nm)/Ni(10nm) . .	95
Figura 56 – Reflectância (a) em função da espessura da bicamada Ni(10nm)/Al(10nm) (b) em função do tempo de corrosão da bicamada Ni(10nm)/Al(10nm) na solução do Al-Etch e (c) distribuição de potência óptica	96
Figura 57 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ni(10nm)/ Ag(50nm) no Cr-etch	97
Figura 58 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ni(10nm)/Ag(50nm) no Cr-etch	98
Figura 59 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ag(50nm)/ Ni(10nm) no Cr-etch	98
Figura 60 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ag(50nm)/Ni(10nm) no Cr-etch	99
Figura 61 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Cr(10nm)/ Ag(50nm) no Cr-etch	99
Figura 62 – Reflectância em função da espessura da bicamada Cr(10nm)/Ag(50nm) no Cr-etch	100
Figura 63 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ag(50nm)/ Cr(10nm) no Cr-etch	100
Figura 64 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ag(50nm)/Cr(10nm) no Cr-etch	101
Figura 65 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ti(10nm)/ Al(10nm) no Cr-etch	101
Figura 66 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ti(10nm)/Al(10nm) no Cr-etch	102
Figura 67 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Al(10nm)/ Ti(10nm) no Cr-etch	102

Figura 68 – Reflectância em função da espessura da bicamada Al(10nm)/Ti(10nm) no Cr-etch	103
Figura 69 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ti(10nm)/Al(10nm) no Si Iso-etch	103
Figura 70 – Reflectância em função da espessura da bicamada Al(10nm)/Ti(10nm) no Si Iso-etch	104
Figura 71 – Resultado experimental, numérico e analítico do processo de corrosão da bicamada com Ti(10 nm)/Al(10 nm) no Si Iso Etch	105
Figura 72 – Resultado experimental, numérico e analítico do processo de corrosão da bicamada com Ni(5 nm)/Al(5 nm) no Al-Etch	106
Figura 73 – Resultado da simulação numérica no COMSOL para o acoplamento do sinal óptico na superfície rugosa da bicamada metálica Ti/Al	107
Figura 74 – Reflectância em função do tempo de corrosão da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) na solução de Si Iso Etch	108
Figura 75 – Reflectância em função do tempo de corrosão da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) na solução de Si Iso Etch	108
Figura 76 – Reflectância em função do tempo de corrosão da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) na solução de Si Iso Etch	109
Figura 77 – Reflectância em função do tempo de corrosão da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) na solução de Si Iso Etch	110
Figura 78 – Reflectância em função do tempo de corrosão para três amostras de bicamadas Ti(10 nm)/Al(10 nm) no Al-Etch e Si Iso Etch	111
Figura 79 – Configuração experimental para medições (a) diagrama de teste do sensor de estrutura heteronúcleo tradicional (b) diagrama de teste do sensor de fibra de estrutura heteronúcleo em cascata	114
Figura 80 – Espectro de transmissão para os diferentes índices de refração obtidos a partir da simulação para L=30 mm	115
Figura 81 – Relação entre o índice de refração e a mudança de comprimento de onda de ressonância obtidos a partir dos resultados da simulação para L=30 mm	115
Figura 82 – Espectro de transmissão para os diferentes índices de refração obtidos a partir da simulação para L=35 mm	116
Figura 83 – Relação entre o índice de refração e a mudança de comprimento de onda de ressonância obtidos a partir dos resultados da simulação para L=35 mm	117

Figura 84 – Espectro de transmissão para os diferentes índices de refração obtidos a partir da simulação para $L=40$ mm	117
Figura 85 – Relação entre o índice de refração e a mudança de comprimento de onda de ressonância obtidos a partir dos resultados da simulação para $L=40$ mm	118
Figura 86 – Espectro de transmissão para os diferentes índices de refração obtidos a partir da simulação para $L=45$ mm	118
Figura 87 – Relação entre o índice de refração e a mudança de comprimento de onda de ressonância obtidos a partir dos resultados da simulação para $L=45$ mm	119
Figura 88 – Espectro de transmissão quando o índice de refração do meio externo é igual a 1,3370 para o comprimento da NCF (a) $L=30$ mm (b) $L=35$ mm (c) $L=40$ mm e (d) $L=45$ mm	119
Figura 89 – Relação entre o comprimento de onda de ressonância e diferentes comprimentos da fibra NCF ($L=30 - 45$ mm) para o IR de 1,3370 do meio externo	120
Figura 90 – (a) Resposta espectral do sensor com a mudança do IR externo; (b) deslocamentos do comprimento de onda do vale sob diferentes IR do meio externo	122
Figura 91 – (a) Resposta espectral do sensor com a mudança do IR externo; (b) deslocamentos do comprimento de onda do vale sob diferentes IR do meio externo	123
Figura 92 – (a) Resposta espectral do sensor com a mudança do IR externo; (b) deslocamentos do comprimento de onda do vale sob diferentes IR do meio externo	124
Figura 93 – (a) Resposta espectral do sensor com a mudança do IR externo; (b) deslocamentos do comprimento de onda do vale sob diferentes IR do meio externo	125
Figura 94 – Caracterização experimental do sensor de estrutura heteronúcleo cascadeado no modo de funcionamento exclusivo do Sensor I ($L_1=45$ nm)	127
Figura 95 – Caracterização experimental do sensor de estrutura heteronúcleo cascadeado no modo de funcionamento exclusivo do Sensor II ($L_2=30$ nm)	128
Figura 96 – Caracterização experimental do sensor em cascata no funcionamento simultâneo do Sensor I e Sensor II	129

Figura 97 – (a) e (b) mostram relação entre o comprimento de onda de ressonância e o índice de refração da solução em diferentes situações experimentais que inclui a estrutura heteronúcleo tradicional e em cascata	130
Figura 98 – (a) e (b) mostram a relação entre a transmissão relativa e o índice de refração da solução aquosa de NaCl para um comprimento de onda fixo em diferentes situações experimentais que inclui a estrutura heteronúcleo tradicional e em cascata	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros ópticos usados na modelagem do COMSOL	84
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OTDR	Reflectometria óptica no domínio do tempo
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
OFDR	<i>Optical Frequency Domain Reflectometry</i>
Au	Ouro
Ta ₂ O ₅	Pentóxido de tântalo
Pd	Paládio
SMS	<i>Single mode - Multimode - Single mode</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
MMF	<i>Multi Mode Fiber</i>
MMI	Interferência multimodal
NCF	<i>No-core Fiber</i>
Ewfd	<i>Electromagnetic waves frequency domain</i>
MNM	<i>Multimode- No-core-Multimode</i>
Ti	Titânio
Ni	Níquel
Al	Alumínio
Ag	Prata
Cr	Cromo

LISTA DE SÍMBOLOS

D_1	Espessura do metal 1
D_2	Espessura do metal 2
D_{clad}	Diâmetro da casca
D_{core}	Diâmetro do núcleo
L	Comprimento de inserção
L_1	Comprimento de inserção 1
L_2	Comprimento de inserção 2
r_1	Coeficiente de reflexão de Fresnel interface fibra óptica-filme
r_2	Coeficiente de reflexão de Fresnel interface filme-meio externo
n_0	Índice de refração da fibra
n_1	Índice de refração segundo meio
n_2	Índice de refração terceiro meio
Φ_1	Mudança de fase da luz incidente
d_i	Espessura do i-ésimo metal
λ	Comprimento da luz incidente no vácuo
n_i	Índice de refração do i-ésimo metal
R	Reflectância
$\vec{E}$	Vetor campo elétrico
$\vec{H}$	Vetor campo magnético
$\vec{J}$	Vetor densidade de corrente
$\vec{B}$	Vetor densidade de fluxo magnético
$\vec{D}$	Vetor densidade de fluxo elétrico

ϵ	Permissividade elétrica
μ	Permeabilidade magnética
σ	Condutividade elétrica
k_0	Número de onda no vácuo
w	Frequência de propagação
ϵ_0	Permissividade elétrica no vácuo
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
n	Índice de refração
β	Constante de propagação
E_z	Componente z do campo elétrico
H_z	Componente z do campo magnético
P_{in}	Potência de entrada do sinal óptico
S_{11}	Coeficiente de reflexão na porta 1
S_{21}	Coeficiente de transmissão na porta 2
L_{ext}	Espessura do meio externo
$A(d)$	Amplitude da rugosidade
Λ	Periodicidade da superfície rugosa
$R(d, s)$	Função rugosidade
μ_{0m}	Raiz de ordem m da função de Bessel
J_0	Função de Bessel
K_0	Função de Bessel modificada de segunda espécie
a_{MMF}	Raio do núcleo da fibra MMF

V_{MMF}	Frequência normalizada da fibra MMF
$n_{MMFcore}$	Índices de refração do núcleo da fibra MMF
$n_{MMFclad}$	Índices de refração da casca da fibra MMF
LP_{0m}	Modo de propagação
β_{0m}	Constante de propagação do modo LP0m
$T_{L1}(\lambda)$	Transmissão sensor I
$T_{L2}(\lambda)$	Transmissão sensor II
α	Coeficiente de expansão térmica da sílica fundida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	MOTIVAÇÃO	24
1.2	ORGANIZAÇÃO DA TESE DE DOUTORADO	27
2	SENSORES À FIBRA ÓPTICA: REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1	SENSORES DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA	30
2.2	SENSORES À FIBRA ÓPTICA HETERONÚCLEO	42
2.2.1	Aplicações de Sensores Heteronúcleo	42
2.2.2	Sensores de Fibras NCF em Cascata com outras Estruturas de Fibra	58
3	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE SENSORES A FIBRA ÓPTICA E MODELAGENS TEÓRICAS	66
3.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS COM DUPLA CAMADA METÁLICA	66
3.2	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS HETERONÚCLEO	69
3.3	PROCESSOS DE MONITORAMENTO USANDO FIBRA ÓPTICA	71
3.3.1	Monitoramento usando Fibra com Dupla Camada Metálica	71
3.3.2	Monitoramento usando Fibra Perfil Heteronúcleo	72
3.4	MODELAGEM COMPUTACIONAL DO ELEMENTO SENSOR COM DUPLA CAMADA METÁLICA	75
3.4.1	Modelo de Fresnel	76
3.4.2	Modelo Numérico sem Rugosidade usando o COMSOL Multiphysics	78
3.4.2.1	<i>Módulo de Ondas Ópticas</i>	79
3.4.2.2	<i>Equação de Onda</i>	79
3.4.2.3	<i>Estudo de Análise de Modo de Fronteira</i>	80
3.4.2.4	<i>Excitação de Ondas Eletromagnéticas</i>	81
3.4.2.5	<i>Cálculo da Reflectância</i>	82
3.4.3	Modelo Numérico com Rugosidade usando o COMSOL Multiphysics	85
3.5	MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO À FIBRA ÓPTICA HETERONÚCLEO	88
4	SENSOR DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA COM DUPLA CAMADA METÁLICA	91

4.1	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	91
4.2	RESULTADOS DA MODELAGEM DA CORROSÃO DO ELEMENTO TRANS- DUTOR DO SENSOR ÓPTICO COM DUPLA CAMADA METÁLICA . . .	92
4.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SENSOR ÓPTICO DE CORROSÃO COM DUPLA CAMADA METÁLICA	107
5	SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO À FIBRA ÓPTICA HETE- RONÚCLEO	113
5.1	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	113
5.2	RESULTADOS DA MODELAGEM DO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRA- ÇÃO À FIBRA ÓPTICA HETERONÚCLEO	114
5.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRA- ÇÃO BASEADO EM FIBRAS HETERONÚCLEO EM CASCATA MULTI- PLEXADO EM COMPRIMENTO DE ONDA	120
5.3.1	Teste do Sensor heteronúcleo de dispositivo único	121
5.3.2	Sensor Heteronúcleo em Cascata	126
6	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS	132
6.1	CONTRIBUIÇÕES DA TESE DE DOUTORADO	133
6.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	134
	REFERÊNCIAS	136
	APÊNDICE A – LISTA DE PUBLICAÇÕES	148

1 INTRODUÇÃO

Os sensores à base de fibra óptica são utilizados para monitoramento de diversas grandezas como corrosão, índice de refração, temperatura, pressão, umidade, corrente, tensão, campo magnético, campo elétrico, entre outras (PEREZ et al., 2021; YAO; YAN; BAO, 2021; VENKETESWARAN et al., 2022). As técnicas de monitoramento à base de fibras ópticas possui vantagens de leveza, simplicidade, versatilidade, segurança, confiabilidade, por isso possui uma perspectiva de aplicação muito grande (KAZANSKIY et al., 2021; HAN et al., 2021; VENKETESWARAN et al., 2022). Além disso, a fibra permite que os sinais sejam transmitidos por longas distâncias com poucas perdas, possibilitando um sistema de monitoramento remoto. A capacidade da fibra óptica de resistir a ambientes adversos é uma grande vantagem, para os sensores que serão constantemente expostos a ambientes hostis (LEE, 2003; MIN et al., 2021; HAN et al., 2021).

As fibras ópticas são imunes à interferência eletromagnética externa, portanto, fatores externos como ondas de rádio e linhas de transmissão de energia não afetam os sinais dentro da fibra óptica (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995). Essas vantagens tornam os sensores a base de fibra óptica ideais para uso em grandes estruturas de aço, como pontes, transformadores de potência elétrica, e em locais de difícil acesso e sujeitas a altas temperaturas e pressão, como na indústria de petróleo e gás, além de várias outras aplicações (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995; VENKETESWARAN et al., 2022). O desenvolvimento de sensores a base de fibra óptica tem sido intenso e várias empresas oferecem produtos comerciais para a indústria que contêm sensores a fibra óptica (UDD; JR, 2011; VENKETESWARAN et al., 2022).

Do ponto de vista industrial, os sensores a base de fibra óptica apresentam várias vantagens sobre seus concorrentes eletrônicos e mecânicos, pois apresentam excelente faixa dinâmica de atuação com baixo ruído, alta sensibilidade às variações das propriedades da medida, compactos e robustos e potencial para baixo custo e alta confiabilidade (UDD; JR, 2011; FAN; BAO, 2021). Os sensores de corrosão a base de fibra óptica podem utilizar várias técnicas para investigar o sinal óptico, como análise da intensidade da luz refletida ou transmitida, alteração no campo evanescente entre outros (UDD; JR, 2011; CHIAVAIOLI; JANNER, 2021). O sensoriamento através da análise da mudança de índice de refração (IR) é aplicável na indústria de produtos químicos, bebidas e alimentos, de forma que é possível controlar a qualidade no processo de fabricação (ZINOVIEV et al., 2011; LIU; PENG, 2021). As reações químicas e bioquímicas, tam-

bém podem ser monitoradas através de medidas da mudança do índice de refração (ZINOVIEV et al., 2011; LIU; PENG, 2021). Além disso, a fácil multiplexação no comprimento de onda e a compatibilidade com os sistemas de comunicação óptica de grande distância permitem realizar medições remotas de múltiplos pontos, além de medidas totalmente distribuídas com boa resolução espacial usando uma única fibra óptica (UDD; JR, 2011; FAN; BAO, 2021).

1.1 MOTIVAÇÃO

A corrosão é um dos principais mecanismos de danos que afetam as estruturas industriais, seja de engenharia, incluindo construções como pontes, tubulações de gás, dutos de petróleo, bem como estruturas de transporte móvel, como navios ou aeronaves, que normalmente operam em um ambiente altamente corrosivo (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995; RODRIGUES et al., 2021). A corrosão de maneira geral é considerada um processo espontâneo que continuamente modifica os materiais metálicos de tal maneira que o desempenho e durabilidade passam a ser comprometidos (GENTIL, 2011; RODRIGUES et al., 2021). Os danos por corrosão aumentam com a idade da estrutura, principalmente quando a vida útil do projeto original é excedida. A corrosão de estruturas metálicas é um risco real de acidentes, e está frequentemente associado a uma súbita quebra da estrutura (DONG et al., 2006; RODRIGUES et al., 2021; FAN; BAO, 2021). Existe uma grande demanda pelo desenvolvimento de novas técnicas de sensoriamento econômicas, para fornecer uma indicação precoce da corrosão sem desgaste significativo da estrutura e, portanto, reduzir o custo de manutenção e garantir a segurança, ou seja, são necessárias inspeções periódicas não apenas para os efeitos econômicos dos danos causados pela corrosão, mas também para segurança e imunidade (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995; DONG et al., 2006; FAN; BAO, 2021).

Nos últimos anos, sistemas de monitoramento de corrosão utilizando fibra óptica vêm sendo desenvolvidos (TANG et al., 2021; FAN; BAO, 2021). Na literatura existem trabalhos que utilizam fibra óptica com face clivada metalizada para a criação da região sensora (MARTINS-FILHO et al., 2007; QIAO; ZHOU; OU, 2006; NASCIMENTO et al., 2012). Esses sensores usam a técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo, como sistema interrogação, que podem ter múltiplos pontos de monitoramento. Os resultados apresentados nesses tipos de sistema mostraram a possibilidade de obtenção da taxa de corrosão do filme fino metálico a quilômetros de distância (MARTINS-FILHO et al., 2007). No entanto, nesses sistemas citados, há uma limitação operacional que consiste no tempo de monitoramento sem detectar o início

da corrosão. Isto ocorre pois, no início da corrosão, o filme metálico sobre a face clivada da fibra óptica ainda é espesso o suficiente para não gerar alterações na amplitude do sinal óptico refletido no elemento sensor (MARTINS-FILHO et al., 2007).

Para o monitoramento de variações de índice de refração, uma técnica simples e atrativa para construir sensores à fibra óptica é baseada no fenômeno de interferência multimodal (MMI) (WANG et al., 2020; GUZMÁN-SEPÚLVEDA; GUZMÁN-CABRERA; CASTILLO-GUZMÁN, 2021; WU et al., 2020; ZHAO; ZHAO; ZHAO, 2020). Em geral, os dispositivos e sensores de fibra MMI são convenientes porque sua arquitetura é simples, compacta e fácil de fabricar. A estrutura consiste em um pequeno comprimento de fibra sem núcleo (NCF), inserido entre dois trechos de fibra óptica multimodo (MMF), formando o perfil heteronúcleo MNM (*Multimode / No-Core fiber / Multimode*). Já a estrutura SNS (*Single mode / No-Core fiber / Single mode*) usa fibras monomodo em vez de multimodo. Revisões recentes sobre sensores de fibra heteronúcleo de interferência multimodo podem ser encontradas em (WANG et al., 2020; GUZMÁN-SEPÚLVEDA; GUZMÁN-CABRERA; CASTILLO-GUZMÁN, 2021; WU et al., 2020; ZHAO; ZHAO; ZHAO, 2020).

Em (JUNG et al., 2006) estudos experimentais em dispositivos MNM mostram a dependência do comprimento de onda de ressonância com o comprimento da região de detecção, e também que o sensor apresenta pouca sensibilidade cruzada de temperatura. Em (BUENO et al., 2013) foi demonstrada a viabilidade de três diferentes estruturas heteronúcleo para a detecção de IR. Em (CHEN et al., 2014) estudos experimentais e teóricos mostraram que a sensibilidade de um refratômetro baseado em SNS aumenta significativamente com a diminuição do diâmetro do NCF, mas é independente do comprimento do NCF. A detecção multiparâmetro usando dispositivos de interferência multimodo heteronúcleo foi descrita em (ZHANG et al., 2017b; OLIVEIRA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2016), no entanto, a obtenção de medições independentes, com baixa sensibilidade cruzada, pode ser desafiadora e pode influenciar a precisão das medições. Para obter medições independentes, vários métodos foram propostos (LIN et al., 2014; SHAO et al., 2015; ZHAO et al., 2014; LUO et al., 2014). Um método amplamente utilizado é a introdução de uma estrutura FBG ou SMS (CHEN et al., 2015) para obter medições de temperatura independentes dos valores de IR.

A detecção de IR multiponto usando apenas dispositivos de fibra MMI heteronúcleo foi demonstrada em (LIU et al., 2016; MUKAI; FUKANO, 2020; FUENTES-RUBIO; DOMÍNGUEZ-CRUZ; GUZMÁN-SEPÚLVEDA, 2021) usando estruturas SNS. Em (MUKAI; FUKANO, 2020) dispositivos MMI consistindo em estruturas SNS em configuração paralela são interrogados por um laser sintonizável integrável. O sistema compreende circulador óptico, acopladores, refletores na

ponta da fibra e alcançou alta sensibilidade para detecção simultânea de etanol em diferentes soluções. Em (FUENTES-RUBIO; DOMÍNGUEZ-CRUZ; GUZMÁN-SEPÚLVEDA, 2021) as estruturas SNS também em configuração paralela são interrogadas por um diodo superluminescente de banda larga e um analisador de espectro óptico usando acopladores de fibra. Os resultados indicam que cada sensor pode funcionar independentemente dos outros, e também mostram que as variações de temperatura são insignificantes em comparação com as mudanças de IR.

Neste sentido, esta Tese de Doutorado contribui com o desenvolvimento de dois dispositivos sensores baseados em fibras ópticas. No primeiro, propomos um sensor de corrosão utilizando uma bicamada metálica sobre a face clivada de uma fibra óptica monomodo. A seção de detecção está localizada em uma extremidade da fibra. O sistema sensor de corrosão baseado em uma bicamada metálica pode detectar a corrosão e fornecer informações sobre a taxa de corrosão. De acordo com o modelo clássico de multicamadas, as reações nas interfaces podem ser detectadas pela mudança de refletividade. Realizamos a caracterização do dispositivo através de simulações computacionais no software COMSOL *Multiphysics* e os resultados da simulação computacional são comparados com um modelo analítico, que faz uso das equações de Fresnel. As espessuras das camadas metálicas foram otimizadas via simulação. Para a fabricação das fibras ópticas com bicamada metálica na sua face, é utilizado o processo de deposição por *sputtering*.

As características de desempenho do sensor são mostradas experimentalmente em testes acelerados de corrosão em laboratório, implementados para verificar o desempenho do sistema de detecção proposto. Dois estudos experimentais foram apresentados para a região sensora, com diferentes espessuras e metais. Dependendo das propriedades ópticas e posicionamento dos filmes na fibra, é possível medir a taxa de corrosão de cada metal individualmente. A utilização de uma bicamada, ao invés de uma monocamada como nas publicações anteriores encontradas na literatura, melhora o intervalo de medição do sensor, atenuando o problema do período insensível do sensor identificado em dispositivos com estruturas de monocamada. O sensor proposto apresenta uma estrutura otimizada da bicamada metálica, com uma faixa de detecção duas vezes maior que a reportada na literatura.

Em um segundo dispositivo, propomos e demonstramos experimentalmente uma cascata de dispositivos sensores de IR baseados em estruturas de fibras MMI heteronúcleo para medições multiponto. Diferentemente de (LIU et al., 2016; MUKAI; FUKANO, 2020; FUENTES-RUBIO; DOMÍNGUEZ-CRUZ; GUZMÁN-SEPÚLVEDA, 2021), usamos estruturas MNM de menor perda de inserção projetadas para ter diferentes comprimentos de onda de ressonância. As estruturas

de fibra heteronúcleo são dispostas em série, em vez de em paralelo, e são interrogadas por uma fonte de luz de banda larga e um OSA analisando a luz transmitida. A configuração em série implica que não são necessários acopladores de fibra, circuladores ou refletores, o que simplifica o sistema de sensores. São apresentados resultados experimentais e de simulação dos dispositivos e sua dependência com o comprimento da seção de fibra NCF. A operação independente do sensor de IR, que é mais desafiadora na configuração em série, é investigada em uma cascata de dois dispositivos.

As sensibilidades do sensor em termos de mudança de comprimento de onda de ressonância e variações de intensidade em comprimentos de onda específicos são avaliadas. Essas sensibilidades são semelhantes ou maiores do que as relatadas anteriormente para dispositivos de detecção de heteronúcleo. Embora outras estruturas de sensores de fibra IR encontradas na literatura possam apresentar sensibilidades superiores, isso ocorre em detrimento de uma maior complexidade da estrutura do dispositivo, o que pode comprometer o custo de produção e a confiabilidade do sensor, tornando-o inadequado para determinadas aplicações. A cascata apresentada de sensores heteronúcleo é um bom candidato para detecção de IR multiponto de simples fabricação e baixo custo com sensibilidades razoáveis.

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 aborda os sensores à fibra óptica para detecção da corrosão, em que são mostradas as arquiteturas de elementos sensores, incluindo as que são à base de fibra óptica metalizada na faceta. Também são apresentadas algumas características desses sensores, por exemplo, a capacidade de fornecer a taxa de corrosão. A segunda trata dos sensores à fibra óptica com estrutura heteronúcleo, em que são destacadas as estruturas dos elementos sensores e suas aplicações na detecção de diversas grandezas e fenômenos. Também é discutido o cascadeamento de fibra NCF com outras estruturas para realizar medições múltiplos parâmetros e ampliar o campo de aplicação.

O Capítulo 3 apresenta uma abordagem de todas as ações desenvolvidas no processo de fabricação dos elementos transdutores e os processos teóricos. São mostrados os procedimentos de fabricação de fibras com dupla camada metálica na face para sensores de detecção de corrosão, e também de fibras heteronúcleo para sensores de índice de refração. Além disso,

apresenta os processos de monitoramento de corrosão para a fibra com bicamada metálica e também os processos de monitoramento de IR para dispositivos com estruturas de fibras heteronúcleo tradicional e em cascata. Adicionalmente, tem-se as modelagens computacionais dos elementos sensores com bicamada metálica e para o elemento sensor à fibra óptica de estrutura heteronúcleo.

O Capítulo 4 apresenta um sensor de corrosão baseado em fibra óptica com dupla camada metálica na faceta, que representa um dos dispositivos propostos nesta Tese de Doutorado. Nesse capítulo, são apresentadas atividades sistemáticas com as amostras de fibra óptica com dupla camada metálica, utilizadas na construção do sensor de corrosão e detalhes da montagem experimental. Adicionalmente, apresenta um conjunto de resultados das modelagens analítica que faz uso das equações de Fresnel e numérica usando o COMSOL *Multiphysics* para a caracterização do sensor de corrosão a partir da investigação da influência dos parâmetros do elemento sensor, como espessuras e o posicionamento dos filmes metálicos. Por fim, apresenta os resultados experimentais do sensor óptico de corrosão.

O Capítulo 5 mostra, através de experimentos, uma cascata de dispositivos com base em estruturas de fibra heteronúcleo, que funcionam de forma independente, ou seja, uma não altera as propriedades da outra, e são interrogados em diferentes comprimentos de onda, que representa o segundo dispositivo proposto nesta Tese de Doutorado. São destacados detalhes da montagem experimental usada para o sistema de detecção de índice de refração. Também apresenta os resultados da modelagem para a caracterização do sensor de índice de refração a partir da investigação da influência do comprimento da fibra NCF, para o desenvolvimento de elementos sensores para a construção de uma cascata de dispositivos operando em diferentes comprimentos de onda. Por fim, são mostrados os resultados experimentais do sensor de índice de refração baseado em fibras ópticas heteronúcleo em cascata multiplexado em comprimento de onda.

O Capítulo 6 destaca a importância das contribuições desta Tese de Doutorado, como também apresenta as perspectivas de trabalhos futuros que podem vir a contribuir com o aperfeiçoamento dos dispositivos propostos nos Capítulos 4 e 5.

2 SENSORES À FIBRA ÓPTICA: REVISÃO DA LITERATURA

O sensoriamento tornou-se uma tecnologia essencial e facilitadora em muitas áreas, tais como saúde, transporte e outras tecnologias industriais. Em muitas dessas aplicações avançadas, em que miniaturização, sensibilidade e medição remota são demandadas ou requeridas, as técnicas de detecção, baseadas em fibra óptica, vêm fornecendo novas alternativas (UDD, 1995). As técnicas de medição óptica receberam impulso nos anos 70, com o desenvolvimento de guias de ondas de fibra óptica de baixa perda e alta qualidade para o setor de telecomunicações. Posteriormente, foi implementado o uso de fibras ópticas como elementos sensores para o monitoramento de grandezas, como distância, velocidade, tensão, temperatura, fissuras, pressão, corrosão e conteúdo químico, oferecendo as mesmas vantagens que no campo da comunicação (GIALLORENZI et al., 1986; HAUS, 2010).

Os sensores à fibra óptica são pequenos, e podem ser integrados em áreas onde outros métodos de detecção são improváveis de serem implantados. Além disso, por serem à base de sílica, eles são compatíveis com uma ampla diversidade de materiais, e podem suportar níveis significativos de deformação sem apresentar falhas (UDD, 1995; LU; THOMAS; HELLEVANG, 2019). Os sensores a fibra óptica têm como principais características o baixo custo, baixa atenuação, imunidade a interferências eletromagnéticas externa, tornando-os o meio de detecção ideal para uma ampla gama de aplicações no mundo real (LU; THOMAS; HELLEVANG, 2019). O princípio de funcionamento de sensores à fibra óptica é basicamente transmitir um sinal de luz através de uma fibra, e avaliar o sinal de retorno ou transmitido. A mudança nas propriedades do sinal é traduzida em grandezas apropriadas que permitem a medição de vários parâmetros mecânicos, físicos e químicos, por exemplo (ZANGANI, 2013; RAJAN, 2015; WEBB, 2002).

Existem vários tipos de sensores de fibra óptica, nas mais diversas configurações, sendo desenvolvidos para as mais variadas aplicações de monitoramento, usando os mais diversos tipos de fibras ópticas, como monomodo, multimodo, grade de Bragg em fibra, fibra perfil D, fibra perfil hetero-core e outros (QIAO; ZHOU; OU, 2006; HAUS, 2010; DONG et al., 2006). Uma característica muito importante dos sensores de fibra óptica é a possibilidade de ter sistemas de detecção distribuídos ou quase distribuídos, que, de outra forma, seriam muito caros ou complicados usando sensores convencionais (KWAKERNAAK et al., 2012; ROGERS, 1981).

Os sensores à fibra são classificados como distribuídos quando os pontos de monitoramento

ocorrem ao longo de todo o prolongamento da fibra óptica (ROGERS, 1981; ROGERS, 1987; MIROVITSKII, 1991). São sensores classificados como quase-distribuídos ou multiponto, quando os pontos de monitoramento são regiões discretas ao longo do prolongamento da fibra óptica (ROGERS, 1981; ROGERS, 1987; MIROVITSKII, 1991). No entanto, sensores classificados como monoponto ou pontuais o monitoramento ocorre em um único ponto, ao longo de toda a extensão de fibra óptica (ROGERS, 1981; ROGERS, 1987; MIROVITSKII, 1991). Sensores também podem ser classificados como sensores extrínsecos, quando a detecção da grandeza a ser monitorada ocorre externa à fibra óptica (READY, 1997), e como sensores intrínsecos, quando a detecção da grandeza a ser monitorada ocorre no interior da fibra óptica (READY, 1997).

Entretanto, o objetivo deste capítulo é fazer uma revisão da literatura sobre sensores à fibra óptica para monitoramento da corrosão, em que serão abordados os seguintes aspectos gerais: na Seção 2.1, é apresentada de maneira geral, características importantes dos sensores de corrosão a base de fibras ópticas, com destaque para os sensores à fibra óptica com filmes metálicos depositados na fibra. Por fim, na Seção 2.2, são apresentados trabalhos sobre sensores ópticos que fazem uso de fibra de perfil heteronúcleo, mostrando a potencialidade desse perfil de fibra especial para detecção dos mais diversos fenômenos e grandezas.

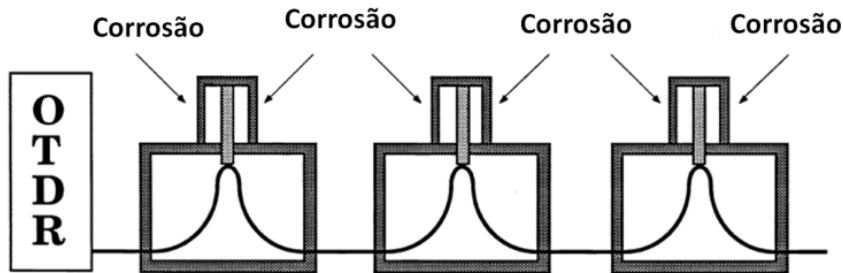
2.1 SENSORES DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA

Nesta seção, são destacadas algumas aplicações sobre sensores de corrosão à base de fibra óptica. Um modelo de sensor à fibra óptica para monitoramento da corrosão em grandes estruturas de aço foi projetado por Bennett e McLaughlin em 1995 (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995). O trabalho concentrou-se nos efeitos da corrosão uniforme por meio de reações eletroquímicas. É através desse processo, que o maior volume de material é perdido nas estruturas civis (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995). O princípio de funcionamento de monitoramento é através de perdas produzidas por microcurvaturas em uma fibra multimodo fixa com uma presilha metálica, quando a presilha metálica corroer, ela eventualmente quebra e permite que a fibra saia do estado de curvatura, e a diferença resultante na intensidade óptica consequente da fibra é detectada usando um OTDR ou outro detector óptico (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995).

O sensor apresenta algumas desvantagens e adversidades. Uma preocupação apresentada pelos autores é que cada sensor mede apenas a corrosão em um ponto no tempo, ou seja, quando a corrosão ocorre e a presilha de metal quebra o OTDR deixa de detectar as perdas por curvatura, e o sensor não informa nada sobre a corrosão que ocorre antes ou depois.

Outra preocupação é o design do sensor, que não se enquadra em uma das características dos sensores à fibra óptica que é a miniaturização, e não possui longevidade necessária para os testes de campo (BENNETT; MCLAUGHLIN, 1995). A Figura 1 mostra o esquema do sensor proposto por Bennett e McLaughlin.

Figura 1 – Esquema de funcionamento do sensor de corrosão através da perda por curvatura na fibra óptica

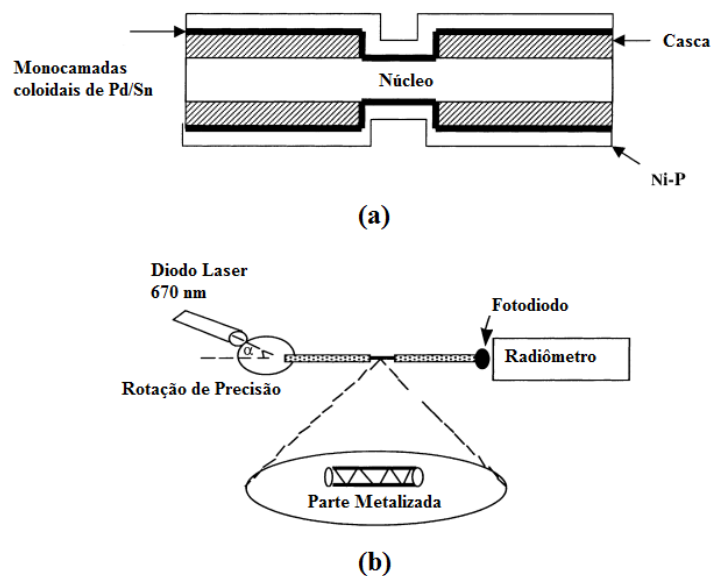


Fonte: BENNETT; MCLAUGHLIN (1995)

Sihem Abderrahmane e colaboradores em 2001 (ABDERRAHMANE et al., 2001), propuseram um sistema sensor para monitorar a corrosão de uma liga metálica, composta por Ni-P, depositado na lateral de uma fibra óptica em uma parte com 2 cm de comprimento. Foram utilizadas fibras de sílica revestidas de plástico (PCS) com diâmetro de núcleo de $400\ \mu\text{m}$, Figura 2 (a). A configuração experimental é mostrada na Figura 2 (b), a fonte de luz é um diodo laser com um feixe colimado que emite na faixa visível com comprimento de onda de 670 nm. A corrosão dessa liga metálica é monitorada pelas alterações na potência óptica transmitida, por meio de um fotodiodo conectado ao final do sistema óptico (ABDERRAHMANE et al., 2001). Essas alterações são devidas às mudanças no grau de absorção da liga metálica quando essa está sob corrosão (ABDERRAHMANE et al., 2001). Uma vantagem do trabalho proposto por Sihem Abderrahmane e colaboradores é que permite determinar a cinética da corrosão da liga metálica de Ni-P em relação ao trabalho de Bennett e McLaughlin.

Saying e colaboradores em 2006 (DONG et al., 2006) apresentaram um sistema para monitorar a corrosão numa liga composta de Fe-C depositada na região lateral de uma fibra óptica multimodo com estrutura semelhante a proposta por Sihem Abderrahmane e colaboradores. A região da fibra em que é feita a deposição da liga de Fe-C tem a casca removida, de modo que a liga fica em contato direto com o núcleo da fibra óptica. A corrosão do Fe-C é detectada através da variação na potência óptica transmitida, por meio de um medidor de potência

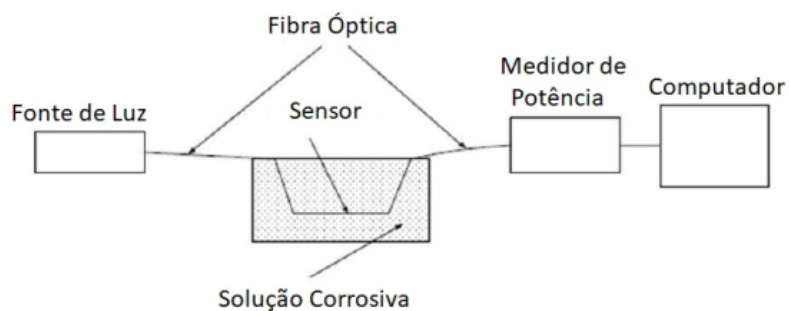
Figura 2 – (a) Configuração do sensor de corrosão por fibra óptica (b) Configuração experimental



Fonte: ABDERRAHMANE et al. (2001)

conectado no final do sistema óptico, como ilustra o aparato experimental da Figura 3 (DONG et al., 2006). A variação na potência é devida às mudanças no grau de absorção da liga de Fe-C quando está no processo corrosivo. Esse sistema sensor é capaz de medir a cinética de corrosão da liga metálica (DONG et al., 2006; DONG; LIAO; TIAN, 2005).

Figura 3 – Aparato experimental para monitorar o processo corrosivo

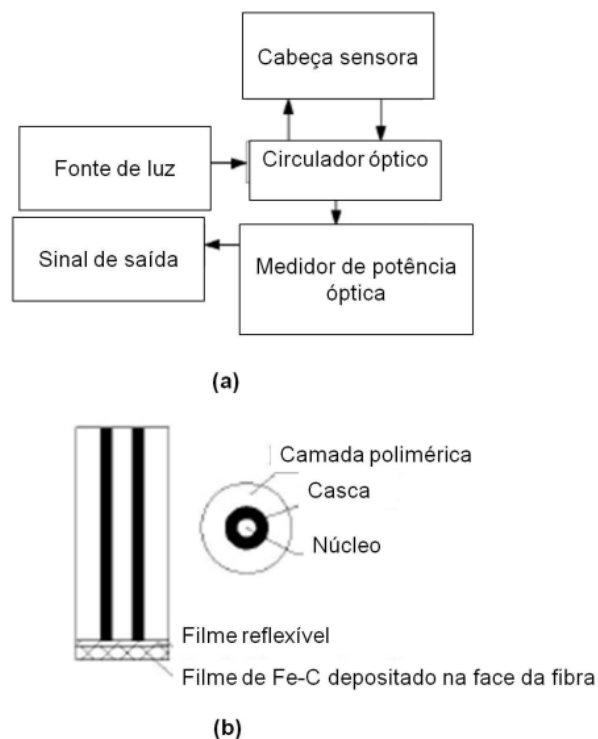


Fonte: DONG et al. (2006)

Ainda no ano de 2006, Qiao e colaboradores propuseram um sistema sensor de corrosão capaz de medir a taxa de corrosão (QIAO; ZHOU; OU, 2006). O sistema desenvolvido consiste de um sensor de corrosão por fibra óptica com filme fino de liga de Fe-C composto de duas partes: como ilustra a Figura 4 (a) o processo de detecção da corrosão é feito através da técnica de OTDR, em que é possível verificar a intensidade da luz refletida no filme metálico

em função do seu tempo de exposição ao agente corrosivo (QIAO; ZHOU; OU, 2006). A Figura 4 (b) ilustra a seção de detecção que é localizada em uma extremidade da fibra. A variação da luz refletida é uma indicação das mudanças ocorridas na parte frontal do filme. A alteração pode ser devida à corrosão do filme, o que pode causar a alteração da espessura do filme (QIAO; ZHOU; OU, 2006).

Figura 4 – (a) Diagrama em bloco do sistema sensor e (b) o filme de Fe-C depositado na face clivada do núcleo da fibra óptica

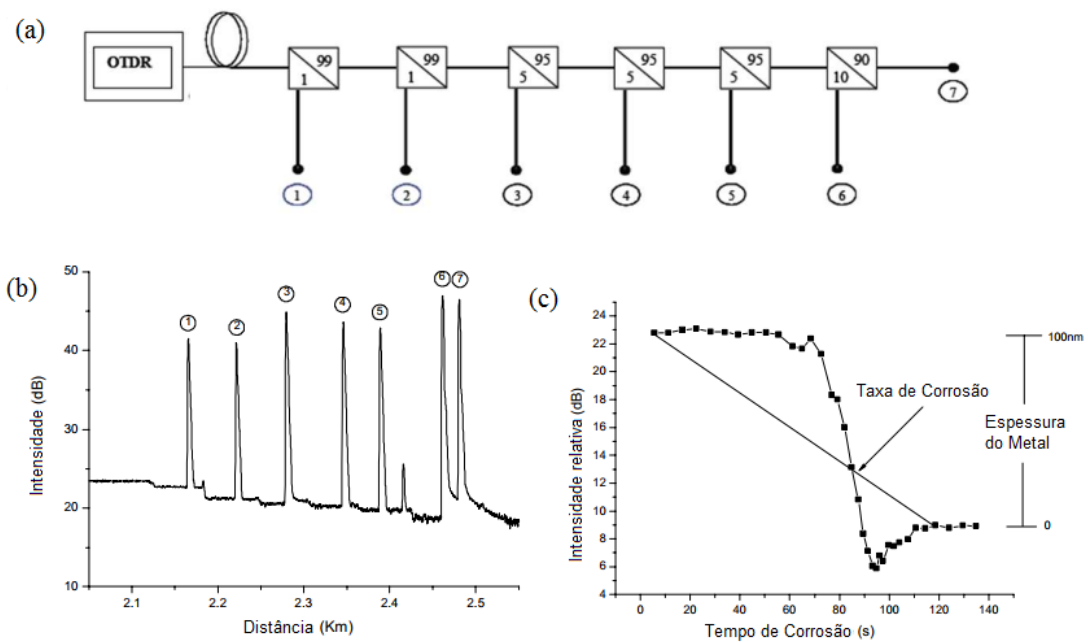


Fonte: QIAO; ZHOU; OU (2006)

Martins-Filho e colaboradores em 2007, propuseram um sensor óptico para monitorar o processo de corrosão em alumínio usando a técnica de reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR) (MARTINS-FILHO et al., 2007), como ilustra a Figura 5. O sistema de sensoriamento proposto consiste em várias cabeças sensoras conectadas em um OTDR comercial através de prolongamentos de fibras ópticas monomodo (MARTINS-FILHO et al., 2007). Os acopladores direcionais dividem o sinal óptico de modo que uma pequena fração (1, 5 ou 10%) é direcionada para as cabeças sensoras. Cada cabeça sensora é formada por uma fibra óptica com a extremidade clivada onde é depositado o filme fino metálico de alumínio usando a técnica de evaporação térmica (MARTINS-FILHO et al., 2007). Esses filmes metálicos constituem o elemento transdutor das cabeças sensoras. A espessura dos filmes metálicos diminui quando são expostos a uma solução corrosiva. Essa variação de espessura é verificada através da luz

refletida (MARTINS-FILHO et al., 2007). A Figura 5 (b) apresenta o traço do OTDR obtido pelo sistema sensor proposto por Martins-Filho e colaboradores (MARTINS-FILHO et al., 2007). Com esse traço é possível identificar as reflexões geradas pela incidência da luz na interface metálica na ponta de cada cabeça sensora. Assim, é possível analisar a curva da potência relativa em função do tempo de corrosão, obtida por uma das cabeças sensoras, conforme ilustrado na Figura 5 (c) (MARTINS-FILHO et al., 2007).

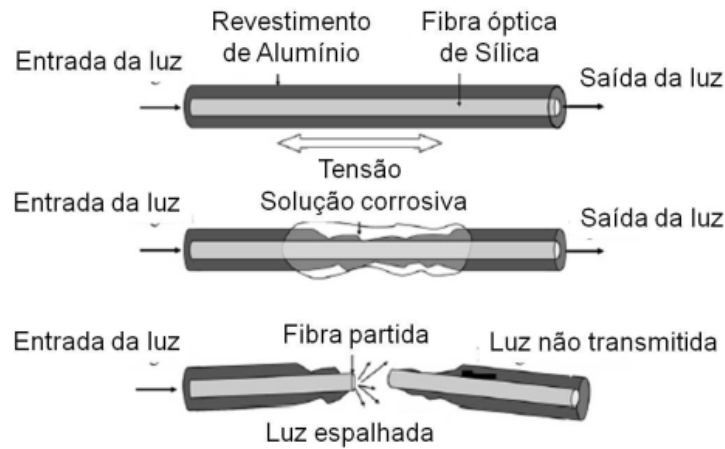
Figura 5 – Diagrama esquemático do sensor de corrosão com as cabeças sensoras numeradas



Fonte: MARTINS-FILHO et al. (2007)

Em 2008, Wade e colaboradores propuseram um novo sensor de corrosão à fibra óptica, baseado na falha mecânica das fibras ópticas revestidas de metal, quando expostas a um ambiente corrosivo (WADE et al., 2008). A Figura 6 ilustra o princípio básico de detecção do sensor de corrosão por fibra óptica revestido de metal, onde um sinal óptico se propaga no núcleo da fibra óptica (WADE et al., 2008). Quando a fibra é exposta a um agente corrosivo, o revestimento metálico da fibra é corroído. Após um certo período de tempo, o revestimento de vidro da fibra óptica é exposto. Uma vez exposto o vidro, a fibra quebra dependendo de vários fatores, incluindo o nível de estresse e a quantidade de umidade presente (WADE et al., 2008). Após a ruptura da fibra, o sinal óptico transmitido até a outra extremidade da fibra óptica é perdido, de forma que a perda de sinal pode ser usada para indicar a presença de corrosão (WADE et al., 2008).

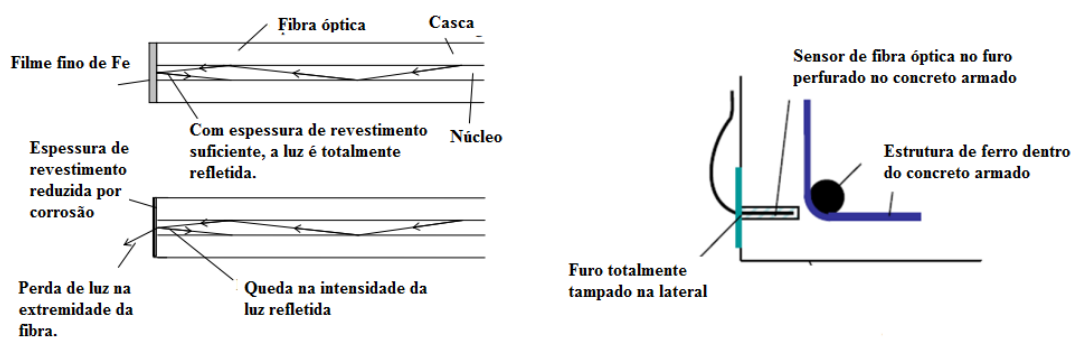
Figura 6 – Princípio de funcionamento do sensor de corrosão



Fonte: WADE et al. (2008)

Ainda em 2008, Leung e colaboradores propuseram o desenvolvimento de um sensor à fibra óptica de baixo custo para a corrosão do aço, baseado em um princípio físico muito simples (LEUNG; WAN; CHEN, 2008), ilustrado na Figura 7. A extremidade plana de uma fibra óptica cortada é revestida com uma película fina de ferro usando a técnica de pulverização de íons. A luz é transmitida pelo núcleo da fibra embutida no concreto e o sinal refletido é monitorado. Inicialmente, a maior parte da luz é refletida pela camada de ferro (LEUNG; WAN; CHEN, 2008). Quando o processo corrosivo ocorre e a camada de ferro vai sendo removida, uma parte significativa da luz deixa a fibra na extremidade exposta e a luz refletida é bastante reduzida. O monitoramento do sinal refletido é, portanto, uma maneira eficaz de avaliar se o ambiente de concreto no local da ponta da fibra pode induzir corrosão do aço ou não (LEUNG; WAN; CHEN, 2008).

Figura 7 – Ilustração do princípio de detecção de corrosão

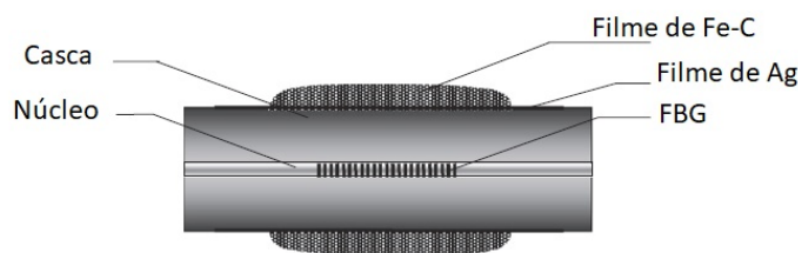


Fonte: LEUNG; WAN; CHEN (2008)

Em 2009, Grattan e colaboradores propuseram um sistema sensor à fibra óptica para medição eficaz no local do início ou da taxa de corrosão do aço em estruturas de concreto armado (GRATTAN et al., 2009). A experimentação foi feita realizando uma série de testes por períodos prolongados, juntamente com a aceleração da corrosão feita intencionalmente, determinando o desempenho dos sistemas de sensores à base de fibra de Bragg conectados a barras de reforço de aço de alta resistência fundidos em blocos de concreto (GRATTAN et al., 2009). Os resultados obtidos foram comparados com os resultados dos sensores convencionais para detectar corrosão do aço em estruturas de concreto armado. Os resultados mostram os benefícios no uso de redes de fibra óptica nessas circunstâncias e sua capacidade de fornecer dados, ao passo que os sensores convencionais falham (GRATTAN et al., 2009).

Em 2011, Wenbin Hu e colaboradores apresentaram um sensor para monitorar corrosão em aço utilizando uma fibra de grade de Bragg (HU et al., 2011). Uma grade de Bragg de fibra (FBG) é uma estrutura com modulação periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica fotossensível. Se comporta como um filtro espectral que é muito sensível à deformações e temperatura (HU et al., 2011). A Figura 8 mostra a estrutura proposta por Wenbin Hu e colaboradores (HU et al., 2011), que consiste de uma fibra de grade de Bragg com a superfície lateral metalizada com um filme de prata e sobre esse filme é depositada uma camada de uma liga metálica Fe-C (HU et al., 2011). Na presença de um agente corrosivo, a liga de Fe-C começa a oxidar, provocando alterações na espessura do filme de Fe-C (HU et al., 2011). A expansão longitudinal do filme metálico é limitada pelo comprimento da fibra gerando, portanto, estresse nessa região (HU et al., 2011). O estresse provoca mudanças na periodicidade da FBG, com isso ocorre um deslocamento do comprimento de onda de Bragg (HU et al., 2011).

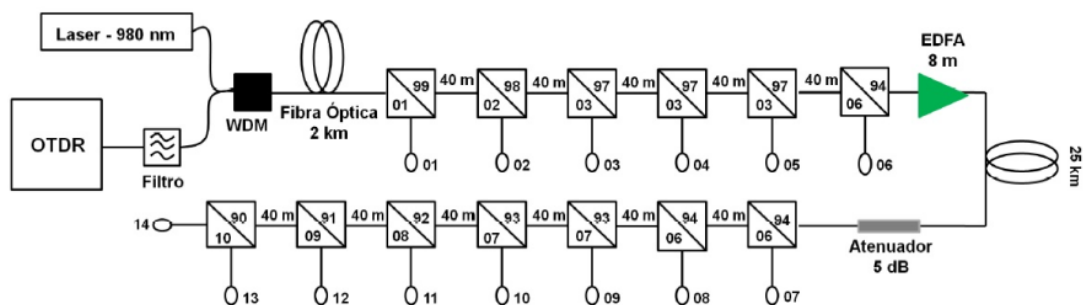
Figura 8 – Esquema da estrutura do sensor baseado em FBG



Fonte: HU et al. (2011)

Em 2012, Nascimento e colaboradores (NASCIMENTO et al., 2012) propuseram um sensor de corrosão amplificado baseado em fibra óptica, usando a técnica de OTDR como método de interrogação, sistema semelhante ao proposto por Martins-Filho (MARTINS-FILHO et al., 2007). O sistema possui amplificação óptica gerada/produzida por um amplificador a fibra dopada com érbio EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), aumenta a amplitude do sinal da propagação na fibra e o alcance/distancia, com isso possibilita monitorar a corrosão à longas distâncias. A Figura 9 ilustra o sistema amplificado que utiliza um laser de bombeio de 980 nm e 8 metros de fibra dopada com érbio para construção do EDFA (NASCIMENTO et al., 2012). No início do sistema óptico tem-se, as cabeças sensoras de 1 a 6, que representam o sistema sensor proposto por Martins-Filho (MARTINS-FILHO et al., 2007). Com o uso da amplificação do sinal óptico, é possível aumentar o alcance dos pontos de monitoramento em dezenas de quilômetros. No entanto, sem um estágio de amplificação, é possível monitorar a corrosão em vários pontos apenas à pequenas distâncias (NASCIMENTO et al., 2012).

Figura 9 – Sistema amplificado para monitoramento da corrosão

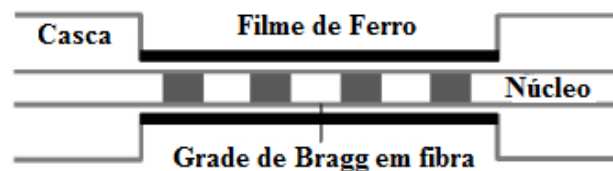


Fonte: NASCIMENTO et al. (2012)

Em 2015, Zhang e colaboradores (ZHANG et al., 2015) propuseram um sistema fazendo uso de fibra de grade de Bragg para monitorar a corrosão em estruturas de concreto armado semelhante ao sistema sensor proposto por Wenbin Hu e colaboradores (HU et al., 2011). Como mostra a Figura 10, a casca da fibra óptica é removida na região onde a grade de Bragg é produzida e o filme de ferro é depositado (ZHANG et al., 2015). O monitoramento da corrosão é feito através do OSA por meio da observação do deslocamento do comprimento de onda de Bragg, devido às mudanças no índice de refração efetivo da região que constitui o filme de Ferro e a grade de Bragg, provocadas pelo processo corrosivo (ZHANG et al., 2015). O sensor

é capaz de fornecer a taxa de corrosão, associando o deslocamento do comprimento de onda de Bragg no tempo com a variação da espessura do metal ao longo do processo de corrosão. No entanto, o sensor monitora a corrosão em apenas um ponto (ZHANG et al., 2015).

Figura 10 – Esquema da região sensora



Fonte: ZHANG et al. (2015)

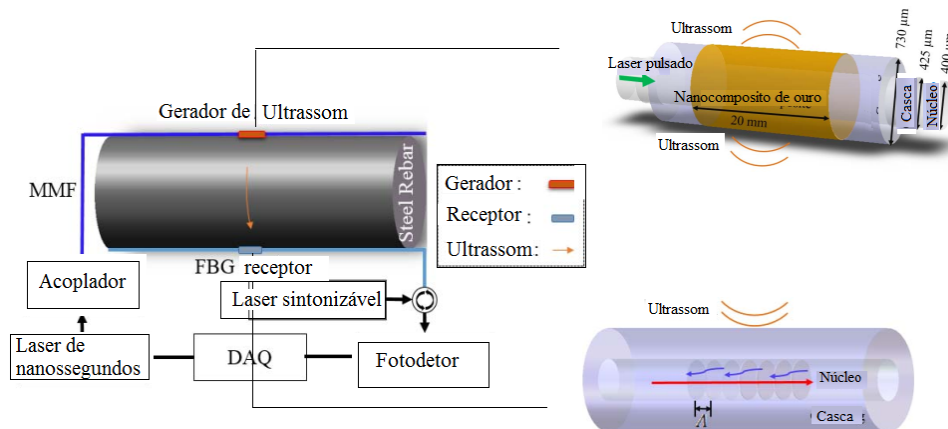
Para monitorar a corrosão, Almubaied e colaboradores em 2017 (ALMUBAIED et al., 2017) propuseram um sensor baseado na técnica de detecção de FBG. O método usa o volume de produtos de corrosão para detectar a evolução do processo corrosivo. No experimento o processo de corrosão foi acelerado em laboratório. Foi encontrada uma correlação entre o deslocamento do comprimento de onda da FBG e a porcentagem de corrosão (ALMUBAIED et al., 2017). Os resultados indicam que a ocorrência de atividades de corrosão acumuladas, que introduziram tensões, causa uma mudança gradual no comprimento de onda da FBG ao longo do tempo. Também relaciona a alteração do comprimento de onda da FBG com o nível de corrosão, expresso em termos de perda de massa de aço por porcentagem, ou seja, é a perda de peso da barra de aço pelo peso original da barra antes do início do processo de corrosão (ALMUBAIED et al., 2017).

Em 2018, Liang Ren e colaboradores apresentaram um sistema sensor para monitorar corrosão e vazamentos em vários pontos de um sistema de oleodutos e gasodutos fazendo uso da técnica de reflectometria óptica no domínio da frequência OFDR (REN et al., 2018). No teste de corrosão, vários sensores de fibra óptica foram ligados à superfície do tubo com o mesmo intervalo, formando uma matriz de sensores. Com base na matriz de sensores, foram produzidas imagens da deformação circular na parede do tubo para mostrar o nível e a localização da corrosão (REN et al., 2018). No teste de vazamento, os resultados indicaram que o vazamento da tubulação pode ser detectado pelo sensor de fibra óptica distribuído (REN et al., 2018).

Em 2019, Du e colaboradores propuseram um sistema de detecção de ultrassom totalmente óptico baseado no princípio fotoacústico para monitorar e investigar o início da corrosão do vergalhão de aço em tempo real (DU et al., 2019), conforme ilustrado na Figura 11. O gerador

de ultrassom foi desenvolvido por nanocompósitos de ouro revestidos em fibras ópticas para gerar sinais de largura de banda de 8 MHz. O receptor de ultrassom foi adaptado por um sensor de fibra de grade de Bragg. Este sistema foi empregado inicialmente a fim de substituir a aplicação de sensores elétricos convencionais devido às suas vantagens exclusivas, incluindo tamanho em miniatura, peso leve, imunidade a interferência eletromagnética, resistência à corrosão e capacidade de detecção distribuída (DU et al., 2019).

Figura 11 – Esquema da detecção de corrosão por ultrassom



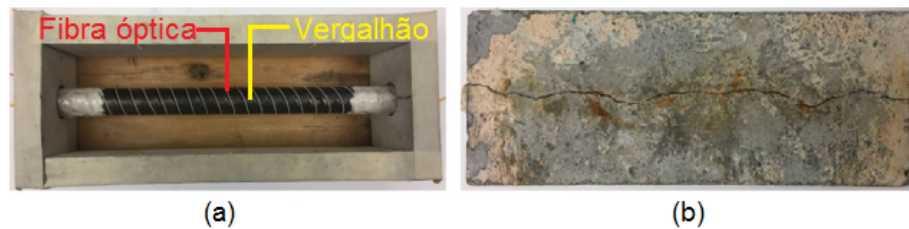
Fonte: DU et al. (2019)

Testes de corrosão acelerada foram realizados em laboratório para validar o sistema de detecção (DU et al., 2019). Du e colaboradores demonstraram que o sistema de detecção de ultrassom totalmente óptico era capaz de monitorar os primeiros sinais de corrosão do vergalhão. Segundo os autores (DU et al., 2019), com este método de avaliação da corrosão do vergalhão de aço o trabalho também contribuiu para um novo elemento sensor capaz de monitorar a superfície do círculo completo do vergalhão em um espaço estreito de $\sim 0,5$ mm de diâmetro com uma resolução de alta frequência de 8 MHz.

Em 2020, Liang Fan e colaboradores propuseram um sistema para monitoramento da corrosão in situ para concreto armado com um sensor de fibra óptica distribuído (FAN et al., 2020). Vigas de concreto armado instrumentadas com sensores de fibra óptica distribuídos foram preparadas. O sistema é imerso em uma solução de $NaCl$ para promover uma corrosão acelerada. O sensor de fibra óptica distribuído foi implantado em um padrão de hélice na barra de aço para medir tensões expansivas geradas pela corrosão da barra de aço (FAN et al., 2020; FAN et al., 2019), como mostra a Figura 12. O processo de corrosão da barra de aço foi avaliado em um teste eletroquímico. A tensão medida no sensor foi utilizada para avaliar o

volume dos produtos de corrosão ao redor das barras de aço e prever a fissuração da cobertura de concreto. A relação entre a perda de massa de barras de aço e o volume de produtos de corrosão é estabelecida para fornecer um método para avaliar os efeitos da corrosão do aço na deterioração do concreto armado (FAN et al., 2020).

Figura 12 – (a) Fotografia de vigas de concreto armado antes da fundição do concreto e (b) após o teste de corrosão acelerada

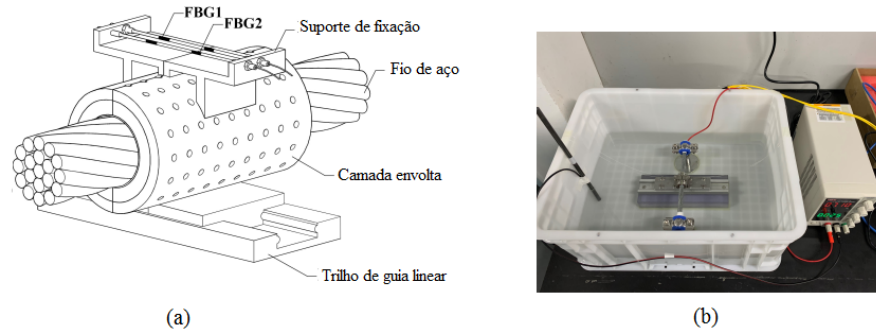


Fonte: FAN et al. (2020)

Atualmente, abordagens de monitoramento da corrosão usando fibras ópticas estão sendo publicadas (RAMANI; KUANG, 2021; MA et al., 2021; WRIGHT et al., 2021). Ma Jun e colaboradores (MA et al., 2021) propuseram e desenvolveram um sensor de corrosão por tração usando uma fibra de grade de Bragg (FBG), que pode monitorar com precisão a corrosão do fio de aço em tempo real (MA et al., 2021), como ilustrado na Figura 13. Os pesquisadores estudaram o desempenho do sensor de corrosão através de um experimento acelerado de corrosão eletroquímica. Os resultados experimentais mostraram que o sensor pode monitorar a corrosão leve e moderada do fio de aço com precisão e eficácia, portanto, o sensor de corrosão é viável e tem amplas perspectivas de aplicação na engenharia de linhas de transmissão (MA et al., 2021). Segundo os pesquisadores (MA et al., 2021), nos últimos anos, a corrosão de fios de aço para cabos de aterramento aéreos também vem sendo detectada durante as operações de rotina. Sendo assim, é de grande importância monitorar com eficiência a corrosão do fio de aço em tempo real (MA et al., 2021). Para Ma Jun e colaboradores, o desenvolvimento e aplicação bem-sucedidos do sensor de corrosão de tração FBG podem não apenas prevenir com eficácia os acidentes graves causados pelos danos de corrosão do fio de aço, mas também reduzir significativamente o período de inspeção do cordão de aço, sendo de grande importância para a inspeção inteligente de linhas de transmissão e tem amplas perspectivas de aplicação na engenharia de linhas de transmissão (MA et al., 2021).

Ainda em 2021, Wright e colaboradores (WRIGHT et al., 2021), com o objetivo de desenvolver um dispositivo capaz de monitorar e localizar a corrosão interna, ao longo dos dutos de gás natural, para evitar vazamentos de metano e falhas catastróficas, propuseram e desenvolveram,

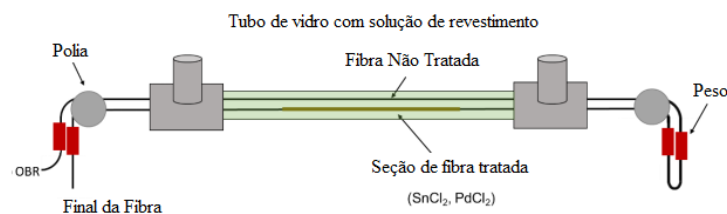
Figura 13 – (a) Esquema da estrutura do sensor de corrosão FBG (b) configuração experimental para monitoramento de corrosão



Fonte: MA et al. (2021)

conforme mostrado na Figura 14, um sensor distribuído de corrosão à fibra óptica usando uma fibra de monomodo revestida com filme metálico, as medidas eram realizadas através de um refletômetro óptico de retroespalhamento (OBR), com base nas alterações de tensão durante a dissolução do filme metálico (WRIGHT et al., 2021). O OBR fornece um perfil espacial de microdistorções ao longo de toda a fibra óptica em tempo real com informações de localização, o que permite o monitoramento de deformações distribuídas ao longo da fibra. O revestimento eletrolítico leva a tensões internas inerentes ao revestimento metálico e, portanto, induz deformações nas fibras ópticas (WRIGHT et al., 2021). Conforme a película metálica é dissolvida ou corroída, a tensão interna é liberada e causa mudanças opostas na deformação, que podem ser usadas para monitoramento de corrosão. As microdeformações induzidas exclusivamente por galvanoplastia ou dissolução de metal foram medidas in situ e em tempo real usando o OBR, e sobre as interferências de mudanças de temperatura e inchaço induzido por água. É importante ressaltar que os pesquisadores fizeram uma compensação através da comparação entre a seção tratada (sensibilizada e ativada) e uma seção de controle não tratada (WRIGHT et al., 2021).

Figura 14 – Diagrama esquemático da configuração para medições de microtensão ao longo da fibra óptica monomodo durante a galvanoplastia



Fonte: WRIGHT et al. (2021)

Esta seção apresentou vários estudos científicos sobre sensores de corrosão à fibra óptica. Foram destacadas técnicas como monitoramento da potência transmitida ou refletida, os mais diferentes tipos de fibras ópticas usadas nesses tipos de sensores como fibras monomodo, multimodo, fibras de grade de Bragg que são empregadas em diversas configurações e fibras com casca removida completamente, a Seção 2.2 apresenta um estudo a respeito potencial da fibra óptica perfil heteronúcleo na elaboração de sensores para monitorar corrosão.

2.2 SENSORES À FIBRA ÓPTICA HETERONÚCLEO

Esta seção apresenta alguns dos sensores à base de fibra óptica perfil heteronúcleo utilizados para as mais variadas aplicações que podem ser obtidos na literatura nos últimos 21 anos. A característica estrutural única da fibra óptica perfil heteronúcleo estendeu as aplicações de detecção baseadas em interferência multimodo, absorção de ondas evanescentes e revestimento de materiais, que são amplamente utilizados na medição de vários parâmetros físicos, químicos e biológicos. Na Seção 2.2.1, apresentamos uma visão geral das aplicações de detecção baseadas em fibras heteronúcleo com ênfase em métodos de medição, melhorias estruturais e a combinação de materiais sensíveis. Diferentes transdutores de sensores baseados em fibras heteronúcleo são descritos. Na Seção 2.2.2, são discutidos os sensores em cascata de fibra NCF com grade de Bragg de fibra (FBG) ou outras estruturas, com diferentes princípios de análise e as vantagens da melhoria estrutural desses perfis para realizar medições multiparâmetros e ampliar o campo de aplicação. Um sensor à fibra óptica perfil heteronúcleo pode ser simplesmente fabricado por emenda de uma porção de fibra monomodo (SMF) entre dois prolongamentos de fibras multimodos (MMF) ou fibras monomodos com núcleos diferentes (WATANABE; TAJIMA; KUBOTA, 2000; IGA et al., 2003; SASAKI; KUBOTA; WATANABE, 2004), por exemplo.

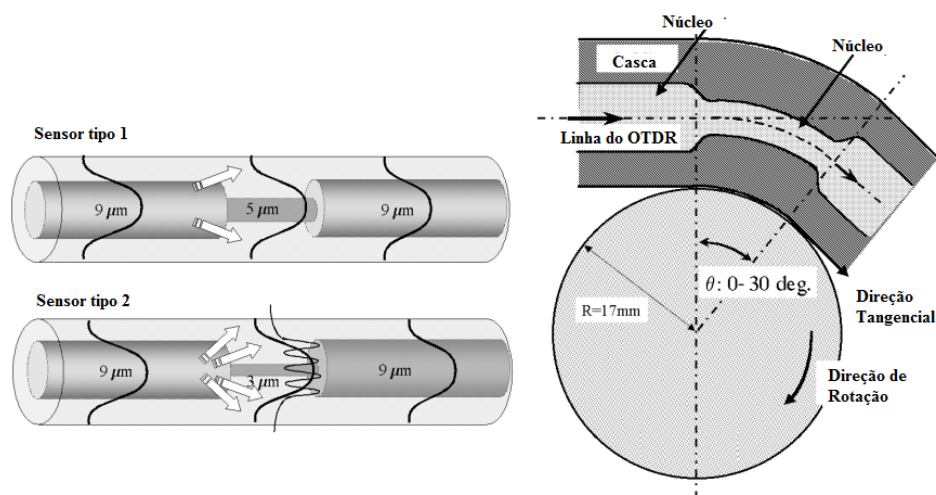
2.2.1 Aplicações de Sensores Heteronúcleo

A estrutura heteronúcleo pode ser fabricada por fusão de um trecho pequeno de fibra óptica da ordem de milímetros, inserida entre dois trechos de fibra óptica com núcleo diferente, formando a estrutura heteronúcleo, de forma que a luz, bem confinada na fibra de transmissão, é expandida na fibra (região sensora) no comprimento de inserção heteronúcleo. Na literatura, são analisadas, em detalhes, características de detecção dos sensores de perfil heteronúcleo.

A aplicação desse tipo de sensor pode ser bastante expandida combinando o perfil com as diversas técnicas de sensoriamento.

As características de macrocurvatura de um sensor heteronúcleo foram investigadas do ponto de vista do uso prático destinado tanto para monitoramento de curvatura relativamente grande quanto para detecção de líquidos (WATANABE; TAJIMA; KUBOTA, 2000). Watanabe e colaboradores em 2000 propuseram aplicações exploratórias de dois tipos de sensores à fibra óptica perfil heteronúcleo usando uma estrutura de fibra SMF com núcleos diferentes. Os diâmetros dos núcleos das fibras usadas como comprimento de inserção heteronúcleo eram de 3 e 5 μm (WATANABE; TAJIMA; KUBOTA, 2000), como ilustra a Figura 15. O sensor tipo 1 de 9-5-9 μm (diâmetros dos núcleos) com baixa perda de inserção e o sensor tipo 2 com 9-3-9 μm (diâmetros dos núcleos) uma estrutura com alta sensibilidade, o comprimento de onda utilizado é de 1300 nm (WATANABE; TAJIMA; KUBOTA, 2000).

Figura 15 – Estruturas de dois tipos de sensores hetero-core e esquema de curvatura utilizado no experimento



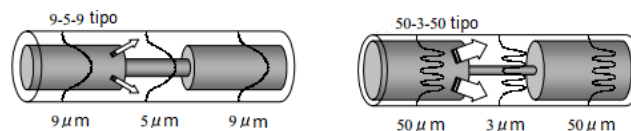
Fonte: WATANABE; TAJIMA; KUBOTA (2000)

O sensor tipo 1 de baixa perda de inserção demonstrou a capacidade de detectar distorções relativamente grandes, que geralmente podem ser exibidas na maioria das grandes estruturas (WATANABE; TAJIMA; KUBOTA, 2000). Essa é a principal vantagem em relação aos sensores de deformação convencionais. Uma distorção tão grande quanto milímetros pode causar danos irreversíveis aos sensores de deformação convencionais, levando à destruição física (WATANABE; TAJIMA; KUBOTA, 2000). Por outro lado, o sensor tipo 2 foi considerado um sensor com potencial para detecção de aderência de líquidos em torno da porção curva do perfil heteronúcleo (WATANABE; TAJIMA; KUBOTA, 2000). No caso da estrutura tipo 2, a perda de inserção que é dada na condição direta de $\theta = 0$ se torna muito maior que na estrutura tipo 1, com perda de

cerca de 5 dB. Isso provavelmente é devido a um vazamento mais alargado nas interfaces de emenda, a maior parte da potência acopla-se facilmente à camada de revestimento devido à flexão da fibra óptica na região do perfil heteronúcleo (WATANABE; TAJIMA; KUBOTA, 2000).

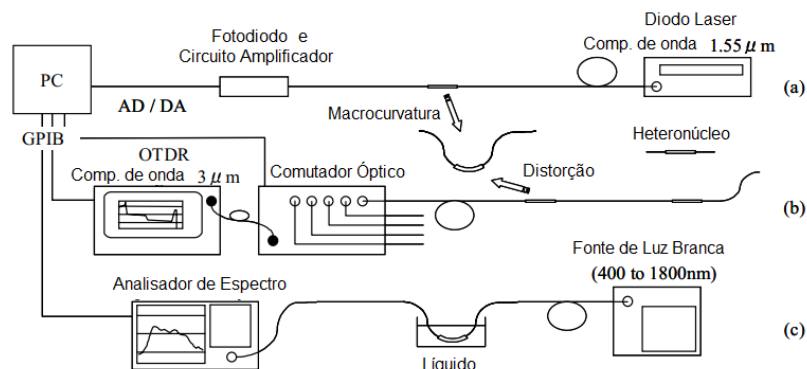
Iga e colaboradores propuseram e desenvolveram em 2001 (IGA et al., 2001) uma nova estrutura de sensor de fibra óptica que é caracterizada por uma inserção de fibra de comprimento diferente e tamanho de núcleo diferente em uma fibra como meio de transmissão do sinal óptico. São demonstrados dois tipos de sensor de macrocurvatura e um sensor sensível ao ambiente. O sensor de macrocurvatura foi desenvolvido como sensor multiponto (quase distribuído) (IGA et al., 2001). O sensor sensível ao ambiente tem a capacidade de analisar as condições ambientais. A Figura 16 mostra as estruturas de dois tipos de sensor heteronúcleo; com diâmetros dos núcleos das fibras de 9, 5 e 9 μm e com diâmetros dos núcleos de 50, 3 e 50 μm (IGA et al., 2001). A estrutura detalhada da configuração experimental é ilustrada na Figura 17, assim na Figura 17 (a) a configuração usando os diâmetros dos núcleos das fibras de 9, 5 e 9 μm para detecção de macrocurvatura. Figura 17 (b) é a configuração com rede de fibra óptica usando o tipo com diâmetros dos núcleos das fibras de 9, 5 e 9 μm para monitoramento multi-ponto. Figura 17 (c) é o esquema de detecção de líquido usando o tipo de fibras com diâmetros dos núcleos de 50, 3 e 50 μm .

Figura 16 – Estruturas de dois tipos de sensor heteronúcleo



Fonte: IGA et al. (2001)

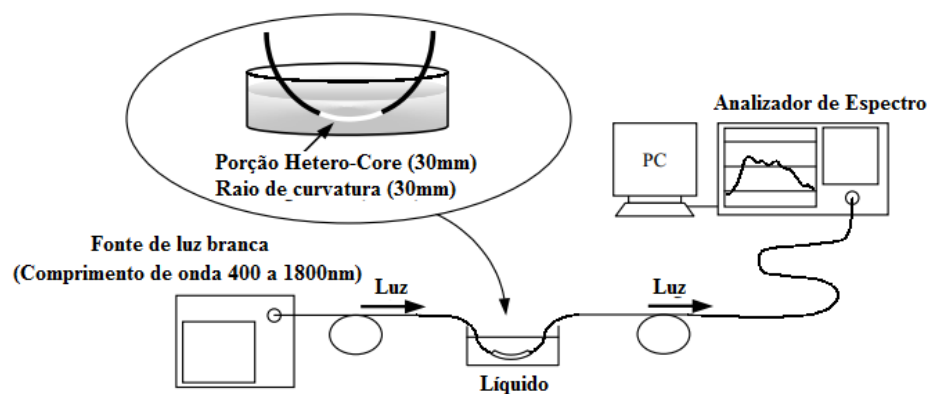
Figura 17 – (a), (b) e (c) Três esquemas de configuração experimental disponível



Fonte: IGA et al. (2001)

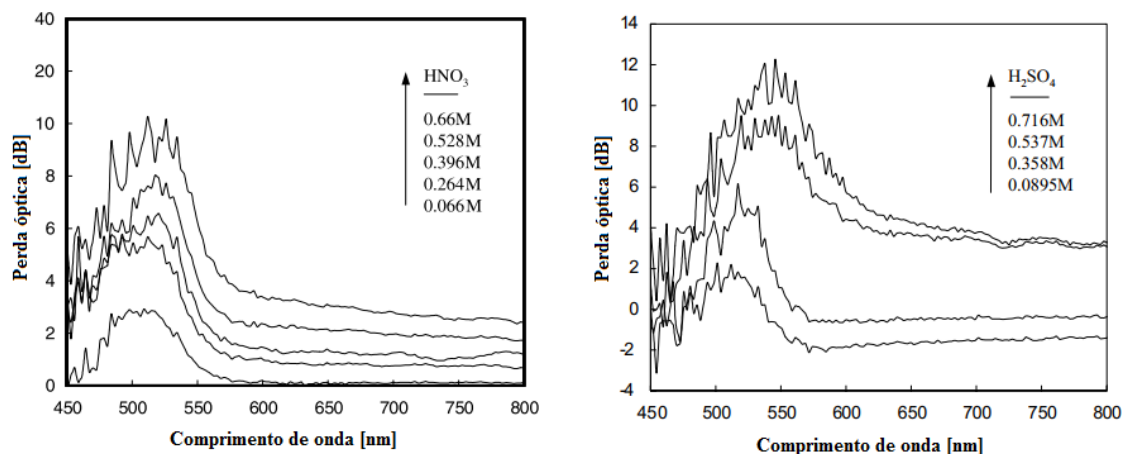
Em 2003, Iga e colaboradores propuseram um sensor à fibra óptica estruturada com perfil heteronúcleo para fins de medições de acidez (IGA et al., 2003), como ilustra a Figura 18. Como o sensor não precisa eliminar o revestimento da fibra para expor o núcleo, essa técnica oferece vantagens em termos de complexidade da fabricação em relação aos sensores convencionais (IGA et al., 2003). A Figura 19 mostra as medições usando duas soluções ácidas de HNO_3 e H_2SO_4 em que são examinadas quanto à acidez variando entre 0,066 a 0,66 e 0,0895 a 0,716 M, respectivamente. A resposta do sensor exibiu notáveis aumentos de absorção com aumento da acidez no comprimento de onda de cerca de 520 nm. As sensibilidades de 11,5 e 14,2 dB/M foram obtidas para soluções de HNO_3 e H_2SO_4 , respectivamente (IGA et al., 2003).

Figura 18 – Arranjo experimental



Fonte: IGA et al. (2003)

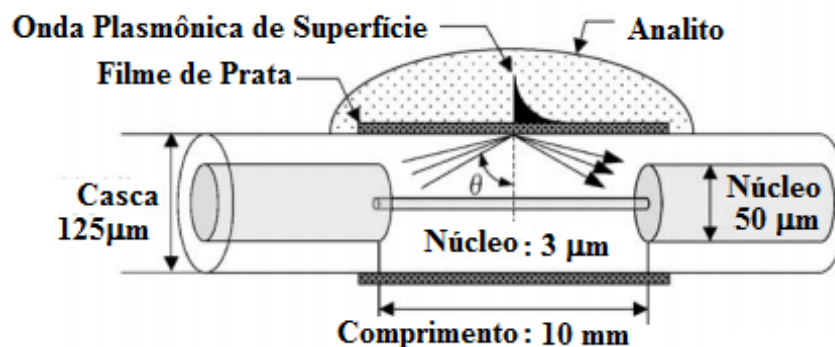
Figura 19 – Espectros de absorção



Fonte: IGA et al. (2003)

A estrutura de detecção a base de fibra óptica perfil heteronúcleo também é capaz de detectar o índice de refração com base no fenômeno de ressonância plasmons de superfície (SPR), foi o que mostrou o trabalho proposto por Iga e colaboradores em 2004 (IGA; SEKI; WATANABE, 2004). Como ilustra a Figura 20, o sensor consiste em duas fibras de diâmetro de núcleo diferentes, que são conectadas por fusão térmica, a fim de vaziar deliberadamente a onda de luz transmitida na camada de revestimento da região da fibra óptica de núcleo menor. O filme de prata foi depositado uniformemente em torno da superfície do revestimento para excitação de SPR (IGA; SEKI; WATANABE, 2004). Para medir o comprimento de onda da ressonância SPR para o índice de refração foi realizado um experimento variando o índice de refração de 1,333 a 1,398, usando uma fonte de luz branca e um analisador de espectro (IGA; SEKI; WATANABE, 2004). As sensibilidades obtidas a partir de uma curva experimental foram $2,1 \times 10^{-4}$ e $1,5 \times 10^{-4}$ em torno dos índices de refração de 1,333 e 1,398, respectivamente (IGA; SEKI; WATANABE, 2004).

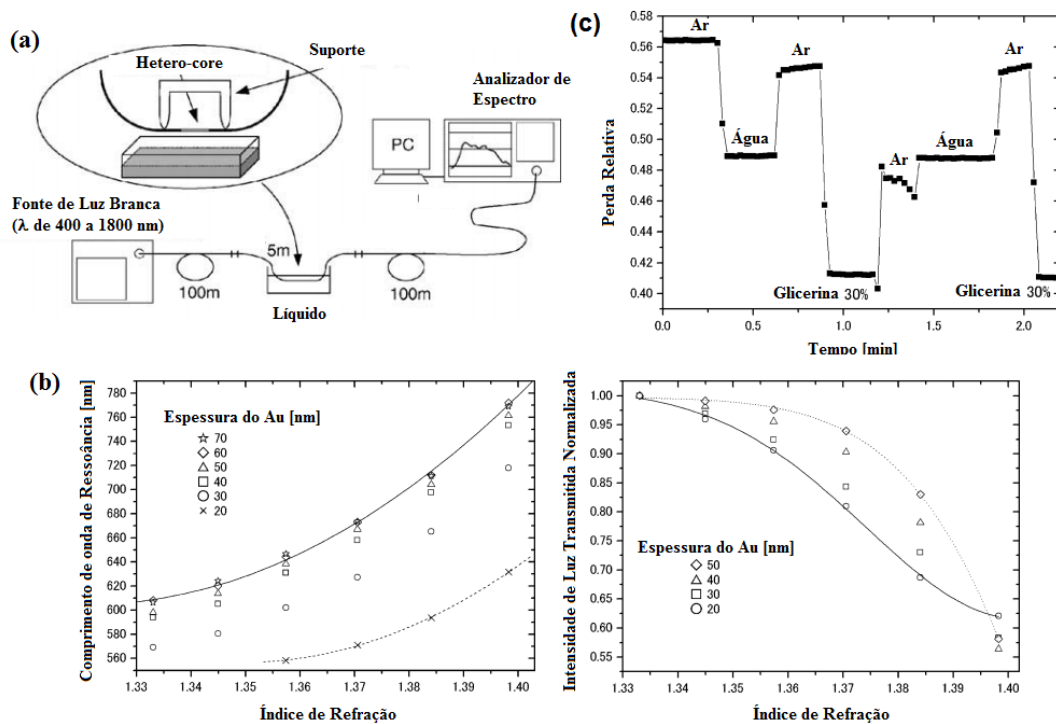
Figura 20 – Estrutura do sensor com camada de prata de 50 nm de espessura na superfície de revestimento da fibra SMF



Fonte: IGA; SEKI; WATANABE (2004)

Já em 2005, Iga e colaboradores (IGA; SEKI; WATANABE, 2005) avaliaram o desempenho de detecção de um sensor à fibra óptica estruturada com perfil heteronúcleo através do fenômeno de ressonância plasmons de superfície (SPR) Figura 21 (a), controlando a espessura do revestimento metálico depositado na face lateral do perfil heteronúcleo, variando de 20 a 70 nm (IGA; SEKI; WATANABE, 2005), como mostra a Figura 21 (b). O metal utilizado foi o ouro (Au). Um esquema de detecção prático com base no modo de amplitude usando um único LED emitindo 667 nm, mostrando a capacidade de detecção remota baseada em tempo real na medição de índices de refração de líquidos, ilustrado na Figura 21 (c) (IGA; SEKI; WATANABE, 2005).

Figura 21 – (a) Esquema experimental (b) Comprimento de onda da ressonância experimental em função do índice de refração para as várias espessuras de Au e Intensidade da luz transmitida em função do índice de refração (c) experimento em tempo real

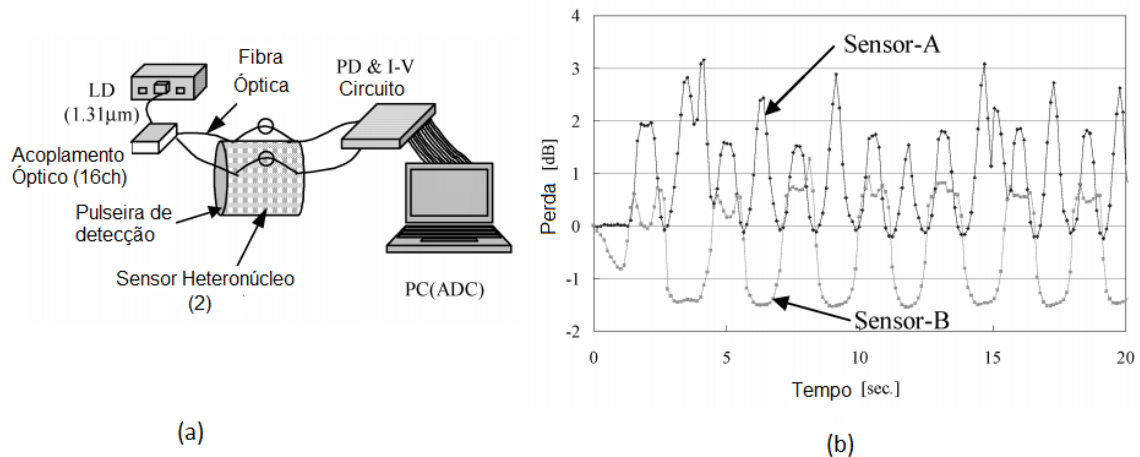


Fonte: IGA; SEKI; WATANABE (2005)

Com o objetivo de desenvolver uma roupa sensorial que pode detectar a postura e o movimento do corpo inteiro usando um sensor de fibra óptica heteronúcleo, em 2006 Nishiyama e colaboradores (NISHIYAMA; SASAKI; WATANABE, 2006), desenvolveram um sensor de fibra óptica heteronúcleo como um sensor sensível à curvatura e verificou-se que a perda óptica do elemento de detecção da fibra do heteronúcleo aumentou com a ação de flexão da porção do heteronúcleo, conforme ilustra a Figura 22 (a). Este sensor foi aplicado para detectar a postura e o movimento do segmento do braço. Os pesquisadores fabricaram uma pulseira com sensores e roupas que reconheçam o aceno de mão, flexão do braço e movimento do ombro (NISHIYAMA; SASAKI; WATANABE, 2006). Uma resposta do sensor para o movimento de levantar o braço na frente do tórax, abaixar e levantar o braço atrás das costas periodicamente, foi obtida conforme indicado na Figura 22 (b). O sensor-B foi sensível como esperado, segundo os autores (NISHIYAMA; SASAKI; WATANABE, 2006) embora o sensor-A também fosse sensível a esse movimento, o movimento poderia ser detectado de forma que as perdas ópticas de dois sensores fossem positivas para o movimento do braço na frente do tórax. Em contraste, a perda óptica do sensor-B foi negativa para o movimento do braço atrás das costas. Isso

mostra a capacidade dessas roupas sensoriais como uma ferramenta de captura de movimento (NISHIYAMA; SASAKI; WATANABE, 2006).

Figura 22 – (a) Configuração experimental das roupas sensoriais (b) resposta do sensor localizado em um ombro no movimento de adução pelas roupas sensoriais

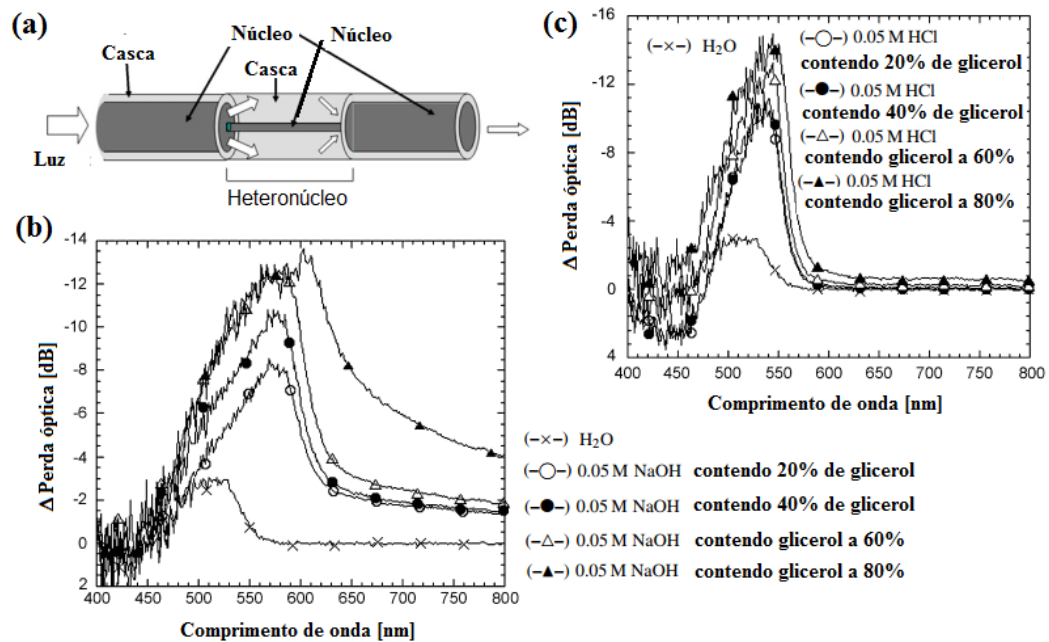


Fonte: NISHIYAMA; SASAKI; WATANABE (2006)

Seki e colaboradores em 2007 (SEKI et al., 2007) propuseram um sensor de pH a base de fibra óptica perfil heteronúcleo. O sensor consiste em prolongamentos de fibra óptica multimodo unidos a uma fibra óptica monomodo convencionais de telecomunicações, como ilustra a Figura 23 (a). A Figura 23 (b) mostra os espectros de perda em $NaOH$ 0,05 M contendo várias concentrações de glicerina. O pico do comprimento de onda era de cerca de 575 nm. Este pico de comprimento de onda foi quase semelhante ao dos máximos de absorção medidos usando um espectrofotômetro convencional (SEKI et al., 2007). Já a Figura 23 (c) mostra os espectros de perda em HCl 0,05 M contendo várias concentrações de glicerina. O comprimento de onda do pico era de cerca de 545 nm. Este pico de comprimento de onda apresentava semelhança ao dos máximos de absorção da solução em termos de pH 2,5 medidos usando o espectrofotômetro convencional (SEKI et al., 2007). Este sensor pode detectar alterações de pH por 12 dias. Além disso, o sensor respondeu à mudança de pH em 30 s (SEKI et al., 2007).

Já em 2009, Nishiyama e colaboradores (NISHIYAMA; WATANABE, 2009) desenvolveram um sensor de "nervo" de fibra óptica heteronúcleo embutidos, que foram usados para desenvolver uma luva de detecção para monitorar a flexão dos dedos, conforme ilustra a Figura 24 (a). Os elementos do sensor heteronúcleo foram incorporados na parte de trás da luva e, como resultado, os sensores não foram afetados por rugas aleatórias nas articulações, e a luva foi capaz de detectar os ângulos das articulações, independentemente das diferenças em comprimento

Figura 23 – (a) Diagrama esquemático da estrutura da fibra heteronúcleo (b) e (c) Espectros de perda em soluções de teste

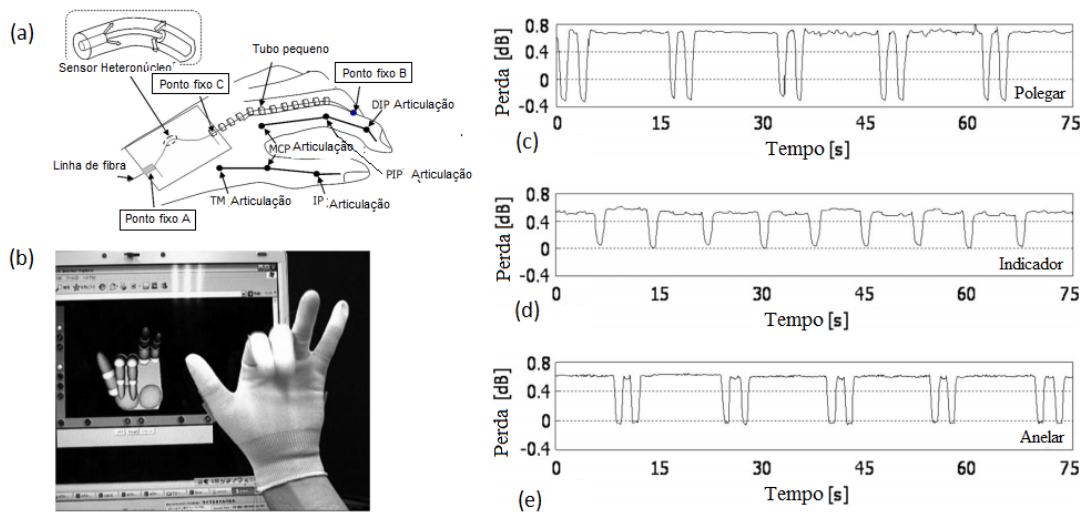


Fonte: SEKI et al. (2007)

interfalangeanos (NISHIYAMA; WATANABE, 2009). O desempenho de perda óptica dos sensores de "nervo" de fibra heteronúcleo revelou características monotônicas com respeito aos ângulos de flexão da articulação nos experimentos controlados. As mudanças na perda óptica dos sensores nervosos heteronúcleo na flexão completa das articulações dos dedos foram 1,04, 0,56 e 0,57 dB com desvios padrão de 0,01 dB para os dedos polegar, indicador e anular, respectivamente, conforme ilustrado nas Figura 24 (c)-(e). Como resultado, o sensor heteronúcleo tinha sensibilidade e precisão suficientemente altas para que pudesse ser usado para monitorar posturas e movimentos das mãos (NISHIYAMA; WATANABE, 2009). A captura do movimento da mão em tempo real em realidade virtual 3-D foi demonstrada com um sujeito que colocou a luva sensível ao corpo e repetidamente esticou e dobrou as articulações dos dedos, conforme ilustra a Figura 24 (b). Segundo os autores, a luva de detecção vestível com nervos de fibra heteronúcleo é útil para monitorar movimentos da mão sem restrições em várias aplicações, como realidade virtual e teleoperação robótica (NISHIYAMA; WATANABE, 2009).

Akita e colaboradores em 2010 (AKITA et al., 2010), propuseram um sistema sensor para detectar umidade usando uma fibra óptica perfel heteronúcleo, como ilustra a Figura 25. A porção hetero-core é revestida com camadas de polímero higroscópico por uma técnica de camada por camada, produzindo uma sobreposição nanoestruturada, que consiste nas multicamadas feitas com um ácido poliglutâmico e uma estrutura alternativa de polilisina (AKITA

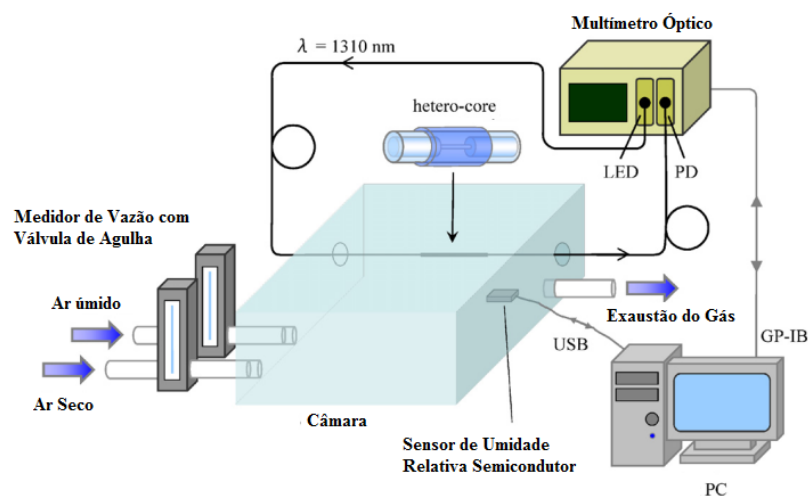
Figura 24 – (a) Configuração da luva sensora (b) Sistema de monitoramento da postura da mão em realidade virtual (c) resposta de perda óptica em tempo real dos sensores durante a flexão periódica do dedo polegar, (d) dedo indicador e (e) dedo anelar



Fonte: NISHIYAMA; WATANABE (2009)

et al., 2010). O índice de refração da camada de polímero varia com a umidade relativa em torno do sensor, de modo que a intensidade da luz transmitida na fibra é afetada pela umidade relativa ambiente (AKITA et al., 2010). O tempo de resposta do sensor é de aproximadamente 400 ms (AKITA et al., 2010). A mudança de intensidade de 0,26 dB foi observada em um comprimento de onda de 1310 nm na faixa de 50 a 92,9% de umidade relativa, o que é consideravelmente grande para a detecção convencional de fotodiodos (AKITA et al., 2010).

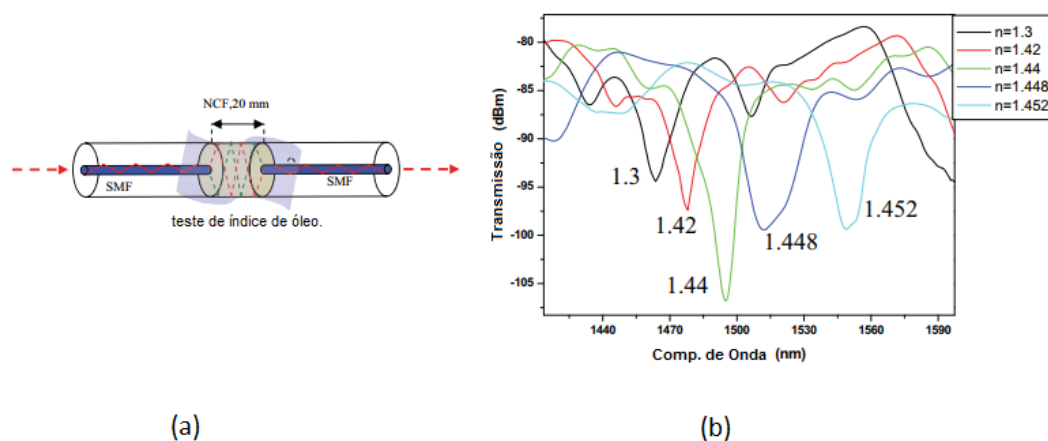
Figura 25 – Aparato experimental



Fonte: AKITA et al. (2010)

Em 2011, Lin e colaboradores (LIN et al., 2011) propuseram um sensor de fibra baseado em uma fibra de estrutura heteronúcleo que é composta por um pequeno pedaço de fibra sem núcleo (NCF) impressada entre duas fibras monomodo (SMF), como mostra a Figura 26 (a). O índice de refração em torno do sensor pode ser detectado devido à interação da propagação da luz no limite entre os heterocúcleos e ambientes externos. Os resultados experimentais evidenciaram a sensibilidade de detecção de 227,14 nm por índice unitário para o índice na faixa de 1,3 a 1,44 e 7792,85 nm por índice unitário para índice variando de 1,44 a 1,54 respectivamente, Figura 26 (b). Este projeto de configuração e técnica podem fornecer uma espécie de estrutura simples e de baixo custo para aplicação em sistemas de medição de índice de refração (LIN et al., 2011).

Figura 26 – (a) O diagrama esquemático da fibra heteronúcleo incluindo o NCF de 20 mm de comprimento e o SMF (b) espectros de transmissão para medir diferentes índices de óleos



Fonte: LIN et al. (2011)

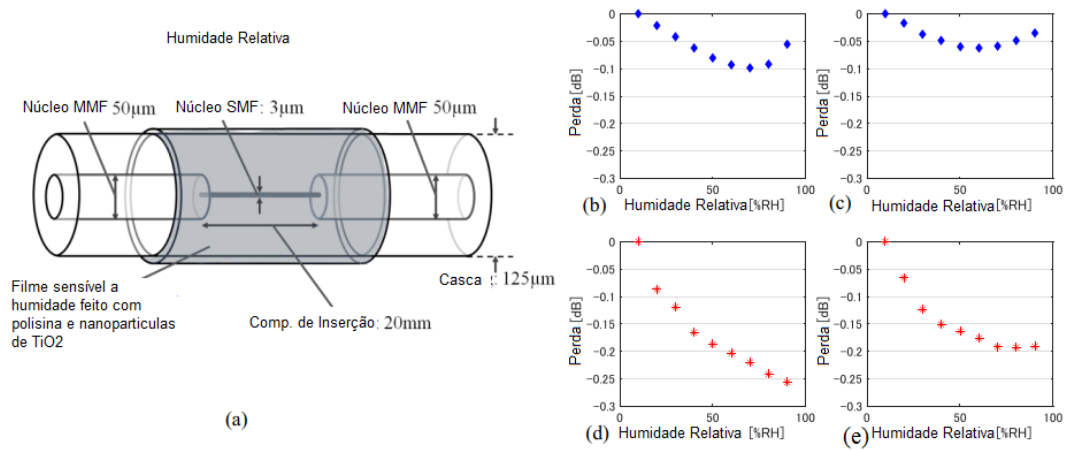
Em 2012, Hosoki e colaboradores propuseram um sensor de hidrogênio por ressonância plasmons de superfície (SPR) com base na estrutura de fibra óptica heteronúcleo (HOSOKI et al., 2012). O sensor consiste de um sistema com multicamadas feita de uma camada de ouro (Au), pentaóxido de tântalo (Ta_2O_5) e uma camada de paládio (Pd). A presença do Pd é muito importante pois é um metal de armazenamento de hidrogênio, a permissividade do Pd muda ligeiramente com a hidrogenação do Pd (HOSOKI et al., 2012). Experimentalmente foi observado que a ressonância SPR foi alterada em 28 nm no comprimento de onda, variando de 0 a 4% de concentração de hidrogênio, além disso, verificou-se que a espessura do Pd poderia ajustar o comprimento de onda da ressonância SPR (HOSOKI et al., 2012). O sensor proposto apresentou um tempo de resposta de 40 s na faixa de 0 a 4% de hidrogênio (HOSOKI et al., 2012).

Goh e colaboradores em 2014 (GOH et al., 2014), propuseram um sistema sensor a fibra óptica perfil heteronúcleo para monitoramento da água no solo em ambientes agrícolas baseado no efeito de ressonância de plasmons de superfície (SPR). O sensor apresenta configuração simples, pois desempenha um papel duplo como meio de comunicação de dados e sensor, logo, outras linhas de comunicação de dados e fontes de luz não precisam ser configuradas separadamente (GOH et al., 2014). Bom custo benefício, pois os dispositivos de medição utilizados no sistema são dispositivos mais acessíveis, em comparação com outras redes de sensores de fibra óptica e redes de sensores comerciais (GOH et al., 2014). Diferentemente das redes de sensores sem fio, toda a rede de sensores de fibra é conectada por fio, de modo que o sistema é capaz de fornecer energia continuamente aos sensores, o que significa que a confiabilidade das comunicações de dados é garantida (GOH et al., 2014). O sensor proposto também tem a capacidade de fornecer medição em tempo real. Com relação a adaptabilidade a ambientes maiores, o sensor de fibra perfil heteronúcleo é revestido com 25 nm de Au e 60 nm de Ta_2O_5 (GOH et al., 2014). Este sensor pode servir como comunicador de dados e sensor a distâncias de até 1000 m. Esse recurso supera os problemas de comunicação de dados que desafiam as redes de sensores sem fio, como dificuldade em transferir dados por áreas maiores e capacidade de rede limitada (GOH et al., 2014).

Okimuro e colaboradores no ano de 2015 (OKIMURO et al., 2015), a fim de melhorar a sensibilidade do sensor de umidade à fibra heteronúcleo, propuseram o sensor de umidade de fibra heteronúcleo com filme sensível poroso incluindo nanopartículas de TiO_2 , conforme a Figura 27 (a), que pode medir a umidade relativa através da perda de transmissão em função da mudança do índice de refração devido à absorção de umidade do polímero. Além disso, utilizaram uma fonte de luz ultravioleta (UV), as nanopartículas de TiO_2 apresentaram reação superhidrofílica e efeito fotocatalítico (OKIMURO et al., 2015). Por outro lado, sensores de polímero higroscópico heteronúcleo tem sensibilidade com a mudança de perda de 0,26 dB para 50 - 92,9% UR, no entanto, na faixa de umidade inferior a 50% UR, o sensor tem dificuldade em detectar a mudança de umidade, devido às características do filme sensível à umidade (OKIMURO et al., 2015). O trabalho proposto com as nanopartículas porosas de TiO_2 , possibilitou a melhoria na sensibilidade usando apenas o LED de 1,31 μm na faixa de umidade inferior a menos de 50% UR em comparação com a não imobilização da nanopartícula de TiO_2 no filme sensível, como mostrado na Figura 27 (b)-(e). Portanto, os autores concluíram que a fonte de luz UV-LED aumentou a capacidade de sensibilidade à umidade no sensor de fibra óptica de heteronúcleo com o filme fino de nanopartícula de TiO_2 imobilizado (OKIMURO et

al., 2015).

Figura 27 – (a) estrutura heteronúcleo (b) Características de umidade dos sensores de umidade de fibra óptica hetero-core sensores-1 e (c) sensores-2 usando LED de $1,31\ \mu\text{m}$ (d) sensores-1 e (e) sensores-2 usando dois tipos de LEDs, $1,31\ \mu\text{m}$ e UV

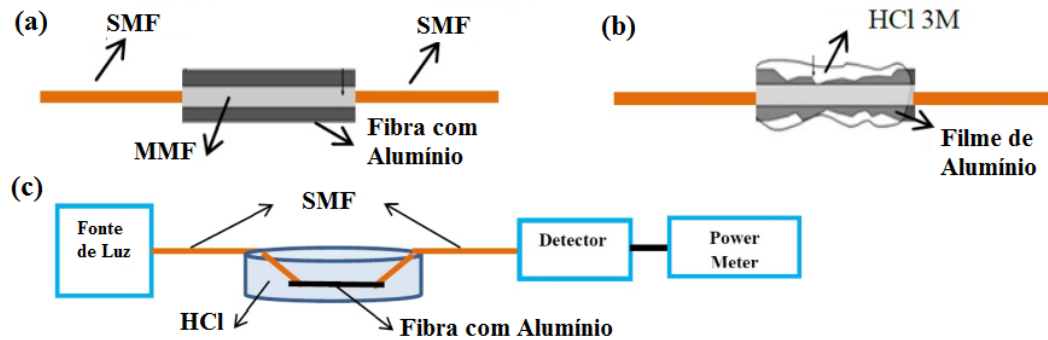


Fonte: OKIMURO et al. (2015)

Em 2016, Aisyah e colaboradores propuseram um sensor a fibra óptica estruturada para monitoramento de corrosão (AISYAH; HATTA; PRATAMA, 2016). O sensor consiste de um prolongamento de fibra monomodo com uma fibra multimodo seguida de outro prolongamento de fibra monomodo, formando uma SMS (*Single mode - Multimode - Single mode*) perfil heteronúcleo, como ilustra a Figura 28 (a) (AISYAH; HATTA; PRATAMA, 2016). O comprimento de inserção da fibra SMS que consiste na fibra multimodo teve sua casca removida onde foi depositado um filme metálico de alumínio que sofre o processo de corrosão e essa seção de fibra possui 10 mm de comprimento, como mostra a Figura 28 (b) (AISYAH; HATTA; PRATAMA, 2016). O processo corrosivo do filme metálico faz com que sejam reduzidas as perdas por absorção da potência óptica na região heteronúcleo, ou seja, a potência transmitida é elevada para um nível maior (AISYAH; HATTA; PRATAMA, 2016). A Figura 28 (c) mostra a configuração experimental desse sistema sensor. O sistema é capaz de monitorar a corrosão em apenas um ponto, a detecção é feita no final do sistema óptico através do sinal óptica transmitida. Esse sistema é capaz de fornecer a taxa de corrosão (AISYAH; HATTA; PRATAMA, 2016).

Liu e colaboradores em 2017, propuseram um sensor de índice de refração de canal duplo com base em fibra estruturada de perfil heteronúcleo modificada utilizando o efeito de ressonância plasmons de superfície (LIU et al., 2017). O sistema sensor consiste na detecção de múltiplos pontos, através da estrutura heteronúcleo modificada para adicionar um canal de detecção, como mostrado na Figura 29 (a). As fibras SMF e MMF são empregados para

Figura 28 – (a) Fibra SMS metalizada (b) corrosão da região metalizada da SMS (c) Configuração experimental do sensor de corrosão baseado em SMS

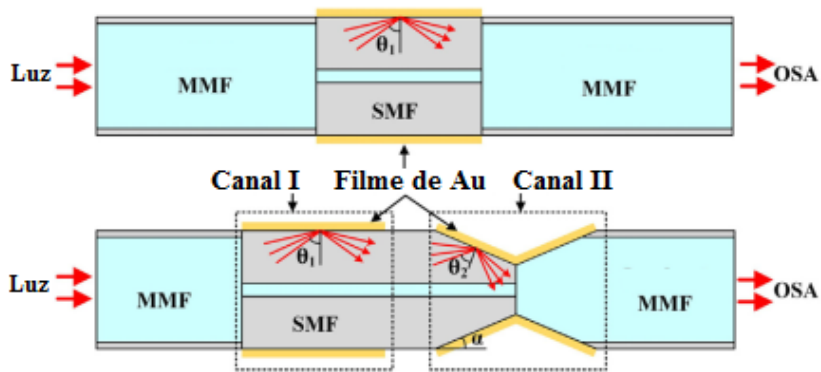


Fonte: AISYAH; HATTA; PRATAMA (2016)

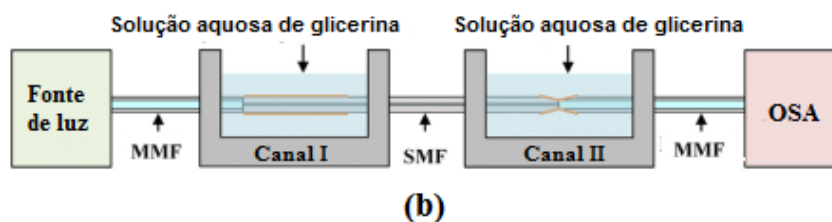
construir o perfil heteronúcleo modificado e possuem diâmetros de núcleo e casca de $8,2 \mu\text{m}$, $125 \mu\text{m}$, $105 \mu\text{m}$ e $125 \mu\text{m}$, respectivamente (LIU et al., 2017). Uma das faces das fibras SMF e MMF são polidas em forma de cone circular truncado com ângulo de polimento de 14 graus e posteriormente é feita a fusão. Em seguida, é depositado o filme de ouro com espessura de 50 nm na superfície de revestimento da SMF para formar o canal de detecção I e depois depositado o outro filme de ouro com espessura de 50 nm na superfície de polimento para formar o canal de detecção II (LIU et al., 2017).

Figura 29 – (a) Configuração do perfil heteronúcleo tradicional e modificado (b) diagrama esquemático do experimento

Heteronúcleo Tradicional



Heteronúcleo Modificada



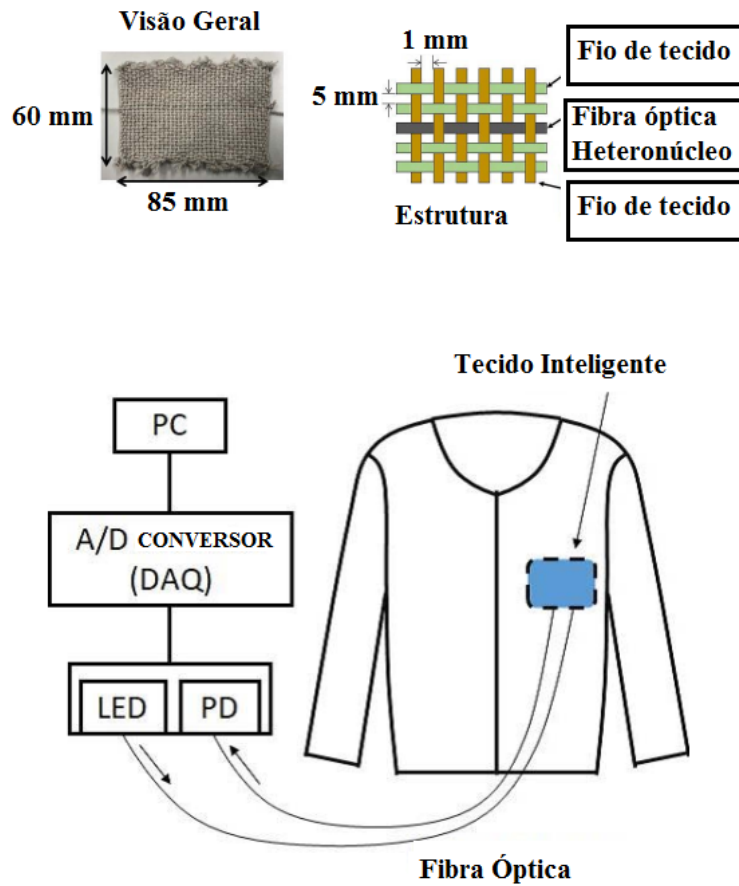
Fonte: LIU et al. (2017)

A luz é coletada pela OSA através do MMF de saída, além disso, o comprimento do canal I é de 10 mm e a distância entre os canais I e II é de 30 mm, como mostra a Figura 29 (b). Com o aumento do ângulo de polimento da fibra, a faixa de comprimento de onda da ressonância muda para o vermelho (LIU et al., 2017). Quando o ângulo de polimento da fibra é de 14 graus e a faixa de índice de refração é de 1.333 a 1.385, a faixa de comprimento de onda de ressonância é de 754 nm a 965 nm, o que está distante do sensor tradicional de SPR de fibra de estrutura de heteronúcleo (600 nm a 700 nm). O sensor é capaz de realizar a detecção de canal duplo pela tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (LIU et al., 2017).

Em 2018, Koyama e colaboradores apresentaram um sistema sensor a fibra óptica perfil heteronúcleo para monitorar os batimentos cardíacos e a respiração usando um tecido inteligente (KOYAMA; NISHIYAMA; WATANABE, 2018). O tecido inteligente foi projetado tecendo a fibra óptica de perfil heteronúcleo juntamente com o tecido de lã, como mostra a Figura 30. Este novo tecido que pode detectar variações de formas pode ser incorporado às roupas (KOYAMA; NISHIYAMA; WATANABE, 2018). Para monitorar simultaneamente os batimentos cardíacos e a respiração, o tecido proposto é costurado nas roupas para poder detectar alterações produzidas pelos movimentos do peito. Os sinais vitais, calculados a partir dos batimentos cardíacos e da frequência respiratória de um adulto saudável, sentado, estavam de acordo com os verificados usando dispositivos de monitoramento comerciais (KOYAMA; NISHIYAMA; WATANABE, 2018). As taxas de sinais vitais foram extraídas com sucesso dentro do erro de quatro de batimentos por minuto pelo sistema de sensor a fibra óptica (KOYAMA; NISHIYAMA; WATANABE, 2018).

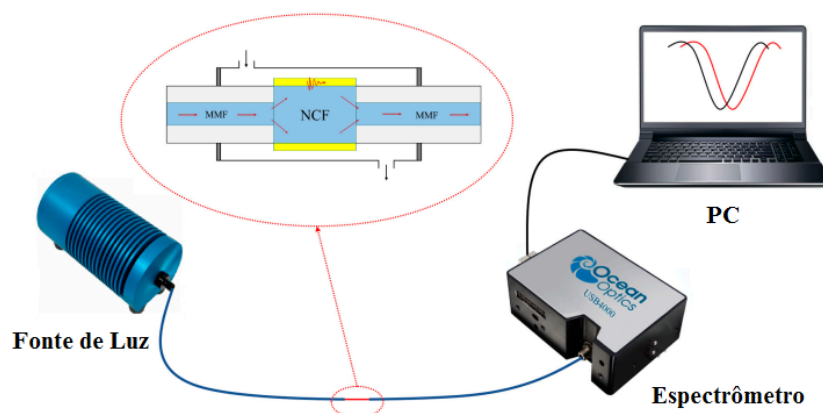
Já em 2019, Zhang e colaboradores propuseram um sistema sensor de temperatura a base de fibra óptica perfil heteronúcleo usando o efeito de ressonância de plasmons de superfície (SPR), como ilustra a Figura 31 (ZHANG; PU; LI, 2019). A estrutura do sensor é composta de uma fibra NCF (conhecida como fibra sem núcleo) com um comprimento de 1 cm é emendado entre dois seguimentos de fibras MMF. Os diâmetros de núcleo e revestimento das fibras ópticas MMF e NCF são $62,5 / 125 \mu\text{m}$ e $0/125 \mu\text{m}$, respectivamente (ZHANG; PU; LI, 2019). A película fina de ouro é revestida no NCF pelo dispositivo de pulverização de magnetron (ETD-900M, Elaborate Technology Development, China). A influência da espessura do filme de ouro no desempenho da detecção de temperatura foi estudada experimentalmente e a espessura ideal do filme de ouro foi otimizada (ZHANG; PU; LI, 2019). O sensor apresentou sensibilidades máximas para medição do índice de refração e temperatura obtidas em $2933,25 \text{ nm} / \text{RIU}$ e $-0,91973 \text{ nm} / ^\circ\text{C}$, respectivamente (ZHANG; PU; LI, 2019).

Figura 30 – Tecido inteligente com fibra óptica hetero-core



Fonte: KOYAMA; NISHIYAMA; WATANABE (2018)

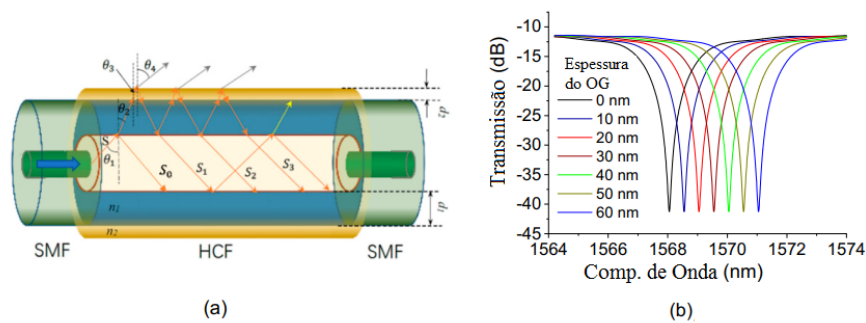
Figura 31 – Configuração experimental



Fonte: ZHANG; PU; LI (2019)

Em 2020 Wu e colaboradores (WU et al., 2020), propuseram e investigaram um sensor de medição de espessura de resolução ultra-alta com base em uma estrutura de fibra heteronúcleo (SMF - HCF - SMF), revestindo uma fina camada de material na superfície de HCF, conforme a Figura 32 (a). A análise teórica mostra que a estrutura de fibra heteronúcleo pode medir a espessura do revestimento até sub nanômetros Figura 32 (b). Um estudo experimental foi realizado revestindo uma fina camada de óxido de grafeno (OG) na superfície HCF da estrutura de fibra heteronúcleo (WU et al., 2020). Os resultados experimentais mostram que a estrutura do sensor de fibra pode detectar uma camada fina com espessura de até 0,21 nanômetros, o que concorda bem com os resultados da simulação (WU et al., 2020). Observa-se que, embora a análise acima seja baseada em um material dielétrico, o sensor também pode ser usado para medição de metal, desde que a calibração tenha sido feita para cada tipo de metal. No entanto, conforme pode ser visto na literatura (LIU et al., 2018), devido à alta perda de transmissão de metais, a taxa de extinção reduz significativamente à medida que a espessura do revestimento metálico aumenta, resultando em uma faixa de medição de espessura muito estreita (em torno de 10 nm).

Figura 32 – (a) diagrama esquemático da estrutura de fibra heteronúcleo (b) resposta espectral



Fonte: WU et al. (2020)

Atualmente, estão sendo publicados vários trabalhos que fazem uso de fibras ópticas perfil heteronúcleo para monitorar as mais diversas grandezas (MAEDA et al., 2021; YAN et al., 2021; MIKAMI et al., 2021; DEY et al., 2021; HOSOKI et al., 2022; TENG et al., 2022), como dispositivo de exame não invasivo da deglutição por meio de um sensor de pressão de fibra óptica heteronúcleo, que pode monitorar o movimento da proeminência laríngea (LP) durante a deglutição pela mudança de pressão para o exterior da pele (MAEDA et al., 2021). Também são encontrados trabalhos que analisam as propriedades de detecção de estruturas de fibra óptica

heteronúcleo (SNS) revestidas com óxido de grafeno (OG), e o desempenho de detecção de índice de refração do dispositivo foi testado com diferentes concentrações de solução de glicerina (YAN et al., 2021). O revestimento de OG melhorou o desempenho de detecção de IR e a maior sensibilidade de IR foi de 496,823 nm/UIR (YAN et al., 2021).

Há pesquisa que relata as características de um sensor de ressonância de plasmon de superfície localizada (LSPR) de heteronúcleo de hidrogênio de resposta rápida usando nanopartículas esféricas de paládio (PdNPs) para absorver e liberar hidrogênio mais rapidamente devido à sua área de superfície relativamente grande por unidade de volume em comparação com uma camada fina de Pd e a camada de filme de Pd em forma de cúpula (MIKAMI et al., 2021). Os PdNPs foram imobilizados na superfície cilíndrica do sensor de fibra heteronúcleo (MIKAMI et al., 2021). Há também, trabalho que apresenta uma técnica de interrogação para o sensor de grade de Bragg de fibra (FBG) é desenvolvida com um componente de fibra Heteronúcleo (SMS) e refletômetro óptico de domínio de tempo (OTDR) (DEY et al., 2021). O desempenho da interrogação do perfil SMS - OTDR é estabelecido pela análise de detecção de temperatura e deformação de um FBG padrão (DEY et al., 2021). Com base em fibra óptica estruturada heteronúcleo com filmes multicamadas baseado em ressonância plasmônica de superfície são desenvolvidos sensor de temperatura (YUHASHI et al., 2022), e sensor químico que pode detectar vários produtos químicos cujos índices de refração são próximos uns dos outros observando diferentes deslocamentos do comprimento de onda ressonante SPR e as mudanças na largura espectral para diferentes soluções químicas (HOSOKI et al., 2022).

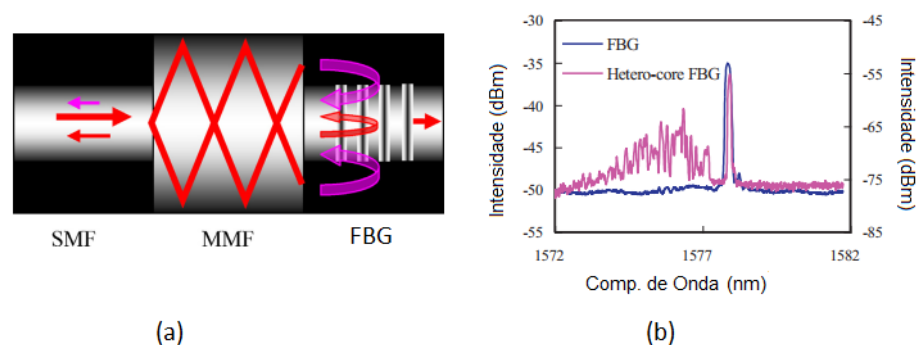
2.2.2 Sensores de Fibras NCF em Cascata com outras Estruturas de Fibra

Além dos sensores de perfil heteronúcleo apresentados na seção 2.2.1, a aplicação de detecção pode ser estendida ainda mais e realizada a medição de multiparâmetros por sensores de fibra NCF em cascata com grade de Bragg de fibra (FBG) (LI et al., 2012; BAI et al., 2014; YU et al., 2014; ZHANG et al., 2018; LIN et al., 2014; LI et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2016; LI et al., 2016; ZHANG et al., 2017b; GUO et al., 2018; ZHANG et al., 2017a; OLIVEIRA et al., 2016; WANG et al., 2013) ou com outras estruturas de fibra (SILVA et al., 2012; LIU et al., 2016; CHEN et al., 2015; LUO et al., 2015; QI et al., 2014; DONG et al., 2017; QI et al., 2015; LU et al., 2018; HSU et al., 2015). Cascadear a estrutura de detecção baseada em NCF com a grade de fibra e usar a resposta de temperatura da grade é um meio típico para eliminar a sensibilidade cruzada de temperatura que é comum no sistema de medição óptica.

Em 2012, Li e colaboradores propuseram uma estrutura de interferômetro multimodo (MMI) baseada em fibra sem núcleo (NCF) em cascata com uma rede de Bragg de fibra (FBG) para medição simultânea do índice de refração do meio externo e da temperatura e com isso resolver o problema da influência da temperatura no processo de medição de IR (LI et al., 2012). Os autores indicam dois métodos de medição; no primeiro, as informações de detecção podem ser analisadas pelo deslocamento de comprimentos de onda do interferômetro baseado em NCF e um modo arbitrariamente refletido FBG, no segundo, as informações de detecção podem ser extraídos exclusivamente através do comprimento de onda e da potência de cada modo refletido FBG.

Em 2013, Sun e colaboradores (SUN; WU, 2013) apresentaram um método para medição simultânea de deformação e flexão, empregando uma estrutura com FBG e heteronúcleo, conforme ilustrado na Figura 33 (a) (SUN; WU, 2013). As intensidades refletidas dos modos de revestimento mostram resposta de flexão em comparação com a ressonância FBG, Figura 33 (b). Conforme ilustrado na Figura 33 (b), o espectro refletido do perfil heteronúcleo FBG consiste em duas partes. A primeira parte é uma ressonância FBG substancialmente enfraquecida em comparação com a ressonância FBG padrão. Outra parte é um modo de revestimento fortemente excitado localizado no lado do comprimento de onda mais curto da ressonância FBG. A faixa de comprimento de onda dos modos de revestimento é de 1572 a 1577 nm. Os espectros dos modos de revestimento refletido consistem em uma série de picos que correspondem aos modos de revestimento com diferentes ordens (SUN; WU, 2013). Com base nisso, a medição simultânea de deformação e flexão pode ser obtida através do perfil heteronúcleo FBG proposto (SUN; WU, 2013), e segundo os autores fornece uma solução eficaz, especialmente no campo do monitoramento estrutural para medir separadamente a flexão e a deformação.

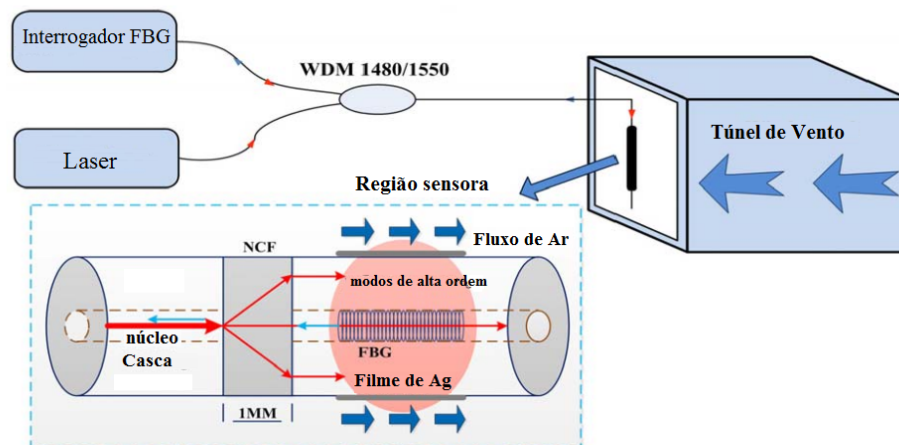
Figura 33 – (a) Configuração esquemática do heteronúcleo FBG. (b) Espectro refletido do heteronúcleo FBG



Fonte: SUN; WU (2013)

Além dos métodos já citados para medir diretamente as grandezas físicas, Wang e colaboradores através da combinação em cascata de uma FBG revestida com prata com uma seção curta de NCF, demonstraram que a velocidade do fluxo de ar pode ser medida monitorando o deslocamento do comprimento de onda da FBG (WANG et al., 2013). No experimento, os autores recobriram a superfície da estrutura NCF-FBG com filme de prata (WANG et al., 2013) e o esquema experimental é mostrado na Figura 34. A luz incidente na SMF de entrada é transmitida para a NCF e excitado os modos de alta ordem que se acoplam a SMF de saída, o comprimento de onda de bragg mudará devido ao aumento da temperatura, enquanto, o filme de prata absorve parte da potência do laser de bombeio. O fluxo de ar retirará parte do calor e reduzirá a temperatura em uma quantidade que depende da velocidade do fluxo de ar.

Figura 34 – Diagrama esquemático do dispositivo de fibra óptica proposto

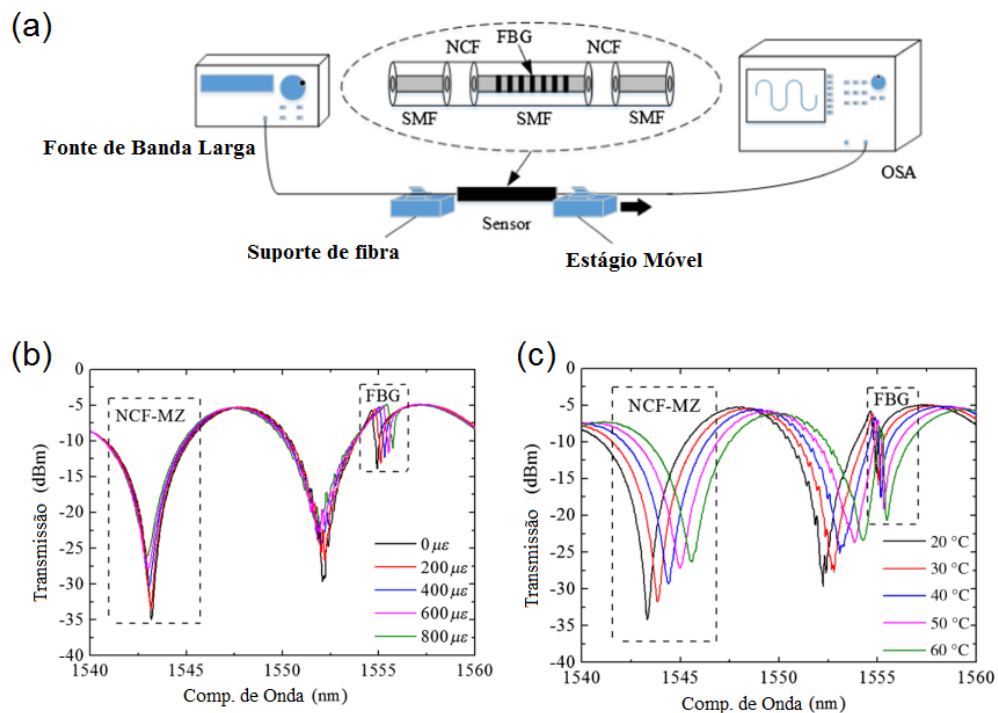


Fonte: WANG et al. (2013)

Bai e colaboradores propuseram e demonstraram a viabilidade de um sensor em fibra óptica para medição simultânea de temperatura e índice de refração (IR), baseado em fibra sem núcleo (NCF) e rede de Bragg de fibra (FBG) (BAI et al., 2014). Dois segmentos de NCF usados como divisor e combinador de feixe são incorporados nas duas extremidades de um FBG, que constituem um interferômetro Mach-Zehnder (MZI) suscetível à temperatura e a variações de índice de refração do meio externo (IR). Com a mudança de IR e temperatura, interferência MZI e reflexão de Bragg resultam na variação do espectro de transmissão óptica do sensor. De acordo com os autores, esses dois parâmetros podem ser medidos simultaneamente com

sensibilidade em torno de $0,01654 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ e $-111,464 \text{ nm}/\mu\text{R}$, respectivamente. Em seguida, Yu e colaboradores estendeu a aplicação dessa estrutura de detecção para medir tensão e temperatura (YU et al., 2014). O esquema do sensor, a configuração experimental e o espectro de transmissão são mostrados na Figura 35. segundo os autores, devido às diferentes respostas do interferômetro baseado em NCF e do FBG para a mesma temperatura e deformação, a discriminação entre temperatura e deformação pode ser facilmente alcançada. Esses dois parâmetros podem ser medidos simultaneamente e para uma resolução de comprimento de onda de $0,01 \text{ nm}$, a resolução do sensor é $0,216^{\circ}\text{C}$ e $6,75 \mu\epsilon$ em temperatura e tensão, respectivamente (YU et al., 2014).

Figura 35 – (a) Diagrama esquemático e configuração experimental (b) resposta espectral do sensor à tensão sofrida (c) resposta do espectral do sensor à temperatura

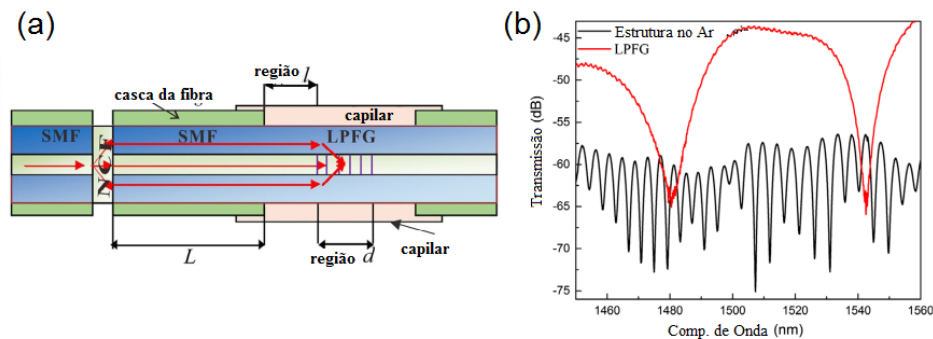


Fonte: YU et al. (2014)

Em 2018, Zhang e colaboradores propuseram um sensor composto por NCF com grade de fibra de longo período (LPFG) (ZHANG et al., 2018). O diagrama esquemático e os espectros de transmissão são mostrados na Figura 36. No experimento, o comprimento do NCF é de apenas 2 mm. O período e comprimento do LPFG são 550 nm e $d = 30 \text{ mm}$, respectivamente. O revestimento da fibra ao redor da região da grade é removido. Os comprimentos das SMFs revestidas e não revestidas entre a NCF e o LPFG são $L = 65 \text{ mm}$ e $l = 20 \text{ mm}$, respectivamente. A estrutura de detecção é considerada como um interferômetro Mach-Zehnder (MZI),

em que a NCF é usada como excitador de modo e o LPFG é um combinador. As medições de IR e temperatura com sensibilidades em torno de $-580,269 \text{ dB/UIR}$ e $27,2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ podem ser realizadas monitorando o espectro de transmissão. O sensor de fibra óptica que foi composto por NCF seguido de grade de fibra pode realizar medições simultâneas de IR e temperatura (LIN et al., 2014), tensão e temperatura (LI et al., 2015), nível de líquido (OLIVEIRA et al., 2016) e compensação de temperatura (LI et al., 2016). Além disso, diferentes estruturas NCF-FBG em cascata podem realizar medições multiponto e multiparâmetros (ZHANG et al., 2017b; GUO et al., 2018; ZHANG et al., 2017a; OLIVEIRA et al., 2016).

Figura 36 – (a) diagrama esquemático da estrutura do sensor (b) espectros de transmissão do dispositivo



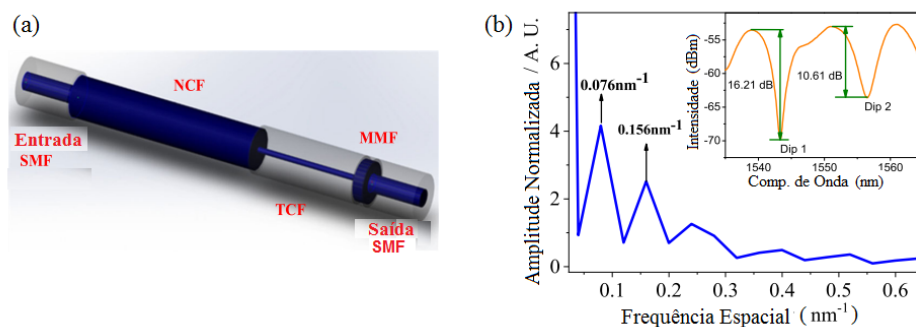
Fonte: ZHANG et al. (2018)

A cascata de dispositivos não é realizada apenas com grades de fibra, a NCF também pode ser cascadeada com outras estruturas para melhorar o desempenho de detecção. Além disso, NCFs em cascata com diferentes comprimentos podem realizar medições de IR multiponto (LIU et al., 2016; JUNG et al., 2006). Em 2015, Chen e colaboradores apresentaram um sensor em fibra baseado em estrutura SNS (monomodo-sem núcleo-monomodo) e SMS (monomodo-multimodo-monomodo) em cascata para resolver o problema de sensibilidade cruzada de temperatura (CHEN et al., 2015). A interferência multimodo ocorrerá na fibra NCF e na MMF com diferentes modos excitados devido às diferentes estruturas de guia de onda. Os resultados experimentais demonstram a viabilidade do sensor e mostram que o dispositivo tem sensibilidades de IR e temperatura de $113,66 \text{ nm/UIR}$ e $9,2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, respectivamente. A longa distância entre as duas regiões sensoras contribui para eliminar a interferência cruzada de modo. Em seu trabalho, Luo e colaboradores adicionaram uma fibra MMF como um acoplador de modo na estrutura SNS para melhorar o interferômetro MMI para detecção de nível de líquido, índice de refração e deformação axial (LUO et al., 2015).

Em 2020, Zhang e colaboradores propuseram experimentalmente um interferômetro modal

composto em fibra (CMI) com base na estrutura de fibra sem núcleo (NCF) em cascata com uma fibra de núcleo fino (TCF), que correspondem, respectivamente, ao interferômetro multimodo (MMI) e Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) (ZHANG et al., 2020). Os resultados experimentais mostram as diferenças aparentes de resposta em termos de comprimento de onda e intensidade devido à estrutura em cascata e assimétrica, Figura 37. O sensor alcança medição simultânea de três parâmetros com alta discriminação, no entanto, uma desvantagem do dispositivo é não realizar medições independentes, ou seja, a medição em uma região de ressonância (Dip 1) afeta a medição na outra região de ressonância (Dip 2). Além disso, a diferença das duas bandas de ressonância é menor que 20 nm. Uma vez que a diferença de duas bandas de ressonância é muito pequena, como na referência (LIU et al., 2015), haverá interferência entre dois canais.

Figura 37 – (a) diagrama esquemático da estrutura do sensor (b) Os espectros de frequência e transmissão do interferômetro modal composto

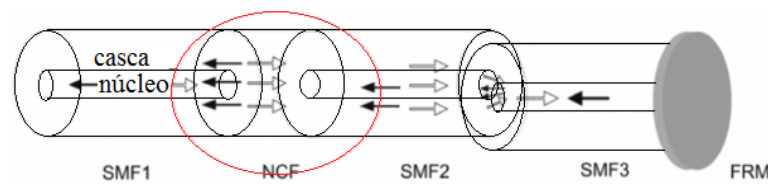


Fonte: ZHANG et al. (2020)

Além da fibra NCF em cascata entre os SMFs, a fibra multi-revestimento pode ser usada para substituir o SMF para medição de curvatura (QI et al., 2014). Em 2017, Wu e colaboradores propuseram uma estrutura compacta baseada em interferômetro Mach-Zehnder (MZI). Dois segmentos da fibra NCF conectados em duas extremidades da fibra com núcleo oco (HCF) são empregados como divisor de feixe e combinador para medir temperatura e tensão, os resultados apresentaram sensibilidade de 30,92 pm/ $^{\circ}\text{C}$ e 0,652 pm/ $\mu\epsilon$, respectivamente (WU et al., 2017). Dong e colaboradores investigaram uma estrutura dependente de polarização para medir torção e temperatura (DONG et al., 2017). A estrutura proposta envolve uma seção de polarização que mantém uma fibra de manutenção de polarização (PMF) entre a estrutura da fibra NSN (NCF-SMF-NCF). Qi e colaboradores, apresentaram um sensor de medição de

curvatura baseado na combinação da fibra NCF e a estrutura com núcleo deslocado (Qi et al., 2015). A fibra NCF conecta duas partes da SMF, já a fibra SMF do lado direito possui uma fusão com o núcleo deslocado com a outra SMF. A luz incidente pode ser inserida no sensor de ambos os lados. Posteriormente, Lu e colaboradores adicionaram uma estrutura de espelho rotador de Faraday no dispositivo apresentado por Qi e colaboradores, ilustrado na Figura 38, para formar um elemento sensor do tipo reflexão e assim medir a temperatura e a concentração da solução (LU et al., 2018).

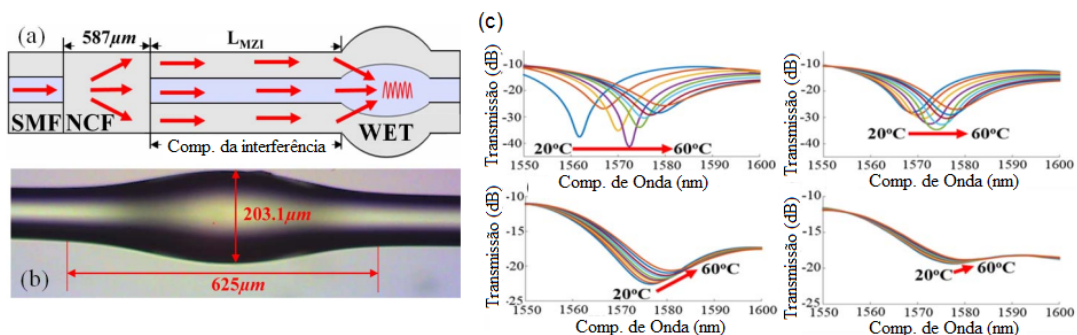
Figura 38 – Diagrama esquemático baseado na estrutura SNS-núcleo deslocado com espelho rotador Faraday



Fonte: LU et al. (2018)

Hsu e colaboradores apresentaram um sensor de temperatura baseado em interferômetro Mach-Zehnder (MZI) com sobreposição de material (HSU et al., 2015). O sensor é construído usando uma seção de fibra monomodo (SMF) entre uma fibra NCF e uma fibra cônica aumentada, que é imerso em material de alto coeficiente termo-óptico como mostrado na Figura 39. A estrutura cônica alargada supera as desvantagens de que a fibra cônica tem baixa resistência mecânica. Os resultados experimentais indicaram que uma alta sensibilidade à temperatura de $0,825 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ foi alcançada para o meio externo com o índice de refração de aproximadamente 1,45.

Figura 39 – (a) Configuração do MZI proposto. (b) Fotografia microscópica da conicidade aumentada (c) Espectros de transmissão da resposta à temperatura com diferentes índices de refração do material



Fonte: HSU et al. (2015)

Nesta Seção 2.2, foram destacados os recentes desenvolvimentos de sensores baseados em estruturas heteronúcleo. Além disso, o princípio de detecção e as diferentes estruturas deste perfil, fibra NCF em cascata com grade bragg de fibra ou com outras estruturas, revestimento de filme metálico para excitar SPR e combinação de materiais sensíveis para medir parâmetros físico-químicos. Ao mesmo tempo, foram apresentados os desempenhos de elementos transdutores melhorados, de estrutura formada por fibra cônica e deslocamento lateral da fibra. Além de tudo, foram mencionados os elementos de detecção do tipo reflexão formados pelo revestimento de filme metálico refletivo na face final da fibra óptica. Sobretudo, foi possível perceber que o estudo de sensores a base fibras ópticas perfil heteronúcleo permite a construção de sistemas de sensoriamento capazes de monitorar e avaliar os mais variados tipos de grandezas.

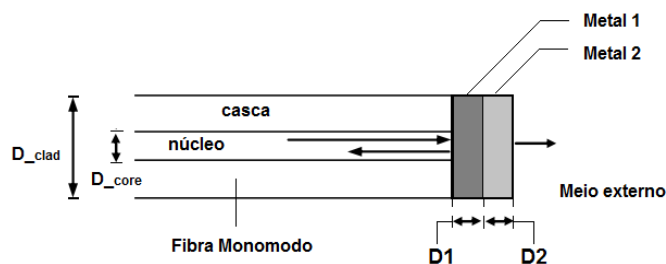
3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE SENSORES A FIBRA ÓPTICA E MODELAGENS TEÓRICAS

Este capítulo apresenta um conjunto de atividades sistemáticas de todas as ações desenvolvidas no processo de fabricação dos elementos transdutores, e o processo de monitoramento. A Seção 3.1 mostra os procedimentos de fabricação de fibras com dupla camada metálica na face para sensores de detecção de corrosão. A Seção 3.2 mostra os procedimentos de fabricação de fibras heteronúcleo para sensores de índice de refração. A Seção 3.3 apresenta os processos de monitoramento de corrosão para a fibra com dupla camada metálica na face, e também o processo de monitoramento para dispositivos com estruturas de fibras heteronúcleo tradicional e em cascata. Na Seção 3.4, tem-se a modelagem computacional do elemento sensor com dupla camada metálica, onde, na Seção 3.4.1, a bicamada metálica é modelada por uma região plana e laminar, sem rugosidade de superfície através de um modelo analítico que faz uso das equações de Fresnel. Na Seção 3.4.2 através de um modelo numérico usando o COMSOL *Multiphysics* e na Seção 3.4.3, é apresentado um modelo numérico com rugosidade usando o COMSOL. Por fim, na Seção 3.5, tem-se a modelagem computacional do elemento sensor à fibra óptica de estrutura heteronúcleo.

3.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS COM DUPLA CAMADA METÁLICA

Antes da metalização da face final das fibras, são definidos alguns parâmetros importantes como, espessura e posicionamento dos metais na bicamada, o estudo é apresentado no Capítulo 4 desta Tese. A Figura 40 mostra o esquema de uma fibra óptica monomodo com dupla camada metálica na face, sendo apontados os parâmetros D_1 , D_2 , D_{clad} e D_{core} definidos como espessuras dos metais um e dois, diâmetros da casca e núcleo da fibra óptica, respectivamente.

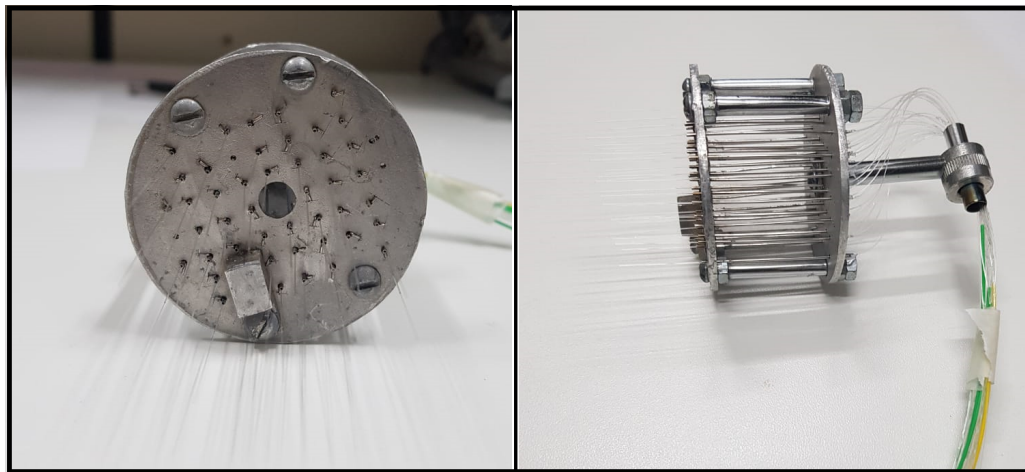
Figura 40 – Diagrama esquemático da fibra óptica com dupla camada metálica na face



Fonte: o autor, 2022

O processo de construção do sensor óptico com dupla camada metálica na face da fibra ocorreu da seguinte maneira: foi usado o comprimento de um metro para cada fibra utilizada na construção do sensor e, em seguida, após passar pelo procedimento de limpeza e clivagem, as fibras foram colocadas em um suporte, o qual foi construído para uma capacidade de até 48 fibras. Em seguida, o suporte com fibras ópticas é levado para o procedimento de metalização das faces, utilizando-se equipamento de metalização por *sputtering*. Na Figura 41, é possível ver o suporte metálico com uma pequena camada de metal sobre a sua superfície, e também sobre as fibras ópticas.

Figura 41 – Suporte para preparar múltiplas estruturas sensoras



Fonte: o autor, 2022

No entanto, para a fabricação das fibras ópticas com dupla camada metálica na face é utilizado o processo de metalização por *sputtering*. O equipamento utilizado para realizar a técnica de deposição de filmes finos metálicos por *sputtering*, que pertence ao Departamento de Física da UFPE, é um *Balzers-Pfeffer model PLS 500*, como mostra a Figura 42.

A câmara de vácuo possui quatro eletrodos, um bloqueador e um suporte em forma de disco onde são colocadas as amostras. Os alvos são colocados nos eletrodos. O equipamento possui quatro eletrodos sendo, portanto, possível colocar quatro metais diferentes ao mesmo tempo para realizar deposição. O bloqueador que cobre os eletrodos tem a função de selecionar qual eletrodo será usado para a deposição do metal. A base onde são posicionadas as amostras no suporte, como mostra a Figura 43(a). O suporte das amostras fica acima do bloqueador dos eletrodos, como mostrado na Figura 43(b).

Ainda na Figura 43(b) o suporte é colocado na câmara do *sputtering* com as faces das fibras ópticas voltadas para baixo. Posteriormente, a acomodação das fibras no interior da câmara, é realizada a metalização das faces das fibras ópticas.

Figura 42 – Equipamento de *sputtering* utilizado na deposição (a) com câmara de vácuo fechada (b) com câmara de vácuo aberta



(a)



(b)

Fonte: o autor, 2022

Figura 43 – (a) Câmara do *sputtering* onde podem ser vistos os eletrodos e a posição das fibras dentro da câmara (b) Posição onde é colocado o suporte com as fibras



(a)



(b)

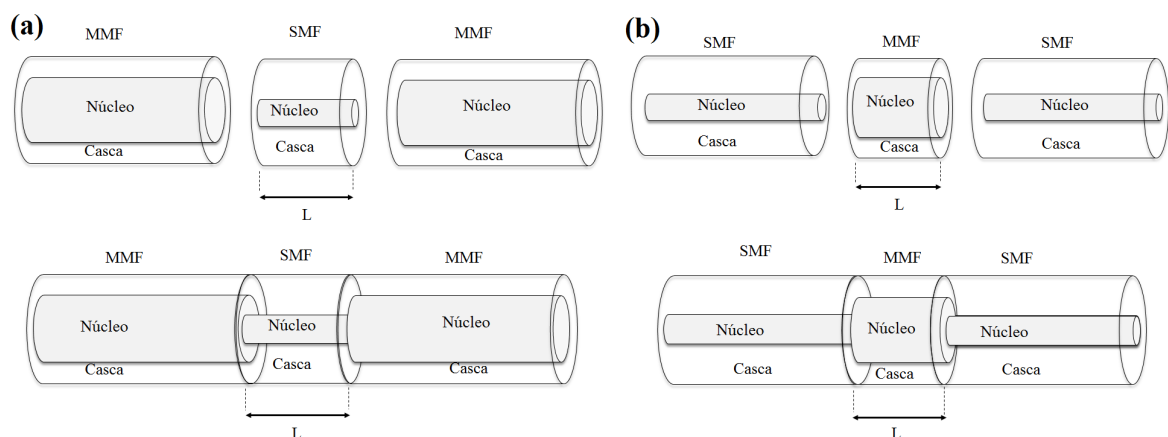
Fonte: o autor, 2022

3.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS HETERONÚCLEO

Como visto na Seção 2.2, a estrutura heteronúcleo consiste num conjunto de fibras ópticas que, usualmente, é caracterizada por um comprimento de inserção heteronúcleo L , da ordem de milímetros, cujo diâmetro do núcleo é diferente das fibras adjacentes. Nesse comprimento de inserção L , é realizada a fusão nos seus extremos com às fibras adjacentes, formando assim uma estrutura heteronúcleo. Dependendo das configurações desejadas, as dimensões do núcleo entre cada seção da fibra, assim como o tipo de fibra usado pode variar.

A montagem do perfil heteronúcleo é mostrada esquematicamente na Figura 44(a), que chamaremos de Perfil 1. O comprimento L de inserção de fibra óptica monomodo (SMF) é emendado entre duas fibras ópticas multimodos (MMF). Os diâmetros dos núcleos e revestimentos (cascas) das fibras SMF e MMF são 8 e 125 μm , 62,5 e 125 μm , respectivamente. Na emenda das fibras, para fabricação das estruturas heteronúcleo, é utilizado um clivador e uma máquina de fusão de fibra óptica (Fitel s178A). A Figura 44(b) mostra o processo de fabricação da estrutura heteronúcleo Perfil 2, que tem a montagem estrutural análoga ao Perfil 1. No entanto, o comprimento L de inserção de fibra óptica no Perfil 2 é multimodo, emendado entre duas fibras ópticas SMF. Os diâmetros dos núcleos e revestimentos (cascas) das fibras SMF e MMF são idênticos aos do Perfil 1.

Figura 44 – Esquema de fabricação fibra Heteronúcleo a) Perfil 1 e b) Perfil 2

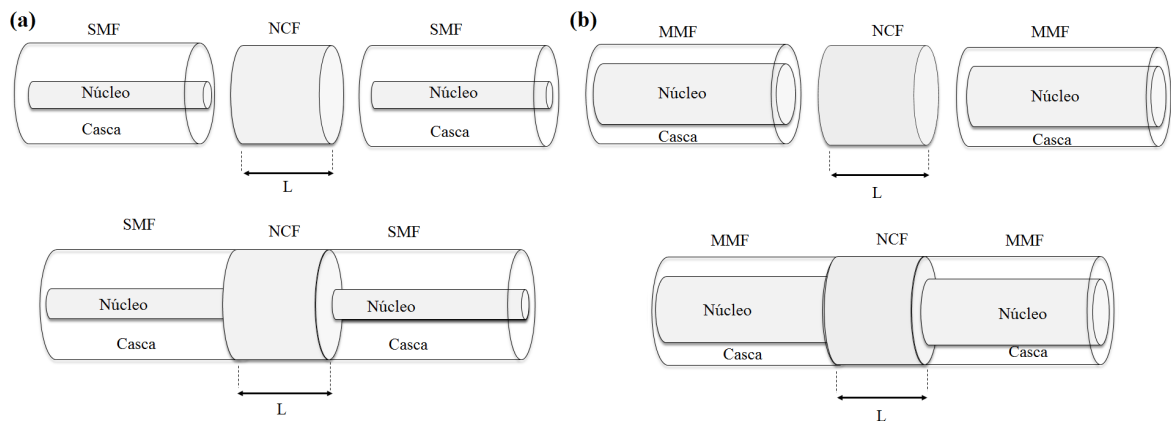


Fonte: o autor, 2022

Já a Figura 45(a), mostra o diagrama esquemático da estrutura heteronúcleo, Perfil 3, que consiste em uma fibra óptica especial NCF (No-Core Fiber), com comprimento L , e duas

fibras SMF padrão. As fibras SMF e NCF são alinhadas com precisão para o processo de fusão do comprimento de inserção heteronúcleo NCF usando a máquina de fusão de fibras ópticas. Os diâmetros dos núcleos e revestimentos das fibras SMF são 8 e 125 μm , 62,5 e da fibra NCF 125 μm . O diagrama da estrutura heteronúcleo MNM, Perfil 4, é mostrado esquematicamente na Figura 45(b). A estrutura é composta por uma fibra multimodo (MMF) como meio de transmissão do sinal óptico, e um segmento curto de fibra sem núcleo (NCF), de comprimento L, como interface de transdução, formando a estrutura heteronúcleo MNM (Multimodo-No-Core fiber-Multimodo).

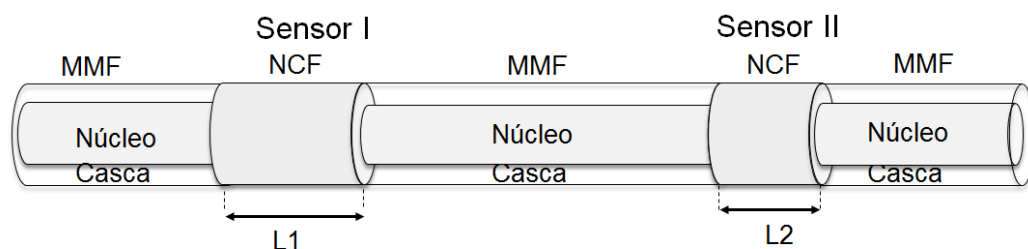
Figura 45 – Esquema de fabricação fibra Heteronúcleo a) Perfil 3 e b) Perfil 4



Fonte: o autor, 2022

Figura 46 – Esquema de fabricação da cascata de dispositivos de estrutura heteronúcleo

ESTRUTURA EM CASCATA



Fonte: o autor, 2022

Na Figura 45(b), é apresentado o diagrama da estrutura heteronúcleo tradicional utilizada nesta Tese. Já a Figura 46 mostra o diagrama esquemático da estrutura da fibra de perfil heteronúcleo em cascata usada neste trabalho para realizar detecção pelo princípio da multi-

plexação por divisão de comprimento de onda. Essa montagem é análoga ao perfil heteronúcleo MNM tradicional, Figura 45(b). No entanto, a estrutura heteronúcleo em cascata é formada por três prolongamentos de fibras multimodo (MMF) unidas nas extremidades das seções das fibras sem núcleo (NCF) com comprimentos de inserção L1 e L2, separados por um trecho de fibra multimodo de 0,5 metros.

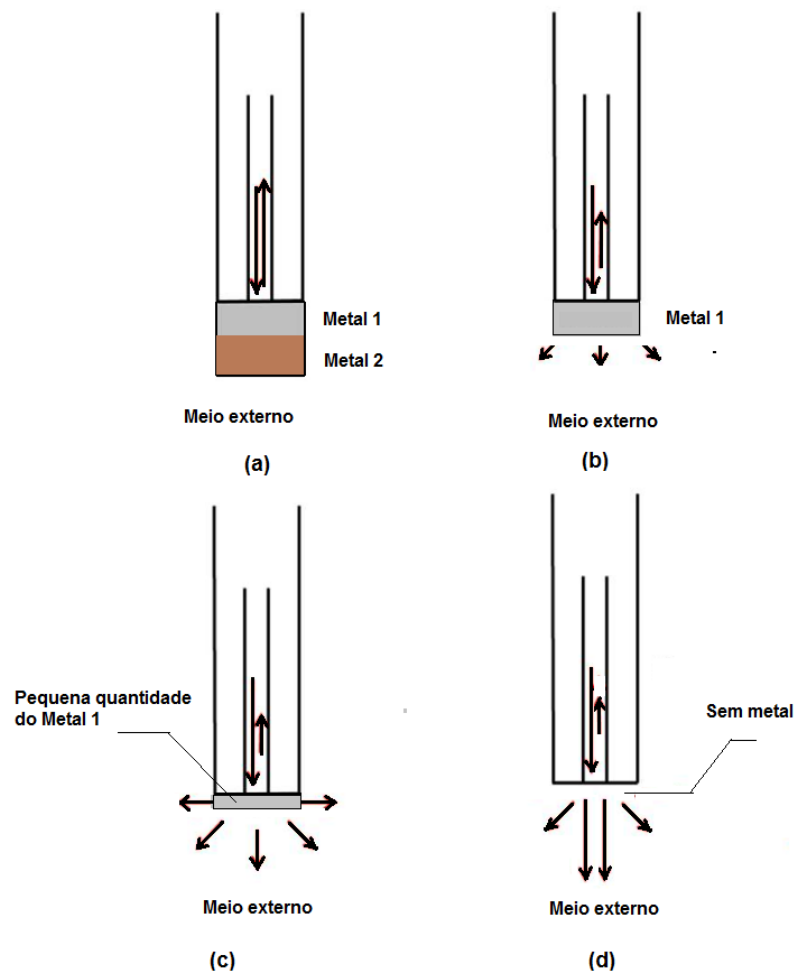
3.3 PROCESSOS DE MONITORAMENTO USANDO FIBRA ÓPTICA

Nesta seção, são apresentados os processos de monitoramento de corrosão usando fibra óptica com dupla camada metálica na face da fibra e com fibra óptica perfil heteronúcleo tradicional e em cascata. São mostrados parâmetros e sua influência na região sensora, tanto para o perfil de multicamada quanto para o perfil heteronúcleo. Ainda nesta seção, é especificado o método de monitoramento multiponto da corrosão para o dispositivo com dupla camada metálica.

3.3.1 Monitoramento usando Fibra com Dupla Camada Metálica

O sensor de corrosão de fibra óptica com base em dupla camada metálica de filmes finos é composto basicamente de duas partes: a ponta de fibra revestida de duas camadas de filmes finos metálicos para detectar o processo corrosivo através da alteração de espessura dos filmes finos e a fibra óptica para transmitir o sinal óptico de uma fonte de luz e para o dispositivo de detecção (QIAO; ZHOU; OU, 2006). A Figura 47(a) mostra a região de detecção do sensor à fibra óptica com dupla camada metálica localizada na extremidade da fibra. O sensor de corrosão por fibra óptica com base em filmes finos metálicos pode detectar rapidamente a região da corrosão e fornecer informações úteis, como profundidade, taxa da corrosão, etc (QIAO; ZHOU; OU, 2006). Ainda na Figura 47, as interações na região do revestimento alvo, monitorado em uma extremidade da fibra óptica, podem ser detectadas pela mudança da refletividade. A Figura 47(b) mostra o processo de corrosão para a situação em que o primeiro metal foi corroído. As Figuras 47(c) e (d) mostram a continuação da mudança de espessura dos filmes metálicos no processo corrosivo.

Figura 47 – Diagrama dos efeitos ópticos na ponta metalizada durante o processo de corrosão (a) com dois metais (b) com um metal (c) com parte do metal 1 (d) sem metal



Fonte: o autor, 2022

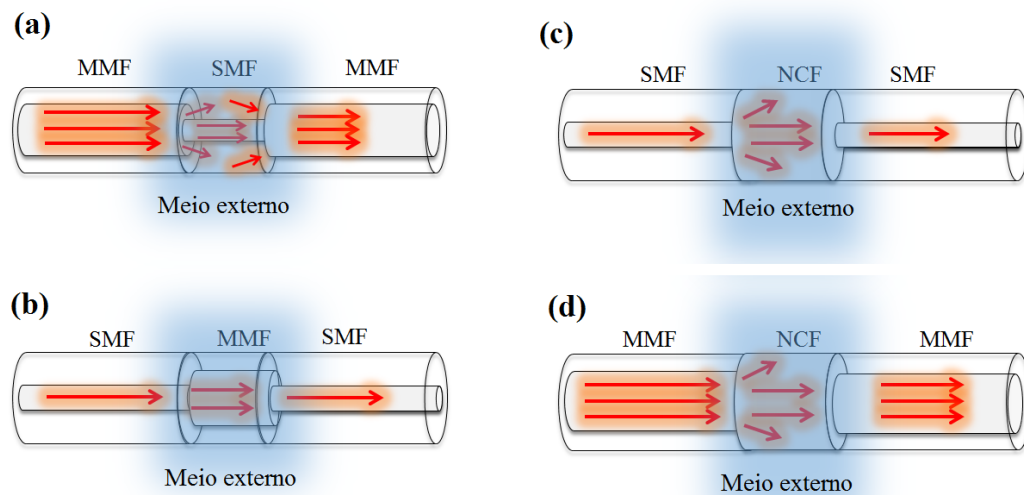
3.3.2 Monitoramento usando Fibra Perfil Heteronúcleo

Esta seção apresenta uma abordagem sobre o processo de monitoramento em estruturas heteronúcleo. Esta configuração, faz uso de um outro tipo de fibra óptica para monitoramento, denominada de comprimento de inserção heteronúcleo, é o elemento que permite a alteração de uma das propriedades da luz em função do mensurando. É uma região de detecção e pode ter, por exemplo, as configurações mostradas na Figura 48.

A Figura 48(a) mostra como parte da radiação eletromagnética atua no comprimento L de inserção heteronúcleo. O princípio físico-óptico associado a esse fenômeno é o mesmo com os sensores de ondas evanescentes, mas as fibras ópticas de perfil heteronúcleo são mais fáceis de fabricar, uma vez que o controle do comprimento de inserção é facilmente produzido (SEKI et al., 2007; EFENDIOGLU et al., 2011). O perfil no qual a existência de diferentes núcleos permite

que parte dos raios incidentes na região heteronúcleo sejam encaminhados para a casca e outra direcionada para o núcleo da fibra de comprimento L . A maior parte da luz pode passar através desta região com uma perda relativamente pequena (NISHIYAMA; SASAKI; WATANABE, 2007). Os sensores à fibra óptica perfil heteronúcleo possuem alta sensibilidade devido ao acoplamento dos modos que acontece na região da emenda. Como no perfil heteronúcleo as fibras ópticas possuem diferentes diâmetros do núcleo, a radiação eletromagnética transmitida para a região do revestimento do comprimento de inserção L torna-se mais fácil, por exemplo, quando uma perturbação externa é aplicada a essa região (EFENDIOGLU et al., 2011).

Figura 48 – Estrutura heteronúcleo convencional (a) MSM (b) SMS (c) SMS composta por uma fibra sem núcleo (NCF) e (d) MNM composta por fibra NCF na região sensora



Fonte: o autor, 2022

Os sensores de interferência multimodo (MMI) requerem uma fibra óptica multimodo para observar os efeitos MMI. A estrutura dos sensores interferométricos MMI tem sido amplamente investigada para o desenvolvimento de diversos sensores de fibra óptica. A estrutura para obter um dispositivo MMI é mostrada na Figura 48(b). É um perfil heteronúcleo SMS convencional, que consiste em uma fusão de fibra MMF, da ordem de milímetros, emendada entre fibras SMF de entrada e saída. A luz injetada é guiada do SMF de entrada para o MMF e se propaga ao longo do núcleo do MMF, a onda evanescente interage com o meio externo e como consequência, pode ser sensível às mudanças nas condições externas à região de detecção (MATIAS; IKEZAWA; CORRES, 2016). No entanto, é preciso esclarecer que dependendo da estrutura, o núcleo da fibra MMF de detecção deve ter o diâmetro próximo ao da casca, pois se o campo evanescente da estrutura SMS não interagir com o meio externo, não ocorrerá

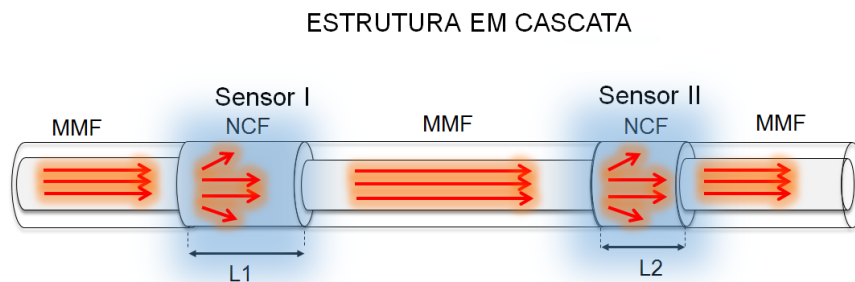
sensibilidade a nenhuma alteração das condições externas à região de detecção. Sendo assim, esse perfil é usualmente fabricado com uma fibra MMF com diâmetros do núcleo e casca de $105\ \mu\text{m}$ e $125\ \mu\text{m}$, respectivamente. Outra alternativa é remover ou polir a casca da fibra MMF.

Apesar das vantagens da estrutura heteronúcleo SMS, é necessário um aprimoramento do perfil do elemento transdutor que melhor se adapte às condições exigidas de sensoriamento para as mais diversas grandezas que se pretende monitorar. Portanto, ao invés de utilizar o MMF convencional na estrutura SMS, a fibra sem núcleo (NCF) é uma alternativa atrativa para funcionar como a região de detecção, como ilustrado na Figura 48(c). Embora a estrutura heteronúcleo SMS à base de fibras NCF tenham muitas vantagens, essa estrutura pode produzir uma perda de luz na interface entre a fibra NCF (região sensora) e a fibra SMF de saída devido a diferença de diâmetros dos núcleos, embora, nas interfaces (região de emendas das fibras) causa perdas que são tipicamente inferiores a 2 dB, medidas em 1550 nm, quando o meio externo é ar. No entanto, pode comprometer o desempenho do dispositivo em muitas aplicações específicas, por exemplo, a multiplexação de vários sensores. Sendo assim, a inserção da fibra NCF entre fibras MMF de entrada e saída, formando a estrutura MNM (multimodo - No-core Fiber - multimodo), como ilustra a Figura 48(d), causa perdas ainda menores nas interfaces devido o núcleo da fibra MMF de saída ser muito maior que o da fibra SMF. Isso permite a possibilidade de inserir várias seções de NCF, ou seja, vários sensores, em uma fibra multimodo. Dessa forma, a multiplexação de vários sensores é viável.

Com o desenvolvimento de estruturas baseadas em perfis heteronúcleo, algumas outras novas estruturas são produzidas para diferentes aplicações. Novas configurações podem manter as vantagens, por exemplo, perfil compacto e a fácil fabricação da estrutura heteronúcleo convencional. A discussão até este momento mostra que os sensores de fibras ópticas baseados em estruturas heteronúcleo são adequados para muitos cenários e medição diferentes. No entanto, a demanda por maior sensibilidade de medição e também a medição multiparâmetros leva ao crescimento de vários sensores de fibra baseados na cascata de dispositivos. A Figura 49 mostra uma cascata de dispositivos com base em estruturas de fibra heteronúcleo MNM, nessa configuração são inseridas duas seções de fibra NCF de comprimentos L1 (Sensor I) e L2 (Sensor II) separados por um trecho de fibra multimodo de comprimento longo suficiente para não ocorrer interferência na fibra MMF entre os dois sensores. A região de detecção deste sensor está restrita à fibra NCF, a luz propagando nesta fibra pode interagir com o meio externo, e em seguida, é acoplada novamente ao núcleo da fibra multimodo que compõe

o enlace (HUANG et al., 2013). Com essa estrutura é possível obter duas regiões diferentes de ressonância no espectro de transmissão de luz. Portanto, com a cascata de dispositivos é possível realizar detecção pelo princípio da multiplexação por divisão de comprimento de onda, ou seja, a interrogação do sensor em cada trecho NCF é feita com diferentes comprimentos de onda.

Figura 49 – Cascata de dispositivos com estrutura heteronúcleo MNM



Fonte: o autor, 2022

O uso de sensores de fibra óptica com estrutura heteronúcleo em cascata é uma abordagem viável de coleta de dados em tempo real por adesão à superfície ou incorporação do dispositivo a uma amostra em avaliação. Com o sensoriamento através da cascata de dispositivos é possível realizar detecção pelo princípio da multiplexação por divisão de comprimento de onda e medição de múltiplos parâmetros. A interrogação do sensor feita com diferentes comprimentos de onda é utilizado para os estudos em que várias ações de sensoriamento simultâneas de um mesmo parâmetro ou de diferentes parâmetros são realizadas pelo mesmo sensor em locais diferentes.

3.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO ELEMENTO SENSOR COM DUPLA CAMADA METÁLICA

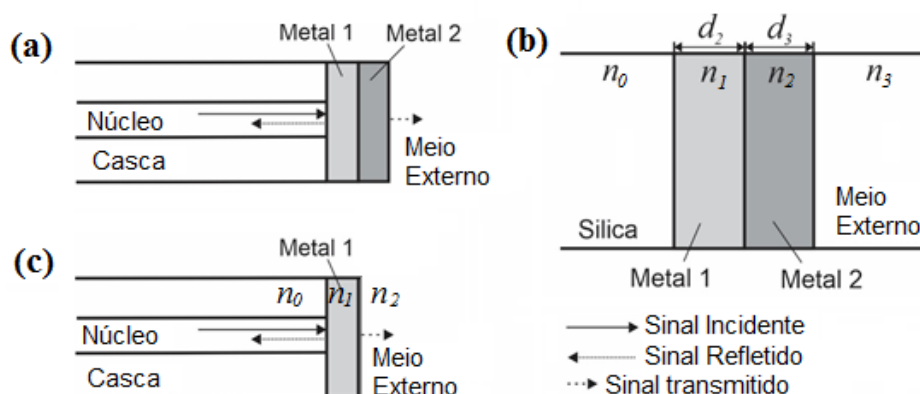
Nesta seção, tem-se a modelagem computacional para a dinâmica da corrosão dos elementos transdutores do sensor de corrosão com dupla camada metálica na face final da fibra óptica, considerando uma região plana e laminar, sem a geração da rugosidade na superfície desses transdutores devido ao processo corrosivo, apresentada na Seção 3.4.1 através de um modelo analítico que faz uso da equações de Fresnel e na Seção 3.4.2 através de um modelo

numérico usando o COMSOL *Multiphysics*. A seção 3.4.3 apresenta, usando o COMSOL, uma modelagem para a dinâmica da corrosão dos elementos transdutores com bicamada metálica, considerando a geração da rugosidade na superfície desses transdutores devido ao processo corrosivo.

3.4.1 Modelo de Fresnel

A seção longitudinal de uma fibra óptica com uma bicamada metálica sobre uma de suas extremidades é ilustrada na Figura 50(a), que representa o elemento sensor do sistema de detecção da corrosão desenvolvido neste trabalho. Como pode ser observado na figura 50(b), o sistema de multicamadas é composto por sílica (material do núcleo da fibra), metal 1, metal 2 e meio externo (agente corrosivo). Nessa estrutura, o sinal óptico guiado na fibra óptica incide sobre a bicamada metálica, fazendo com que uma fração desse sinal seja refletido, outra absorvida e, dependendo da espessura da bicamada, tem-se uma fração transmitida para o meio externo. Sob ação de um processo corrosivo, a redução da espessura dos metais que compõem a bicamada causa uma modulação na intensidade do sinal óptico refletido. Essa modulação pode ser obtida, teoricamente, com base nas equações de Fresnel para a reflexão (FONTANA; PANTELL, 1988; QIAO; ZHOU; OU, 2006), fazendo uma abordagem para o elemento sensor da Figura 50(a) por um sistema de multicamadas, como ilustrado na Figura 50(b).

Figura 50 – (a) Elemento sensor com bicamada metálica. (b) Sistema multicamada usado pelo modelo analítico (c) monocamada metálica



Fonte: o autor, 2022

Assim, o coeficiente de reflexão de Fresnel r_1 considerando a luz incidindo perpendicular-

mente à interface para o caso de uma interface fibra óptica-filme fino metálico, como mostra a Figura 50(c), é descrito por (FONTANA; PANTELL, 1988; QIAO; ZHOU; OU, 2006):

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad (3.1)$$

em que n_0 e n_1 são os índices de refração da fibra e do filme. Sendo o coeficiente de reflexão de Fresnel r_2 na interface filme-meio externo dado por:

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad (3.2)$$

em que n_2 é o índice de refração do meio externo e o índice de refração do filme metálico é descrito da seguinte forma:

$$n = n_1 - j\kappa_1, \quad (3.3)$$

Assim, os coeficientes de reflexão nas interfaces são:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1 + j\kappa_1}{n_0 + n_1 - j\kappa_1}; \quad r_2 = \frac{n_1 - j\kappa_1 - n_2}{n_1 - j\kappa_1 + n_2}, \quad (3.4)$$

e o coeficiente de reflexão de Fresnel da luz incidente em duas interfaces paralelas é:

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-j\Phi_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-j\Phi_1}}, \quad (3.5)$$

em que Φ_1 é a mudança de fase da luz incidente devido a passagem no filme fino metálico, e para o i -ésimo filme fino metálico, é dada por:

$$\Phi_i = \frac{4\pi \bar{n}_i d_i}{\lambda}, \quad (3.6)$$

em que o índice i representa número de filmes metálicos depositados na fibra, d_i é a espessura do i -ésimo filme, λ é o comprimento da luz incidente no vácuo e $\bar{n}_i$ é o índice de refração do i -ésimo filme fino metálico.

A reflectância R é definida pelo modulo quadrado do coeficiente de reflexão de Fresnel. Assim, pela Equação 3.5, tem-se que R é expressa por (FONTANA; PANTELL, 1988; QIAO; ZHOU; OU, 2006):

$$R = \left| \frac{r_1 + r_2 e^{-j\Phi_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-j\Phi_1}} \right|^2. \quad (3.7)$$

O modelo para o sistema com multicamadas pode ser derivado do modelo de camada única (FONTANA; PANTELL, 1988; QIAO; ZHOU; OU, 2006). Tem-se agora uma configuração

com três interfaces (fibra-metal 1-metal 2-meio externo), como ilustrado na Figura 50(b). Sendo o coeficiente de reflexão total nas interfaces:

$$r = \frac{r_2 + r_3 e^{-j\Phi_2}}{1 + r_2 r_3 e^{-j\Phi_3}}, \quad (3.8)$$

com

$$r_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}; \quad \Phi_2 = \frac{4\pi n_2 d_2}{\lambda}, \quad (3.9)$$

A descrição quantitativa da Reflectância total de Fresnel na dupla camada metálica e sua dependência com os parâmetros do sensor como comprimento de onda, espessura e materiais (FONTANA; PANTELL, 1988; QIAO; ZHOU; OU, 2006), é dada por:

$$R = \left| \frac{r_1 + r_2 e^{-j\Phi_1} + r_3 e^{-j(\Phi_1+\Phi_2)} + r_1 r_2 r_3 e^{-j\Phi_2}}{1 + r_1 r_2 e^{-j\Phi_1} + r_1 r_3 e^{-j(\Phi_1+\Phi_2)} + r_2 r_3 e^{-j\Phi_2}} \right|^2. \quad (3.10)$$

Pode-se observar pela Equação 3.10, que conforme as espessuras dos filmes finos metálicos são alteradas é possível analisar a variação da reflectância R. Portanto, a alteração no sinal da luz refletida indica a taxa de decaimento da amplitude do sinal durante o processo de corrosão nos filmes finos metálicos.

3.4.2 Modelo Numérico sem Rugosidade usando o COMSOL Multiphysics

A modelagem computacional é uma excelente ferramenta que auxilia no desenvolvimento de pesquisas científicas e tecnológicas, além de minimizar custos e tempo de um projeto, também permite desenvolver produtos resistentes, mais eficientes e de maior qualidade em menor tempo. A utilização de ferramentas de simulação computacional no projeto evita diferentes consequências que a falha de um experimento pode trazer, como desperdícios de materiais e custos de reparação e etc. Portanto, levando em consideração o projeto de monitoramento de corrosão proposto neste Projeto de Tese, existe um custo alto relacionado à fabricação do elemento transdutor do sensor, tendo em vista que o equipamento para realizar a deposição de filme fino de metal na face da fibra óptica, é usada a técnica de metalização por *sputtering*, o equipamento pertence ao Departamento de Física da UFPE. Portanto, como o custo das mudanças em um sistema é alto, a simulação computacional é um investimento importante para analisar suas consequências antes de sua fabricação, tornando o sistema otimizado.

O COMSOL *Multiphysics* é uma plataforma de simulação computacional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), que compreende todos os estágios do modelo, desde a

construção da geometria, propriedades dos materiais e física que descreve fenômenos específicos até solução e pós-processamento para produzir os resultados (COMSOL, 2016). O Método dos Elementos Finitos é muito utilizado em diversas áreas como problemas de guia de onda, dispositivos semicondutores (SADIKU, 2000).

3.4.2.1 Módulo de Ondas Ópticas

O módulo de simulação utilizado no COMSOL *Multiphysics* é o *Wave Optics Module*, que permite configurar e resolver problemas de ondas eletromagnéticas em frequências ópticas. O módulo é útil para simulações e design de aplicações ópticas em praticamente todas as áreas em que você encontra ondas eletromagnéticas, como fibras ópticas, guias de onda fotônicos (COMSOL, 2015b). O *Wave Optics Module* possibilita a simulação de meios ópticos com propriedades de material anisotrópicas, não lineares, não homogêneas e dispersivas, como condutividade, permissividade e índice de refração. De forma que este módulo permite acesso a forma tensorial para material de propriedade anisotrópica, e também permite inserir equações algébricas para essas propriedades do material, como materiais não lineares, não homogêneas e dispersivas (COMSOL, 2015b; ALVES et al., 2018).

3.4.2.2 Equação de Onda

A fundamentação teórica utilizada no Módulo de Ondas Ópticas consiste em formulações de equações diferenciais parciais para os campos elétricos e magnéticos que se propagam com altas frequências (COMSOL, 2015b). O desenvolvimento matemático a partir da Lei de Ampère-Maxwell e da Lei de Faraday (JACKSON, 1999), apresentadas nas Equações 3.11 e 3.12:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.11)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (3.12)$$

em que $\vec{E}$ e $\vec{H}$ representam os vetores campo elétrico e campo magnético, respectivamente, $\vec{J}$ é o vetor densidade de corrente, $\vec{B}$ e $\vec{D}$ são os vetores densidade de fluxo magnético e densidade de fluxo elétrico, respectivamente.

A partir das relações constitutivas $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$ e $\vec{J} = \sigma \vec{E}$, em que ϵ , μ e σ correspondem a permissividade elétrica, a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica,

tem-se que:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (3.13)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (3.14)$$

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y, z) e^{j\omega t}, \quad (3.15)$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \vec{H}(x, y, z) e^{j\omega t}. \quad (3.16)$$

Combinando os campos elétrico e magnético no regime permanente senoidal das Eqs. 3.15 e 3.16 com as Eqs. 3.13 e 3.14, obtém-se:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \vec{E}) - \omega^2 \varepsilon \vec{E} = 0, \quad (3.17)$$

$$\nabla \times (\varepsilon^{-1} \nabla \times \vec{H}) - \omega^2 \mu \vec{H} = 0 \quad (3.18)$$

em que 0 corresponde ao vetor nulo.

Para esta Tese, a modelagem proposta resolve a Equação 3.17. O COMSOL utiliza esta equação no estudo de ondas eletromagnéticas no domínio da frequência (Electromagnetic Waves Frequency Domain Study) (COMSOL, 2015b). Fazendo o uso de $k_0 = \omega(\varepsilon_0 \mu_0)^{1/2}$, em que k_0 é o número de onda no vácuo, ω é a frequência de propagação, ε_0 é a permissividade elétrica no vácuo e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo; $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$, com ε_r definida como a permissividade elétrica relativa e $\varepsilon_r = n^2$ para frequências ópticas, n é o índice de refração, tem-se que a Equação 3.17 é modificada para

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 n^2 \vec{E} = 0, \quad (3.19)$$

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0. \quad (3.20)$$

A Equação 3.20 é obtida fazendo uso de uma identidade vetorial para $\nabla \times (\nabla \times \vec{E})$, e sabendo que $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ na ausência de fontes e sorvedouros, e com $k = k_0 n$. A Equação 3.19 é chamada de equação de Helmholtz. A Equação 3.20 é normalmente resolvida em problemas envolvendo a propagação de ondas eletromagnéticas nos mais variados meios, como em guias de onda e no espaço livre.

3.4.2.3 Estudo de Análise de Modo de Fronteira

É necessário adicionar ao estudo de frequência, um estudo de análise de modo de fronteira (*Boundary Mode Analysis*), esse estudo adicional permite que o COMSOL *multiphysics*

obtenha os modos que se propagam no guia de onda, uma vez conhecida a constante de propagação β . Esse estudo é feito através da resolução da Equação 3.17 ou 3.20, com o campo elétrico definido na forma harmônica por (COMSOL, 2015b)

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re}[\vec{E}(\vec{r})e^{j\omega t - \alpha z}], \quad (3.21)$$

onde tem-se que o parâmetro espacial é definido como, $\alpha = \delta z + j\beta$, e δz representa o amortecimento ao longo da direção de propagação z .

Os modos de propagação utilizados nas simulações são, o modo Transverso Elétrico (TE); nesse modo a componente E_z do campo elétrico na direção de propagação é nula, mas $H_z \neq 0$ (FONTANA, 2013), o modo Transverso Magnético (TM); a componente H_z do campo magnético na direção de propagação é nula, com $E_z \neq 0$ (FONTANA, 2013), por fim, o modo Híbrido; os modos híbridos consistem na coexistência dos modos TE e TM, comuns em guias de onda planares e fibra óptica (FONTANA, 2013).

É necessário definir no COMSOL, quais componentes do vetor campo elétrico devem ser revolvidas. É possível escolher na aba *Electromagnetic Waves, Frequency Domain (ewfd)* do COMSOL, *out-of-plane*: que corresponde ao modo TE, o campo elétrico fora do plano de modelagem (COMSOL, 2015b), *in-plane*: que corresponde ao modo TM, o campo elétrico no plano de modelagem (COMSOL, 2015b) e *three-component*: que corresponde ao modo híbrido, o campo elétrico pode ter três componentes (COMSOL, 2015b).

3.4.2.4 Excitação de Ondas Eletromagnéticas

É necessário a excitação da onda eletromagnética na entrada da fibra óptica para que um modo de propagação seja introduzido na fibra. Dessa forma, são adicionadas no COMSOL *Multiphysics* as portas (ports). O COMSOL disponibiliza diferentes tipos de portas com suas respectivas funções, e o acesso a esse recurso depende da dimensão 2D ou 3D do modelo. existem diferentes tipos de portas que são: Retangular, Periódica, Coaxial, Circular e Numérica. Para a simulação realizada nesta Tese a porta utilizada é a numérica que está disponível para simulações em 2D e 3D. A porta numérica é a maneira mais simples de introduzir uma excitação numa fibra óptica, pois é necessário selecionar apenas a face de entrada do sinal na fibra óptica e definir a potência de entrada do sinal óptico P_{in} (em W no SI). Com isso o COMSOL obtém, através do estudo de análise de modo de fronteira (*Boundary Mode Analysis*), o modo que se propaga na fibra óptica. Mesmo quando se utiliza modelos com geometrias em 2D, essa porta

permite que o COMSOL resolva como se o guia de onda fosse cilíndrico, como é o caso de uma fibra óptica (COMSOL, 2015b). A porta numérica suporta computação direta do parâmetro S , que são matrizes dependentes de frequência e valores complexos que descrevem a transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas em diferentes portas de dispositivos como guia de onda e linhas de transmissão.

3.4.2.5 Cálculo da Reflectância

Para realizar os cálculos da Reflectância e Transmitância, o COMSOL faz uso do parâmetro S ou parâmetro de dispersão ($S - parameter$). Para um dispositivo com duas portas, os parâmetros S são:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Para a modelagem proposta nesta Tese, os elementos S_{12} e S_{22} são nulos, pois estão relacionados ao status Off da porta 2, que não tem a função de emissor. Assim, a matriz S é dada por:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 \\ S_{21} & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Os parâmetros S_{11} e S_{21} são definidos nas Equações 3.24 e 3.25, respectivamente (COMSOL, 2015a).

$$S_{11} = \frac{\int_{porta1} ((\vec{E}_c - \vec{E}_1) \cdot \vec{E}_1^*) dA_1}{\int_{porta1} (\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1^*) dA_1}, \quad (3.24)$$

$$S_{21} = \frac{\int_{porta2} ((\vec{E}_c \cdot \vec{E}_2^*) dA_2}{\int_{porta2} (\vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2^*) dA_2}, \quad (3.25)$$

em que o parâmetro S_{11} é o coeficiente de reflexão na porta 1, e o parâmetros S_{21} , é o coeficiente de transmissão na porta 2 (COMSOL, 2015a). O campo elétrico E_c corresponde ao campo elétrico emitido pela porta 1 somado ao campo elétrico refletido que chega a essa porta. O campo elétrico E_1 é medido pela porta 1 e o campo elétrico E_2 é medido pela porta 2. No COMSOL, a Reflectância (R) e a Transmitância (T) são definidas pelas Equações 3.26 e 3.27, respectivamente (COMSOL, 2015b):

$$R = |S_{11}|^2, \quad (3.26)$$

$$T = |S_{21}|^2. \quad (3.27)$$

O fluxo de potência média, medido nas portas 1 e 2, está relacionado aos campos E_1 e E_2 , pelo vetor de *Poynting* equação 3.28. O fluxo de potência média medido na porta 1 e na porta 2 é dada pela componente normal do vetor de *Poynting*, equações 3.29 e 3.30, respectivamente (COMSOL, 2015a):

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \Re(\vec{E} \times \vec{H}^*), \quad (3.28)$$

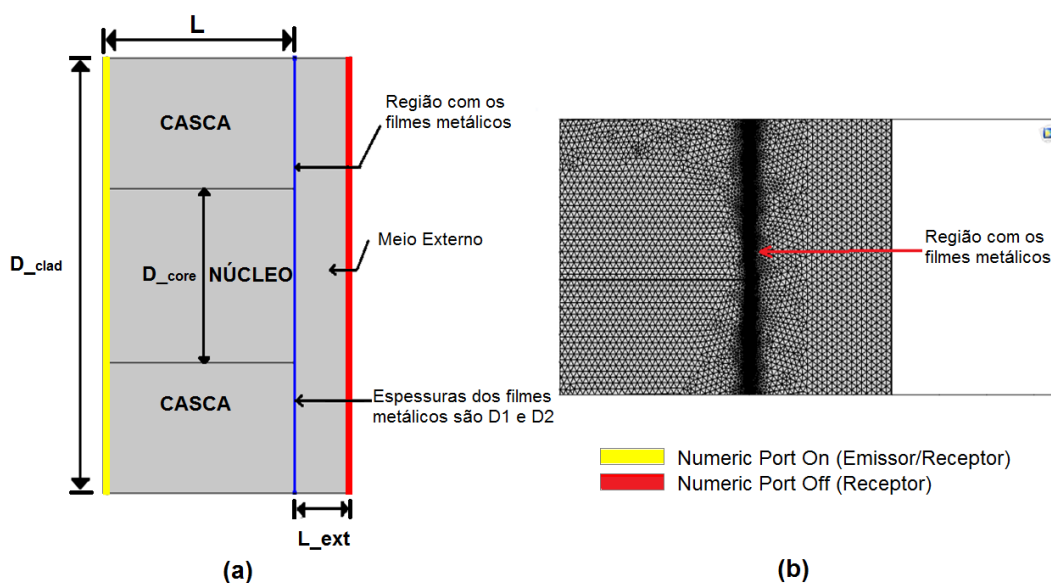
$$\vec{n} \cdot \vec{S}_1 = \vec{n} \cdot \frac{1}{2} \Re(\vec{E}_1 \times \vec{H}_1^*), \quad (3.29)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{S}_2 = \vec{n} \cdot \frac{1}{2} \Re(\vec{E}_2 \times \vec{H}_2^*). \quad (3.30)$$

Os aspectos conceituais abordados até este momento através de equações para os campos elétricos e magnéticos são necessários para a modelagem de problemas do Eletromagnetismo pelo COMSOL.

A modelagem do elemento transdutor do sensor de corrosão, proposta nesta Tese de Doutorado, consiste de uma fibra óptica monomodo com dupla camada metálica na face da fibra. Esse perfil é construído no COMSOL *Multiphysics* numa geometria 2D. A Figura 51 apresenta o perfil 2D do elemento transdutor do sensor de corrosão. A geometria proposta consiste de uma fibra óptica monomodo com dois filmes finos metálicos depositados na face da fibra, seguido do meio externo.

Figura 51 – (a) Diagrama da modelagem computacional em 2D do elemento sensor com dupla camada metálica (b) Malha triangular aplicada na modelagem



Os parâmetros geométricos da fibra óptica usados na modelagem, mostrados na Figura 51(a), são: o comprimento da fibra $L=10\ \mu\text{m}$ e os diâmetros do núcleo e do revestimento da fibra $D_{core} = 8\ \mu\text{m}$ e $D_{clad} = 20\ \mu\text{m}$, respectivamente. Sem perda de generalidade, um diâmetro de revestimento de apenas $20\ \mu\text{m}$ é usado na modelagem para que o uso de memória RAM fosse otimizado, uma vez que o comprimento de penetração da onda no revestimento é menor que $20\ \mu\text{m}$ (LEUNG; SHANKAR; MUTHARASAN, 2007). A malha triangular aplicada na modelagem é ilustrada na Figura 51(b). A espessura do meio externo é $L_{ext} = 3\ \mu\text{m}$. Esse valor é suficiente para o COMSOL executar a modelagem corretamente. Sendo as espessuras do metal 1 e do metal 2, $D1= 10\ \text{nm}$ e $D2= 10\ \text{nm}$, respectivamente. A condição de limite de dispersão (*Scattering Boundary Condition*) é usada para evitar a reflexão da onda de saída do limite externo do seu domínio computacional. Em outras palavras, esta condição de contorno torna um limite transparente para as ondas de saída. A Tabela 1 fornece os parâmetros ópticos para os meios utilizados na modelagem do sensor de corrosão com dupla camada metálica mostrada na Figura 51, como o comprimento de onda, os índices de refração dos metais, meio externo e do núcleo e revestimento da fibra óptica.

Tabela 1 – Parâmetros ópticos usados na modelagem do COMSOL

Parâmetros Ópticos		
Comprimento de onda	λ	$1550\ \text{nm}$
Índice de refração do núcleo	n_{core}	1,4443
Índice de refração da casca	n_{clad}	1,4378
Índice de refração do Alumínio em $1550\ \text{nm}$	$n_{Al} - j\kappa_{Al}$	$1.3474 - j14.133\ \text{(A1)}$
Índice de refração do Titânio em $1550\ \text{nm}$	$n_{Ti} - j\kappa_{Ti}$	$3.4323 - j3.1162\ \text{(A2)}$
Índice de refração do Níquel em $1550\ \text{nm}$	$n_{Ni} - j\kappa_{Ni}$	$3.4418 - j6.7542\ \text{(A3)}$
Índice de refração do Cromo em $1550\ \text{nm}$	$n_{Cr} - j\kappa_{Cr}$	$3,6683 - j4,1800\ \text{(A4)}$
Índice de refração da Prata em $1550\ \text{nm}$	$n_{Ag} - j\kappa_{Ag}$	$0.14447 - j11.366\ \text{(A4)}$
Índice de refração do Cr-Etch $1550\ \text{nm}$	n_{ext}	1,498
Índice de refração Al-Etch $1550\ \text{nm}$	n_{ext}	1,384
Índice de refração Si Iso-Etch $1550\ \text{nm}$	n_{ext}	1,4989

Fonte: (A1)(MCPEAK et al., 2015); (A2)(PALM et al., 2018); (A3)(RAKIĆ et al., 1998); (A4)(JOHNSON; CHRISTY, 1974).

O processo de corrosão dos filmes finos metálicos na simulação computacional ocorrem da seguinte forma; é definido um passo de diminuição da espessura do filme metálico D1, a medida que a espessura vai diminuindo até chegar a zero e ficar apenas outro filme fino de espessura D2 o COMSOL registra o valor da Reflectância R, depois de forma idêntica é

registrado o valor da reflectância para cada passo de diminuição da espessura D2 do segundo filme metálico. Com os dados produzidos no COMSOL é possível obter resultados da variação da Reflectância em função da espessura dos metais, é possível ainda desde que, conhecidas as taxas de corrosão dos metais, obter resultados da variação da Reflectância em função do tempo de corrosão, e determinar, por exemplo, os tempos de resposta e vida útil do sensor.

3.4.3 Modelo Numérico com Rugosidade usando o COMSOL Multiphysics

Nesta seção, é apresentada uma modelagem para a corrosão dos elementos transdutores do sensor de corrosão, considerando a geração da rugosidade na superfície desses transdutores devido ao processo corrosivo. No geral, a rugosidade de superfície pode ser considerada como uma geometria irregular não-euclidiana (BARABÁSI; STANLEY et al., 1995). Sua estrutura pode apresentar aleatoriedade ou similaridade e, nesse sentido, a rugosidade de superfície pode ser tratada como uma geometria do tipo fractal (BARABÁSI; STANLEY et al., 1995). Essas formas geométricas são verificadas em muitos fenômenos químicos e físicos, como crescimento de película fina, erosão (LI et al., 2003) e corrosão (ALVAREZ et al., 2010). Na literatura são encontradas duas funções fractais clássicas que podem representar a rugosidade de superfície: fractal de Weierstrass e fractal de Weierstrass-Mandelbrot (BARABÁSI; STANLEY et al., 1995). Essas funções são representadas por séries infinitas de funções senoidais, que modelam a rugosidade de superfície por uma estrutura complexa periódica (BARABÁSI; STANLEY et al., 1995). No entanto, alguns trabalhos obtidos na literatura fazem uma abordagem mais simples para a rugosidade de superfície, através de uma função senoidal (ALVES et al., 2018). Essa função, denominada de função rugosidade, $R(d, s)$, está definida na Equação 3.31, e modela a dinâmica do processo de corrosão dos transdutores metálicos do sensor óptico, com base na criação de picos e vales sobre a superfície desses transdutores, como ilustrado na Figura 52.

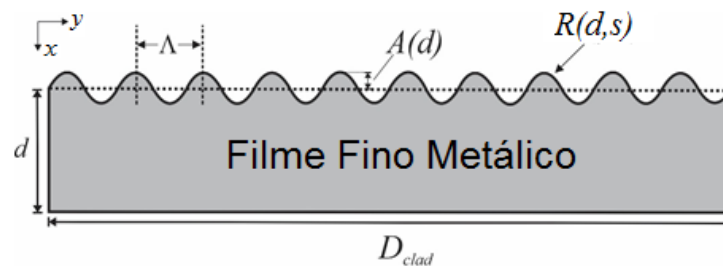
$$R(d, s) = A(d) \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} n_{ext} s\right) + d, \quad (3.31)$$

em que d é a espessura média dos filmes metálicos, que diminui ao longo do processo corrosivo; $A(d)$ é a amplitude da rugosidade, que é função de d ; Λ é a periodicidade da superfície rugosa; s é um parâmetro de varredura no intervalo $[0, D_{clad}]$, em que D_{clad} é o diâmetro da fibra óptica. O parâmetro n_{ext} é interpretado como um fator de escala e assume o valor do índice de refração do meio externo, como usado em (ALVES et al., 2018). Alguns parâmetros da função rugosidade

estão destacados na Figura 52.

A partir da metodologia proposta em (ALVES et al., 2018), os valores para $A(d)$ e Λ , da função $R(d, s)$, são definidos comparando-se os valores da intensidade do sinal óptico refletido obtidos pelo modelo computacional com os valores medidos experimentalmente, ao longo do processo de corrosão. Ou seja, se atribuem valores para esses parâmetros de tal forma que o resultado computacional se aproxime do resultado experimental (ALVES et al., 2018).

Figura 52 – Morfologia proposta para a rugosidade de superfície gerada nos filmes metálicos

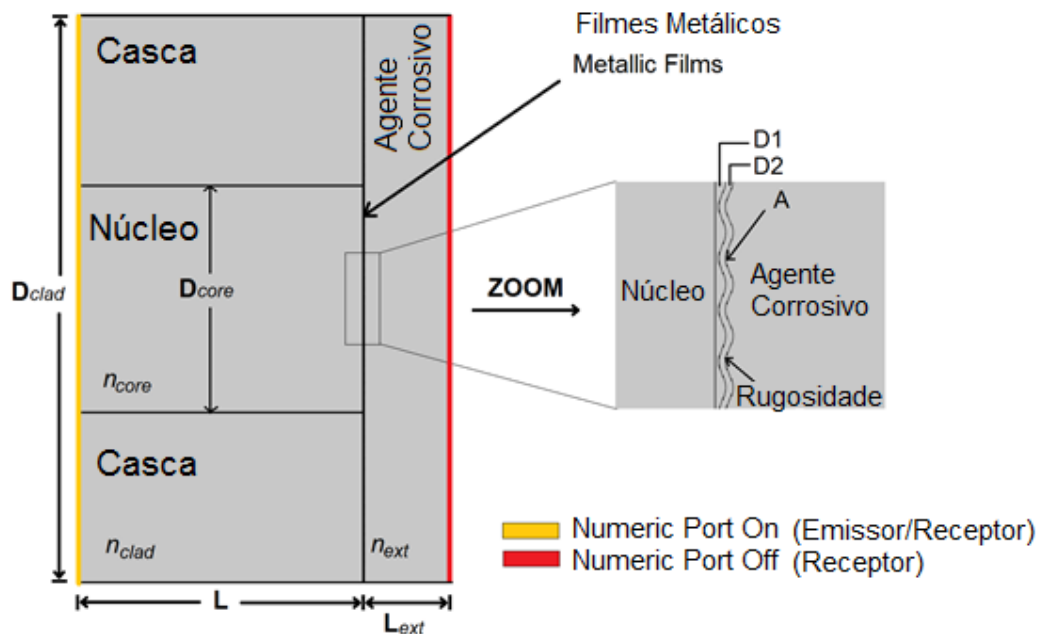


Fonte: Adaptado de BARABÁSI; STANLEY et al. (1995)

A modelagem computacional para o elemento sensor do sistema de detecção da corrosão, proposto neste trabalho, foi implementada no COMSOL. Para o estudo da propagação de ondas eletromagnéticas com frequências ópticas em guias de onda, foi usado o módulo *Wave Optics* (COMSOL, 2015a). A geometria 2D do modelo implementado é mostrada na Figura 53, que representa a seção longitudinal de uma fibra óptica monomodo com uma bicamada metálica sobre sua face clivada (extremidade direita). A camada do núcleo, da casca, do meio externo (agente corrosivo) e dos filmes metálicos, que definem a estrutura do modelo, estão destacadas na Figura 53. Através do zoom na região dos transdutores, pode-se notar a superfície rugosa dos filmes metálicos, modelada pela função rugosidade.

Definindo a extremidade esquerda da estrutura 2D como uma Numeric Port (COMSOL, 2015a), configurada como um emissor, um sinal óptico não-polarizado com comprimento de onda de 1550 nm é emitido por essa extremidade, estabelecendo o modo de propagação fundamental no núcleo da estrutura de fibra óptica da Figura 53. A medida para o sinal óptico refletido também é realizada pela Numeric Port da extremidade esquerda, configurada como um detector. Essa medida é obtida a partir do parâmetro de espalhamento S_{11} (COMSOL, 2015a). Esse parâmetro corresponde ao coeficiente de reflexão (COMSOL, 2015a), de modo que a reflectância R é dada por $R = ||S_{11}||^2$.

Figura 53 – Diagrama da modelagem computacional em 2D do elemento sensor com dupla camada metálica



Fonte: o autor, 2022

A Tabela 1 fornece os valores para os parâmetros ópticos e geométricos usados na modelagem computacional. Para a camada da casca, com largura D_{clad} , foi usado o valor reduzido de $20 \mu\text{m}$, para reduzir o uso de memória RAM para resolver o modelo numérico. Não há perda de generalidade com essa aproximação, pois o comprimento de penetração da luz na casca para o comprimento de onda de 1550 nm é inferior a esse valor (LEUNG; SHANKAR; MUTHARASAN, 2007). O comprimento de onda da luz em 1550 nm foi escolhido porque é o de menor perda de propagação em fibra óptica e o de maior disponibilidade de dispositivos emissores, receptores e acopladores em fibra óptica, facilitando a construção de sistemas sensores (HADJIFOTIOU; MCFARLANE, 1993). Para a discretização da geometria 2D da Figura 53, para uso do MEF, se fez uso de uma malha triangular com tamanho de elemento finito dado por $\lambda/200$, para as camadas dos filmes finos metálicos. Para a camada do núcleo, da casca e do meio externo, se fez uso de uma malha triangular com tamanho de $\lambda/30$, em que λ é o comprimento de onda do sinal óptico. Esses tamanhos de elementos finitos estão de acordo com as condições sugeridas em (COMSOL, 2015a), para solução do problema de propagação de ondas eletromagnéticas com frequência ópticas em guias de onda.

3.5 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO À FIBRA ÓPTICA HETERONÚCLEO

Esta seção apresenta uma abordagem teórica para o efeito de interferometria dos modos de propagação numa estrutura heteronúcleo para corroborar com a análise dos resultados experimentais. A Figura 48(d) mostra o diagrama esquemático da estrutura heteronúcleo MNM. Quando a luz incidente se propaga ao longo da direção axial na fibra NCF, o meio externo com menor índice de refração pode ser considerado como uma camada de revestimento para facilitar a reflexão interna total da propagação da luz (HUANG et al., 2013), o feixe de luz propagado na MMF pode excitar parcialmente o modo de guiamento da NCF, que é um guia de ondas multimodo que suporta vários modos (>3) (HUANG et al., 2013). A luz do modo de guiamento pode se propagar através da NCF e continuar se propagando diretamente para a próxima fibra MMF emendada. Este mecanismo de operação é chamado de filtro de interferência multimodo (MMI) (ANTONIO-LOPEZ et al., 2010). O padrão de interferência entre os modos de propagação é detectado pela medição do espectro de transmissão do sensor. A frequência normalizada que é diretamente proporcional ao raio da NCF é definida como (MOHAMMED; MEHTA; JOHNSON, 2004):

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3.32)$$

em que a é o raio da NCF, λ é o comprimento de onda, n_1 e n_2 representam o IR da NCF e do meio externo, respectivamente. Podemos obter os números de onda transversais normalizados dos modos LP_{0m} na NCF (ZHENG et al., 2013; OKAMOTO, 2006; MIYAGI; NISHIDA, 1979; XU et al., 2017):

$$u_{0m} \approx \mu_{0m} \left[1 - \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1^2 V} + \frac{1}{8} \left(\frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1^2 V} \right)^2 \right], \quad (3.33)$$

$$w_{0m} = \sqrt{V^2 - u_{0m}^2}, \quad (3.34)$$

em que μ_{0m} é a raiz de ordem m da função de Bessel J_0 .

A eficiência de acoplamento de potência representa o acoplamento de energia do campo de excitação para os diferentes modos suportados pelo fibra NCF. É a relação de potência do modo de alta ordem e do campo excitante. A expressão é (MOHAMMED; MEHTA; JOHNSON,

2004):

$$\eta_{0m} = \frac{2 \left(\frac{w_s}{a} \right)^2 \exp \left[- \left(\frac{w_s}{a} \right)^2 \left(\frac{u_{0m}^2}{2} \right) \right]}{J_0^2(u_{0m}) + J_1^2(u_{0m}) + \left(\frac{J_0(u_{0m})}{K_0(w_{0m})} \right)^2 (K_1^2(w_{0m}) - K_0^2(w_{0m}))}, \quad (3.35)$$

em que K_0 e K_1 são funções de Bessel modificada de segunda espécie. E w_s é o parâmetro de largura do feixe gaussiano e, no caso de fibras de índice degrau, pode ser aproximado por (MARCUSE, 1977):

$$w_s = a_{MMF} \left[\left(\frac{2}{V_{MMF}} \right)^{1/2} + 0.23 V_{MMF}^{-3/2} + 18.01 V_{MMF}^{-6} \right], \quad (3.36)$$

em que a_{MMF} é o raio do núcleo da fibra MMF e V_{MMF} é a frequência normalizada da fibra MMF, dado por:

$$V_{MMF} = \frac{2\pi}{\lambda} a_{MMF} \sqrt{n_{MMF_{Core}}^2 - n_{MMF_{Clad}}^2}, \quad (3.37)$$

em que $n_{MMF_{Core}}$ e $n_{MMF_{Clad}}$ são os índices de refração do núcleo e da casca da fibra MMF, respectivamente.

Considerando que as fibras MMF de entrada e saída possuem os mesmos parâmetros, a transmitância no comprimento de onda λ pode ser expressa por (MOHAMMED; MEHTA; JOHNSON, 2004; XU et al., 2017; WANG; FARRELL; YAN, 2008; MOHAMMED; SMITH; GU, 2006):

$$T_L(\lambda) = 10 \log_{10} \left| \sum_m \eta_{0m} \exp(j\beta_{0m}L) \right|^2, \quad (3.38)$$

em que L é o comprimento da NCF, β_{0m} é a constante de propagação do modo LP_{0m} dada pela expressão (XU et al., 2017):

$$\beta_{0m} = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \frac{\mu_{0m}^2}{a^2} \left[1 - \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1^2 V} + \frac{1}{8} \left(\frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1^2 V} \right)^2 \right]^2}. \quad (3.39)$$

Na Equação 3.38, cada termo do somatório representa a contribuição dos diversos modos de propagação para a transmitância do sinal óptico. Explicitamente, a equação 3.38 depende do comprimento L da região com heteronúcleo (comprimento da NCF) e, implicitamente, como destacado nas Equações 3.33 e 3.39, depende do índice de refração do meio externo (n_2). De modo geral, a interferência entre os modos de propagação excitados na NCF pode ser analisada através do somatório de termos com diferentes constantes de propagação na exponencial complexa descrita na Equação 3.38. Da relação de Euler, esse somatório equivale a somar senóides com fases distintas, podendo gerar padrões de interferência construtiva ou destrutiva.

Considerando que a distância entre as regiões sensoras de comprimentos $L1$ e $L2$, na Figura 49, é longa o suficiente para eliminar a interferência de modo entre as duas regiões, a transmissão do sensor $T(\lambda)$ no comprimento de onda λ pode ser descrita como a soma das transmissões $T_{L1}(\lambda)$ e $T_{L2}(\lambda)$ referentes ao Sensor I e Sensor II, respectivamente:

$$T(\lambda) = T_{L1}(\lambda) + T_{L2}(\lambda). \quad (3.40)$$

Nessa modelagem, a fibra MMF tem os seguintes parâmetros: o diâmetro do núcleo e da casca é 62,5 e 125 μm , respectivamente. A NCF é selecionada como a fibra multimodo que é feita de sílica pura. A dispersão é obtida pela equação de Sellmeier (BURKHARD; DINGES; KUPHAL, 1982). Consideramos que a fibra NCF é feita de sílica pura e o diâmetro total é de 125 μm . O coeficiente termo-óptico dn/dT e o coeficiente de expansão térmica α da sílica fundida é $1,06 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (KIM; PAEK; LEE, 2002) e $5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (HUANG; BLAKE; KIM, 1990), respectivamente. A temperatura ambiente T_0 é definida como 20°C . A fim de garantir a precisão do cálculo, selecionamos o número de modos $m = 150$.

4 SENSOR DE CORROSÃO À FIBRA ÓPTICA COM DUPLA CAMADA METÁLICA

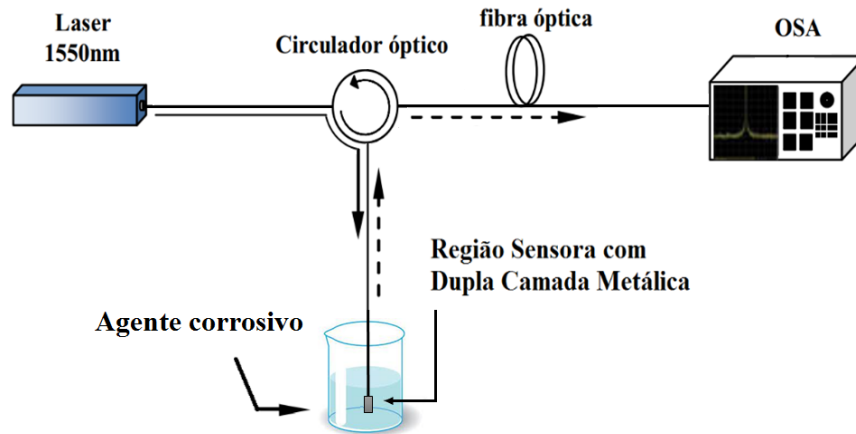
Este Capítulo apresenta um conjunto de atividades sistemáticas com as amostras de fibra óptica com dupla camada metálica na face final da fibra, empregadas na construção de um sensor de corrosão, proposto nesta Tese de Doutorado. A Seção 4.1 apresenta detalhes da montagem experimental usada para o sistema de detecção da corrosão. A Seção 4.2 mostra o primeiro conjunto de resultados das modelagens analítica que faz uso das equações de Fresnel e numéricas usando o COMSOL *Multiphysics* para a caracterização do sensor de corrosão a partir da investigação da influência dos parâmetros do elemento sensor como espessuras e o posicionamento dos filmes finos na fibra, para o desenvolvimento de cabeças sensoras e análise da corrosão na dupla camada metálica na face final da fibra. Por fim, a Seção 4.3 exibe um conjunto de resultados experimentais do sensor óptico de corrosão com dupla camada metálica na face final da fibra.

4.1 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

A montagem experimental do sensor óptico de corrosão utilizada neste trabalho consiste em uma região sensora conectada a um laser e um analisador de espectro óptico (OSA) através de um circulador óptico, como ilustra a Figura 54. O circulador óptico direciona a luz do laser para a região sensora e direciona a luz refletida pela região sensora ao OSA. Os dados do OSA são enviados para um computador para análise dos dados e determinação da taxa de corrosão dos metais. O laser opera no comprimento de onda de 1550 nm com potência de 10 mW. O circulador e a fibra óptica são dispositivos padrões utilizados na indústria de telecomunicações. A investigação experimental do processo corrosivo do sistema de dupla camada metálica também pode ser feita utilizando o OTDR, semelhante ao sistema proposto por Martins Filho e colaboradores (MARTINS-FILHO et al., 2007).

As Bicamadas Ti(10 nm)/Al(10 nm) e Ni(5 nm)/Al(5 nm) foram depositados para formação da região sensora. No Ti/Al, o Ti é o metal 1 (mais interno, próximo à fibra) e o Al é o metal 2 (mais externo). No Ni/Al, o Ni é o metal 1 e o Al é o metal 2. A convenção de Metal 1/Metal 2 foi apresentada na Figura 47. Os filmes foram depositados por *DC magnetron sputtering system* no topo de fibras ópticas após processo de limpeza e clivagem. A pressão de base foi de $2,2 \times 10^{-7}$ Torr.

Figura 54 – Esquema experimental para do sensor de corrosão com dupla camada metálica



Fonte: o autor, 2022

Esses metais foram escolhidos devido à grande aplicabilidade na indústria e pela diferença significativa da taxa de corrosão nos agentes corrosivos utilizados. Além disso, a posição e espessura utilizada para os metais são muito importantes para permitir a observação da variação na intensidade da luz refletida, devido ao processo de corrosão nos filmes metálicos desde o início da corrosão. Para os experimentos de corrosão em laboratório, foram utilizados o agente corrosivo Al-etch ($25 \text{ H}_2\text{PO}_4 : 1 \text{ HNO}_3 : 5 \text{ CH}_3\text{COOH}$), com taxas de corrosão esperadas de 50 nm/min e 2,5 nm/min, para os metais Al e Ni (MARTINS-FILHO et al., 2007; WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003), respectivamente, e o agente corrosivo Si Iso etch ($126 \text{ HNO}_3 : 60 \text{ H}_2\text{O} : 5 \text{ NH}_4\text{F}$), com taxa de corrosão esperada de 60 nm/min e 300 nm/min, para os metais Al e Ti (MARTINS-FILHO et al., 2007; WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003), respectivamente. A configuração da bicamada foi projetada a partir da investigação da influência dos parâmetros do elemento sensor como espessuras e o posicionamento dos metais na bicamada, esse estudo será apresentado na Seção 4.2.

4.2 RESULTADOS DA MODELAGEM DA CORROSÃO DO ELEMENTO TRANSDUTOR DO SENSOR ÓPTICO COM DUPLA CAMADA METÁLICA

Nesta seção, são apresentados resultados obtidos a partir da investigação da influência dos parâmetros do elemento sensor como espessuras e o posicionamento dos filmes finos na fibra, para o desenvolvimento de cabeças sensoras e análise da corrosão utilizando estruturas de dupla camada metálica de filmes finos na face final da fibra óptica, modeladas no Capítulo 3. Os metais utilizados nas simulações foram apresentados na Tabela 1. A bicamada metá-

lica, como região sensora, pode aumentar a faixa de detecção comparada com estruturas de monocamadas. Quando um feixe de luz encontra um material, a radiação pode ser absorvida ou refletida pela superfície. Quando a radiação eletromagnética atinge a superfície metálica, a intensidade da luz incidente diminui exponencialmente enquanto ela percorre o metal, levando a uma luz transmitida de menor intensidade. A diminuição da intensidade da luz está relacionada à espessura do metal, ao comprimento de onda incidente e ao coeficiente de extinção. Além disso, a mudança na intensidade da luz está relacionada à profundidade de penetração, que é a distância necessária para que a intensidade da luz seja diminuída para 37% do seu valor inicial (STENZEL et al., 2015). Portanto, as espessuras e o posicionamento dos filmes metálicos na composição da estrutura podem influenciar na faixa dinâmica de detecção. O filme metálico com características de baixa refletividade deve ser posicionado como o metal mais interno (junto à fibra), assim, a luz transmitida pode atingir a segunda camada metálica (metal mais externo). Dessa forma, é possível inferir sobre o processo de corrosão.

Os resultados foram obtidos a partir de simulações de um processo corrosivo uniforme, sendo utilizados como agente corrosivo as soluções Al-etch cuja composição química é ($25\text{H}_2\text{PO}_4$: 1HNO_3 : $5\text{CH}_3\text{COOH}$), este agente corrosivo é utilizado no processo de fabricação de microdispositivos. As áreas comuns de uso do Al-etch são para fabricação de dispositivos em que o ácido nítrico (HNO_3) serve para acelerar a oxidação do alumínio e gera o óxido de alumínio (Al_2O_3). O ácido fosfórico (H_3PO_4) serve para dissolver o Al_2O_3 , já o ácido acético (CH_3COOH) tem a função de estabilizar o potencial de hidrogênio iônico (pH) ácido da solução para definir a taxa de corrosão em uma determinada temperatura (WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003; KÖHLER, 2008; WALKER; TARN, 1990).

Outro agente corrosivo é o Cr-etcher (CR-7) de composição ($9\%(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6 + 6\%\text{HClO}_4 + \text{H}_2\text{O}$). Os agentes corrosivos de cromo são tipicamente misturas de ácido perclórico (HClO_4) e nitrato de amônio cérico ($(\text{NH}_4)_2[\text{Ce}(\text{NO}_3)_6]$). O ácido perclórico é um ácido muito forte e, portanto, quase completamente dissociado em soluções aquosas, e serve para estabilizar quimicamente o nitrato de amônio cérico. O próprio $(\text{NH}_4)_2[\text{Ce}(\text{NO}_3)_6]$ é um oxidante muito forte. O Cr etcher é usado em processos químicos de remoção de camadas finas de Cr e também de metais como Au, Pt, Cu, Ni, Ta e Ti. É bastante utilizado no processo de fabricação de semicondutores ou tecnologia de microsistemas (WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003). Por fim, o Isotropic Silicon Etchant ou Si Iso etch cuja composição química é (126HNO_3 : $60\text{H}_2\text{O}$: $5\text{NH}_4\text{F}$) Este agente corrosivo destina-se ao condicionamento isotrópico de silício, tanto policristalino quanto monocristalino. A corrosão com o Si Iso Etch também é

usada em metais como grafite, vanádio, nióbio e titânio em taxas moderadas a muito altas. O ácido nítrico (HNO_3) é um poderoso agente oxidante. O metal é oxidado para formar um filme de óxido resistente. A adição de fluoreto de amônio (NH_4F) à solução faz com que alguns desses óxidos metálicos sejam atacados (WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003; SCHWARTZ; ROBBINS, 1976).

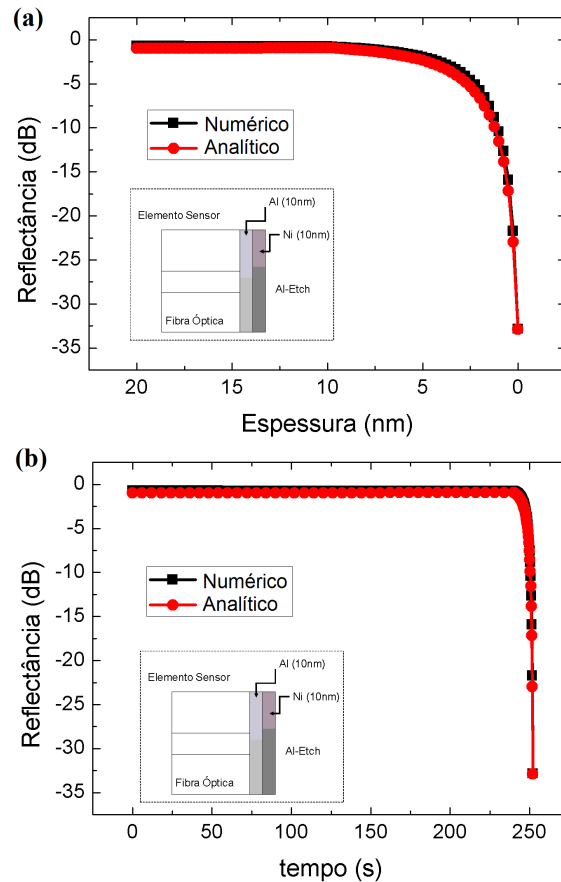
A Figura 55 mostra o comparativo entre os resultados do método numérico obtida através da modelagem realizada no COMSOL, e o método analítico a partir do formalismo das equações de Fresnel para o modelo físico de corrosão laminar, descritos para esse problema no Capítulo 3 que é implementado no Matlab. Observamos a variação da reflectância quando o elemento transdutor está exposto ao agente corrosivo Al-etch, para a corrosão da bicamada metálica de alumínio (Al) e níquel (Ni), ambos com espessuras iguais a 10 nm. É possível observar que há conformidade entre o resultado analítico e o numérico. Portanto, a comparação dos resultados numéricos obtidos através do COMSOL, com os resultados analíticos, comprova a eficiência do modelo numérico na resolução do problema e descarta a possibilidade de o modelo apresentar resultados não físicos.

Os resultados da modelagem mostram curvas para corrosão da bicamada metálica de Al/Ni. Na Figura 55(a) são mostradas as curvas de variação da reflectância em função da espessura da bicamada Al(10 nm)/Ni(10 nm) do sistema sensor de corrosão quando submetido ao agente corrosivo Al-etch e a Figura 55(b) mostra as curvas de variação da reflectância em função do tempo de exposição da bicamada Al(10 nm)/Ni(10 nm) quando submetido ao agente corrosivo Al-etch. Já os resultados da modelagem ilustrados nas Figuras 56 mostram curvas para corrosão da bicamada metálica de Ni/Al, nesses resultados, há uma inversão no posicionamento dos metais em relação a configuração utilizada para obter os resultados ilustrados nas Figuras 55(a) e (b).

A Figura 56(a) mostra as curvas de variação da reflectância em função da espessura da bicamada Ni(10 nm)/Al(10 nm) já a Figura 56(b) mostra as curvas de variação da reflectância em função do tempo de exposição da bicamada Ni(10 nm)/Al(10 nm) quando submetido ao agente corrosivo Al-etch. Nas simulações, as taxas de corrosão utilizadas para o Ni e Al, sob a ação do Al-etch, são 2,5 nm/min e 50 nm/min, respectivamente.

A Figura 56(c) ilustra a distribuição de potência óptica obtida com a simulação no COMSOL, para a estrutura da Figura 51(a), com dupla camada metálica, neste caso, de Ni e Al com 10 nm de espessura cada metal. O comprimento de onda da luz era 1550 nm. No ponto P1, pode-se observar que uma pequena parte da onda eletromagnética incidente no metal está

Figura 55 – Reflectância (a) em função da espessura da bicamada Al(10nm)/Ni(10nm) (b) em função do tempo de corrosão da bicamada Al(10nm)/Ni(10nm)

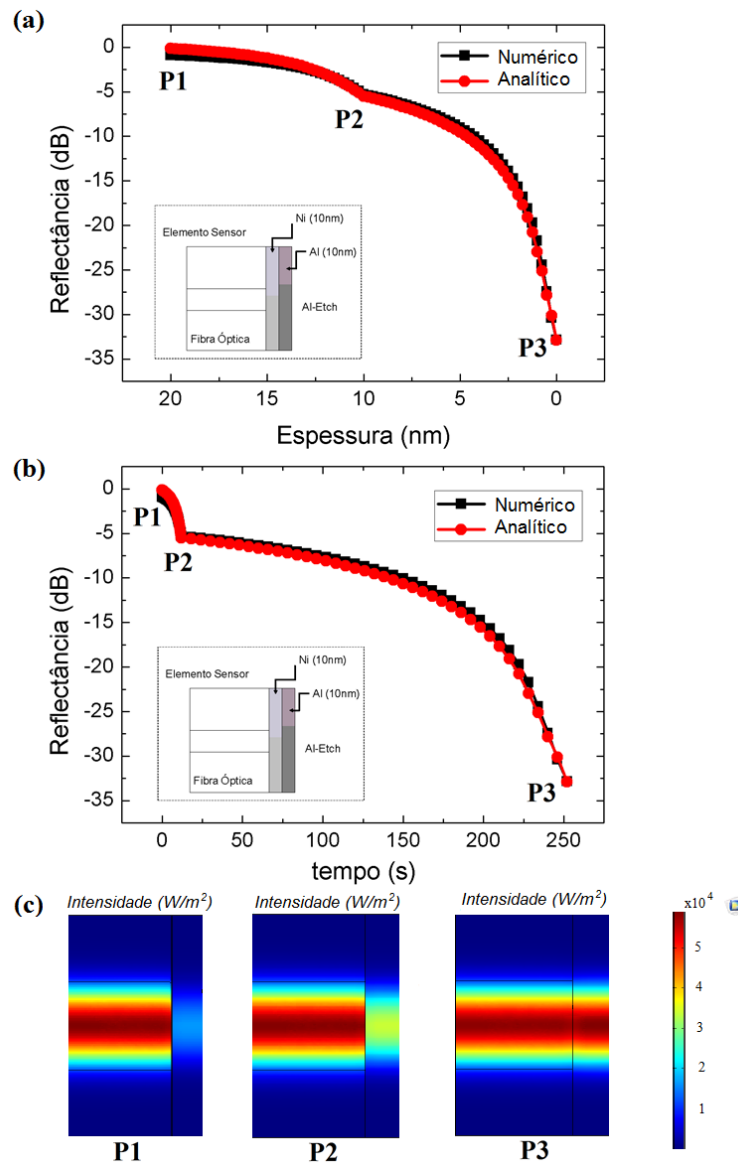


Fonte: o autor, 2022

sendo transmitida para o meio externo, nessa situação, a bicamada metálica possui a espessura máxima de 20 nm. O ponto P2 está relacionado a reflectância medida para uma espessura de 10 nm, com a distribuição de potência observada na configuração, que passa a apresentar uma intensidade maior para potência transmitida, dessa forma há uma diminuição na potência refletida, que produz uma diminuição da reflectância. O ponto P3 está relacionado com a reflectância medida para a situação em que não há mais a bicamada metálica, ou seja, para o momento em que a corrosão ocorreu por completo, assim a distribuição de potência observada apresenta a máxima intensidade para potência transmitida e mínima potência refletida.

A partir dos resultados mostrados nas Figuras 55 e 56, é possível observar a influência de parâmetros do elemento sensor como espessuras, e o posicionamento dos filmes finos na formação da bicamada metálica, para o desenvolvimento do elemento sensor e análise da corrosão utilizando a estrutura com dupla camada metálica na face final da fibra óptica. Na Figura 55 é observado que a reflectância para a configuração Al/Ni apresenta comportamentos distintos durante a corrosão desses dois metais em comparação com a configuração Ni/Al,

Figura 56 – Reflectância (a) em função da espessura da bicamada Ni(10nm)/Al(10nm) (b) em função do tempo de corrosão da bicamada Ni(10nm)/Al(10nm) na solução do Al-Etch e (c) distribuição de potência óptica



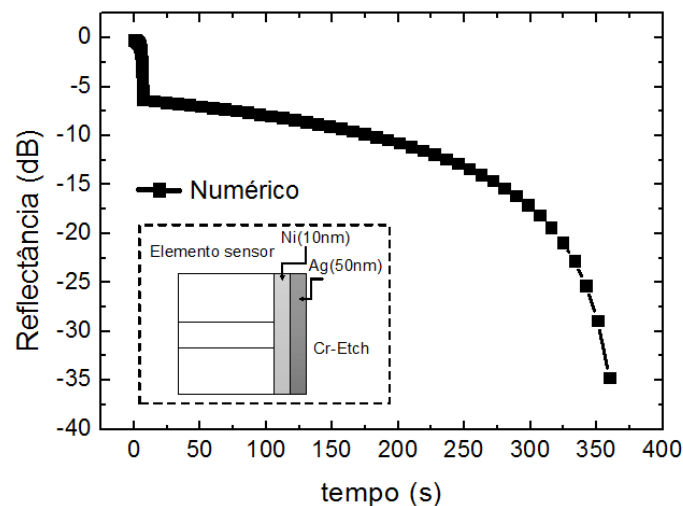
Fonte: o autor, 2022

ilustrada na Figura 56. Observamos que a configuração da bicamada Al/Ni com o Ni sendo metal mais externo da estrutura apresenta um desempenho em que na maior parte do tempo o sensor não apresenta variação da reflectância durante o processo corrosivo. Enquanto que a curva da reflectância para a bicamada Ni/Al apresenta uma variação no sinal óptico desde o início do processo corrosivo. Isso fornece evidência de que o posicionamento dos metais para construção da estrutura da bicamada metálica é de fundamental importância para o melhor desempenho do sensor.

A Figura 57 mostra a simulação do processo corrosivo devido a exposição do sistema

sensor ao agente corrosivo Cr-etch (CR-7). Nesta simulação foram utilizados os metais Ni e Ag na região sensora. Com os resultados obtidos é possível avaliar a influência das espessuras e do posicionamento dos filmes finos na fibra para o desenvolvimento da estrutura com dupla camada metálica de Ag e Ni na face final da fibra óptica.

Figura 57 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ni(10nm)/ Ag(50nm) no Cr-etch

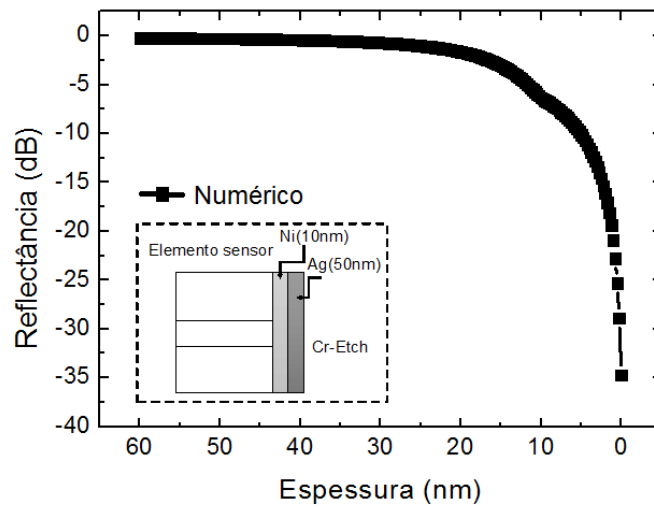


Fonte: o autor, 2022

O Cr-etch é utilizado no processo de corrosão para as configurações da dupla camada metálica com taxas de corrosão para Ni e Ag de 1,7 nm/min e 450 nm/min, respectivamente (WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003). Na tentativa de determinar a melhor espessura e posicionamento para os metais é possível ser observado, na Figura 57, que a reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ni(10nm)/Ag(50nm) apresenta comportamentos distintos durante a corrosão desses dois metais.

Na Figura 58, é observada a reflectância em função da espessura da bicamada com configuração Ni(10nm)/Ag(50nm) com a Ag sendo o metal mais externo, é possível observar que a espessura 50 nm da Ag não apresenta ganho a respeito da análise do processo corrosivo, pois na maior parte do processo corrosivo da Ag não há variação da reflectância, assim, uma espessura menor de aproximadamente 10 nm para a Ag otimizaria o desempenho do dispositivo para esta configuração. Nas Figuras 59 e 60, são apresentadas as curvas de reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ag(50nm)/Ni(10nm) e de reflectância em função da espessura para a bicamada Ag(50nm)/Ni(10nm), respectivamente. Nessa configuração, o Ni é o metal mais externo. Podemos observar que esta estrutura Ag/Ni apresenta um desempenho

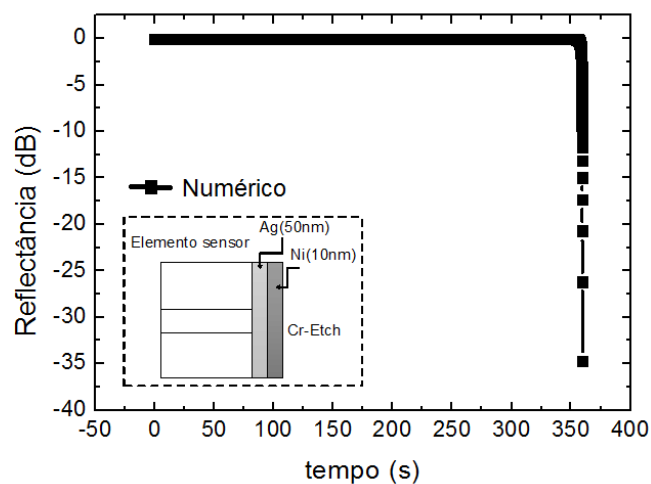
Figura 58 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ni(10nm)/Ag(50nm) no Cr-etch



Fonte: o autor, 2022

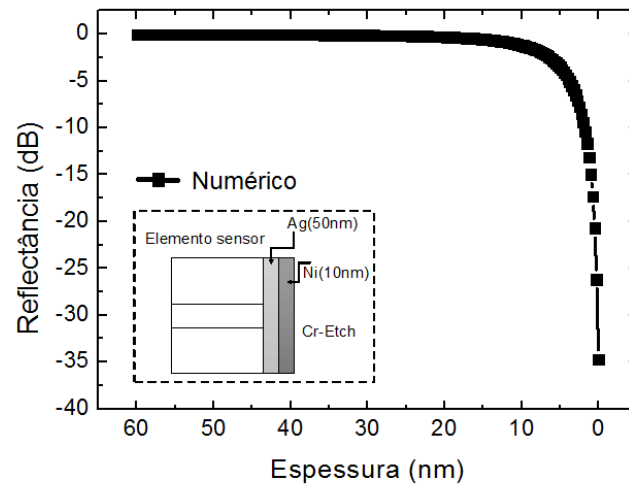
em que na maior parte do tempo durante o processo corrosivo não há variação da reflectância, a partir destes resultados, notamos que o posicionamento dos metais na formação da bicamada metálica, provoca um desempenho de menor sensibilidade para o elemento sensor. Apesar da diferença entre as taxas de corrosão dos metais envolvidos, nas configurações apresentadas nas Figuras 59 e 60, não é possível diferenciar nas curvas o instante em que a corrosão atinge o segundo metal, pois a corrosão ocorre nos primeiros 50 nm, aproximadamente, da bicamada metálica (que inclui o Ni com 10 nm de espessura) sem que haja alteração significativa na reflectância.

Figura 59 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ag(50nm)/ Ni(10nm) no Cr-etch



Fonte: o autor, 2022

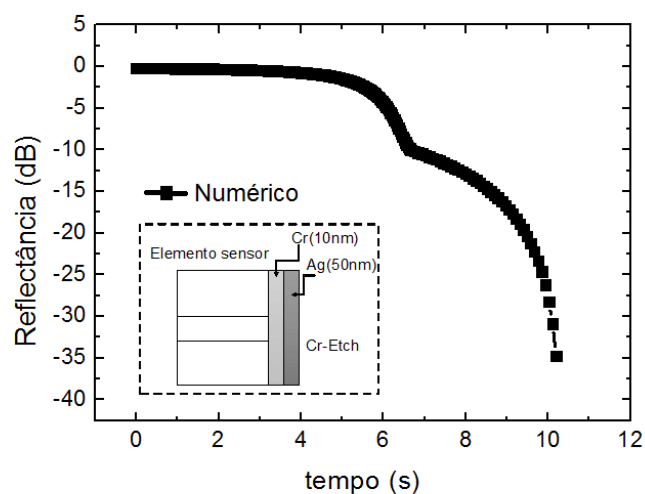
Figura 60 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ag(50nm)/Ni(10nm) no Cr-etch



Fonte: o autor, 2022

O resultado apresentado na Figura 61 mostra a resposta do sensor para uma nova configuração da dupla camada metálica, agora usando o Cromo (Cr) e Prata (Ag). É possível determinar a taxa de corrosão da Ag, após identificar o fim de sua corrosão e o início da corrosão do Cr. Assim, a taxa do Cr é definida no fim de sua corrosão, que é conhecida quando a reflectância mínima é atingida, para a simulação a taxa de corrosão do Cr sob a ação da solução corrosiva Cr-etch é de 170 nm/min (WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003).

Figura 61 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Cr(10nm)/ Ag(50nm) no Cr-etch

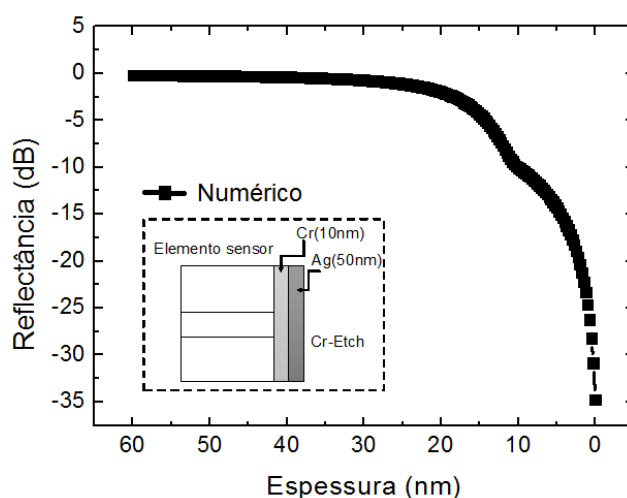


Fonte: o autor, 2022

Na Figura 61, é mostrada a reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Cr(10nm)/Ag(50nm) exposto ao agente corrosivo Cr-etch, é possível observar durante a

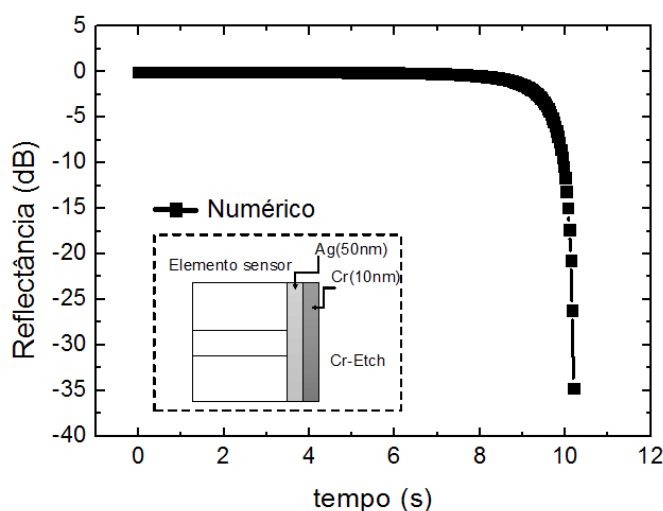
corrosão desses dois metais o momento de transição de um metal para o outro quando a Ag é o metal mais externo. A Figura 62 mostra a curva de reflectância em função da espessura para a bicamada Cr(10nm)/Ag(50nm). Na Figura 63, é apresentada a curva de reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ag(50nm)/Cr(10nm), nessa configuração o Cr é o metal mais externo da estrutura. Na Figura 64, é apresentada a curva de reflectância em função da espessura para a bicamada metálica Ag(50nm)/Cr(10nm).

Figura 62 – Reflectância em função da espessura da bicamada Cr(10nm)/Ag(50nm) no Cr-etch



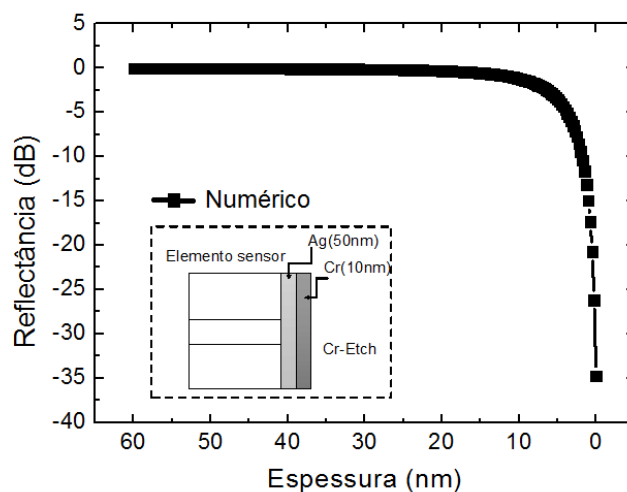
Fonte: o autor, 2022

Figura 63 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ag(50nm)/ Cr(10nm) no Cr-etch



Fonte: o autor, 2022

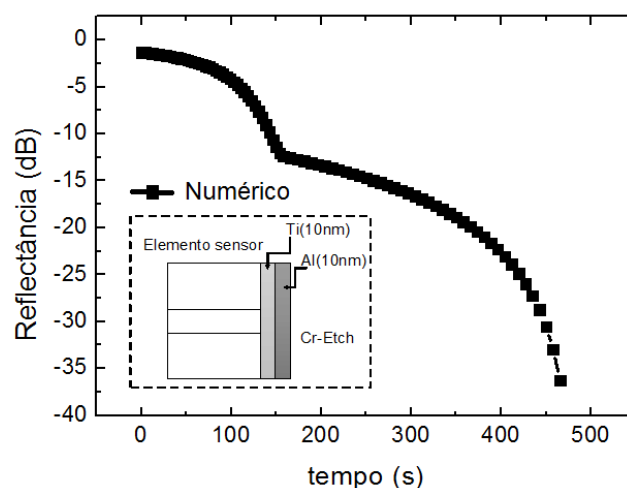
Figura 64 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ag(50nm)/Cr(10nm) no Cr-etch



Fonte: o autor, 2022

A Figura 65 mostra um novo estudo para a configuração da dupla camada metálica na face da fibra óptica, o titânio (Ti) está depositado na ponta da fibra e o alumínio (Al) depositado sobre o Ti. Nessa configuração, a observação do término da corrosão do Al e o começo da corrosão do Ti também é percebida, possibilitando a investigação do processo de corrosão dos metais individualmente quando exposto ao agente corrosivo Cr-etch.

Figura 65 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Ti(10nm)/ Al(10nm) no Cr-etch

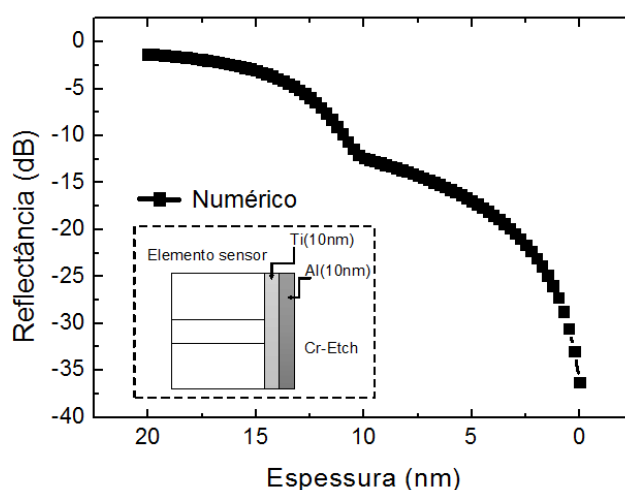


Fonte: o autor, 2022

Na Figura 65, é mostrada a variação da reflectância em função do tempo de exposição da região sensora ao agente corrosivo, sendo Ti e Al com espessuras de 10 nm cada metal. Na Figura 66 as espessuras do Ti e Al são 10 e 10 nm, respectivamente. Nas Figuras 67 e

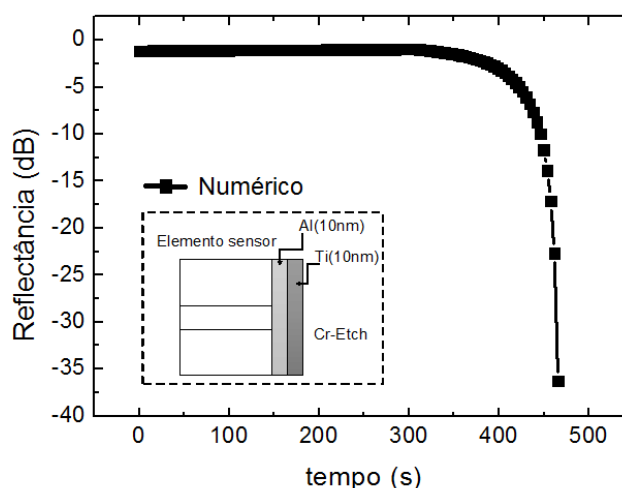
68, são apresentadas as curvas de reflectância medidos na configuração da bicamada metálica Al(10nm)/Ti(10nm). Na Figura 67, é mostrada a variação da reflectância em função do tempo de exposição da bicamada metálica ao agente corrosivo. Na Figura 68, é apresentada a curva de reflectância em função da espessura para a bicamada Al/Ti, com o Ti na região mais externa. Os resultados mostram o comportamento espectral do processo corrosivo de cada metal, de forma que, a configuração com Ti/Al com o Al sendo o metal mais externo da bicamada metálica apresenta o melhor resultado, pois é possível identificar, através da variação da reflectância, o processo corrosivo desde o início da corrosão da bicamada.

Figura 66 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ti(10nm)/Al(10nm) no Cr-etch



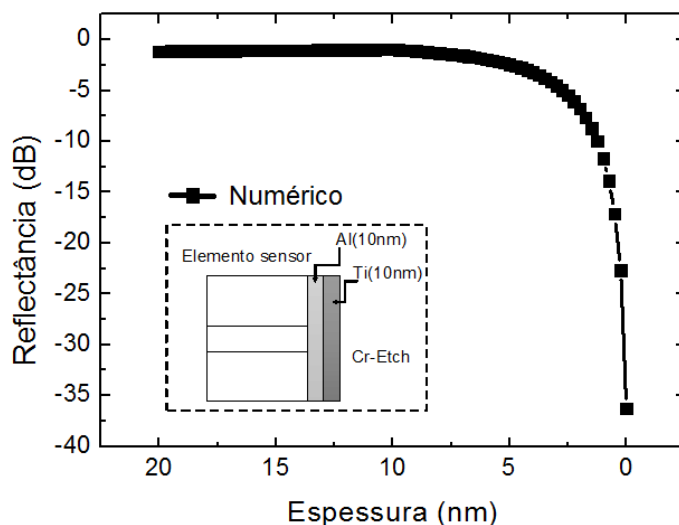
Fonte: o autor, 2022

Figura 67 – Reflectância em função do tempo de corrosão para a configuração Al(10nm)/ Ti(10nm) no Cr-etch



Fonte: o autor, 2022

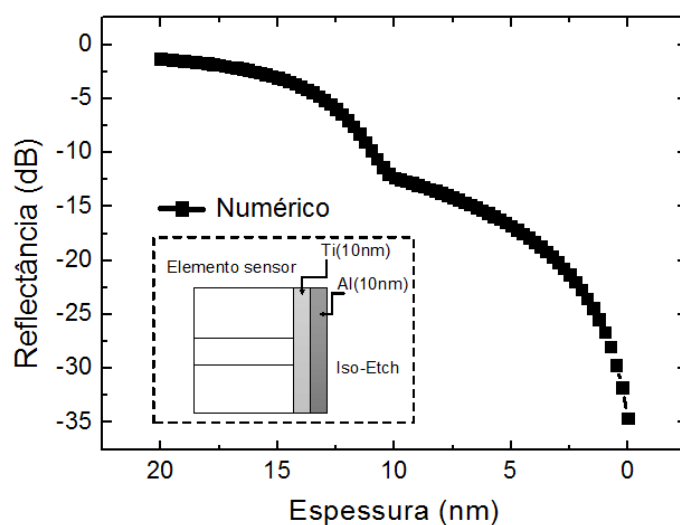
Figura 68 – Reflectância em função da espessura da bicamada Al(10nm)/Ti(10nm) no Cr-etch



Fonte: o autor, 2022

A Figura 69 mostra um estudo para a configuração da dupla camada metálica Ti/Al na face final da fibra óptica, nesta estrutura o Ti está depositado na ponta da fibra e o Al é o metal mais externo, depositado sobre o Ti. O Si Iso-Etch é o agente corrosivo utilizado no processo de corrosão da dupla camada metálica, na tentativa de otimizar o processo acelerado da corrosão em laboratório.

Figura 69 – Reflectância em função da espessura da bicamada Ti(10nm)/Al(10nm) no Si Iso-etch

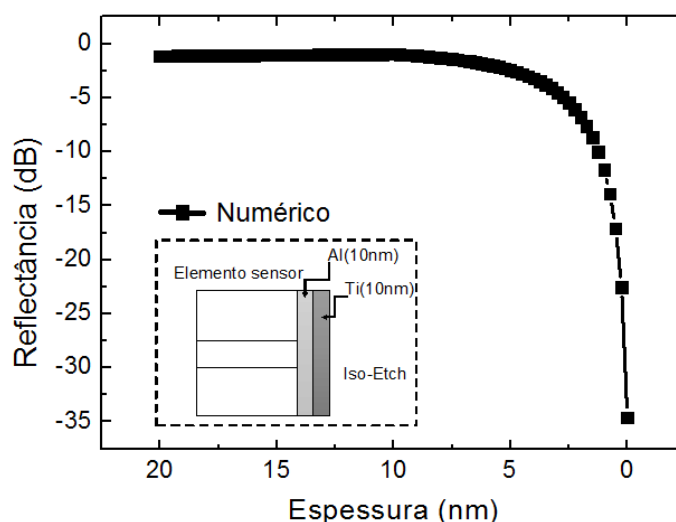


Fonte: o autor, 2022

Nessa estrutura, a observação do término da corrosão do Al e o começo da corrosão do

Ti também é percebida, sendo assim é possível analisar o processo de corrosão dos metais isoladamente. É possível observar que a reflectância em função da espessura da bicamada metálica com a configuração Ti(10nm)/Al(10nm) apresenta comportamentos distintos durante a corrosão desses dois metais. É possível diferenciar claramente nas curvas o instante em que a corrosão atinge o segundo metal, devido aos diferentes níveis de reflectância no momento de transição de um metal para o outro, que ocorre quando o metal mais externo (alumínio) é corroído completamente e a corrosão do Ti iniciada. Na Figura 70, é apresentada a reflectância em função da espessura da bicamada com configuração Al(10nm)/Ti(10nm) com a Al sendo o metal mais externo.

Figura 70 – Reflectância em função da espessura da bicamada Al(10nm)/Ti(10nm) no Si Iso-etch



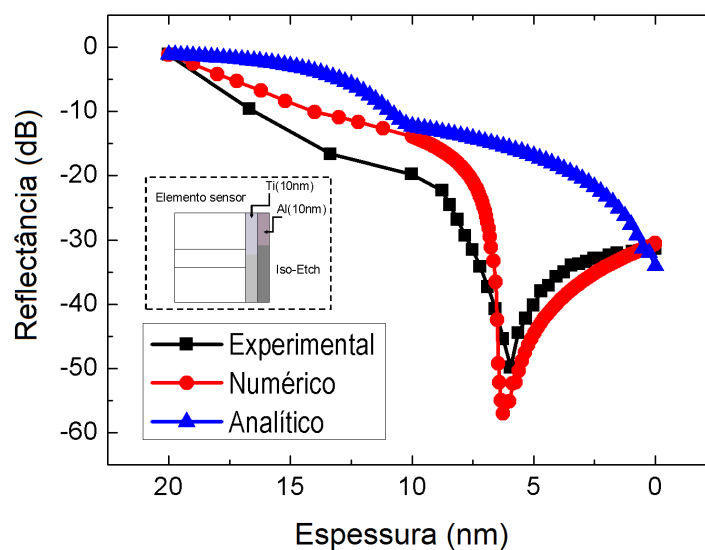
Fonte: o autor, 2022

Na tentativa de determinar a melhor espessura e posicionamento para os metais, os resultados mostraram, através do comportamento espectral do processo corrosivo de cada metal, que a espessura e o posicionamento dos metais na bicamada pode resultar num tempo maior de detecção do processo corrosivo, ou seja, a depender da espessura e posicionamento dos metais, a corrosão pode ser detectada desde o início. Também foi possível observar nos resultados para algumas configurações da bicamada metálica que o dispositivo apresenta um desempenho em que na maior parte do tempo, durante o processo corrosivo, não há variação da reflectância, assim, a corrosão não pode ser detectada desde o início. O nível de intensidade refletida observada no espectro de reflectância traz a informação de quantos nanômetros foram corroídos, assim, com o conhecimento do tempo que levou até essa determinada intensidade

refletida ser atingida é possível determinar a taxa com que a bicamada metálica é agredida pelo agente corrosivo durante o processo de corrosão.

Nos resultados obtidos na simulação da corrosão da bicamada metálica considerando uma região plana e laminar, foi possível observar que a espessura otimizada para a bicamada é aproximadamente 20 nm, ou seja, é a espessura a partir da qual tem-se variação na reflectância desde o início do processo corrosivo, para os metais e posicionamento. A Figura 71 mostra os resultados obtidos com o modelo numérico através da modelagem realizada no COMSOL, o modelo analítico de corrosão laminar a partir do formalismo das equações de Fresnel e o resultado experimental para a variação da reflectância em função da espessura dos filmes finos depositados na ponta da fibra. Os valores do parâmetro A da Equação 3.31 são obtidos ajustando a reflectância obtida por simulações com COMSOL com a experimental, para cada valor de d , conforme mostram as Figuras 71 e 72. Para nossas condições experimentais, o melhor valor encontrado para o parâmetro Λ é de 50 nm para o resultado com a configuração da bicamada metálica de Ti(10nm)/Al(10nm) e o Si Iso Etch como meio externo, conforme ilustra a Figura 71, e $\Lambda = 35$ nm para a configuração da bicamada metálica de Ni(5nm)/Al(5nm), e o Al-Etch como meio externo, ilustrado na Figura 72. Ambos os resultados são para o comprimento de onda de 1550 nm.

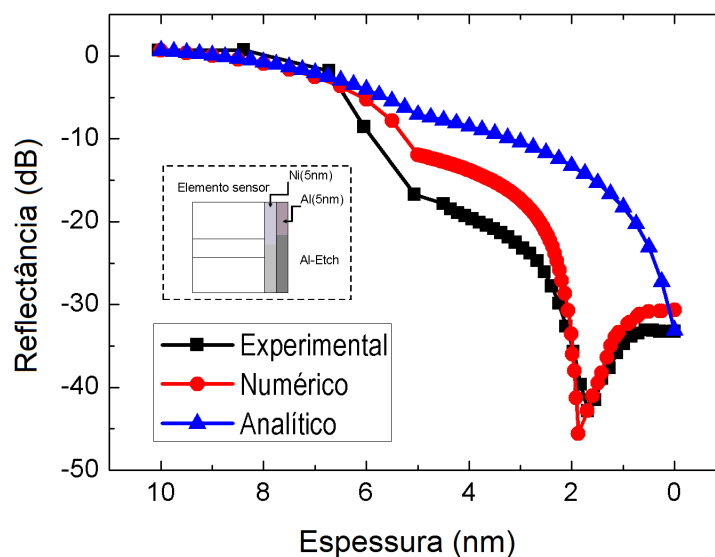
Figura 71 – Resultado experimental, numérico e analítico do processo de corrosão da bicamada com Ti(10 nm)/Al(10 nm) no Si Iso Etch



Fonte: o autor, 2022

Na Figura 71 são apresentadas as curvas de variação da reflectância em função da espessura da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) do sistema sensor de corrosão quando submetido ao agente

Figura 72 – Resultado experimental, numérico e analítico do processo de corrosão da bicamada com Ni(5 nm)/Al(5 nm) no Al-Etch



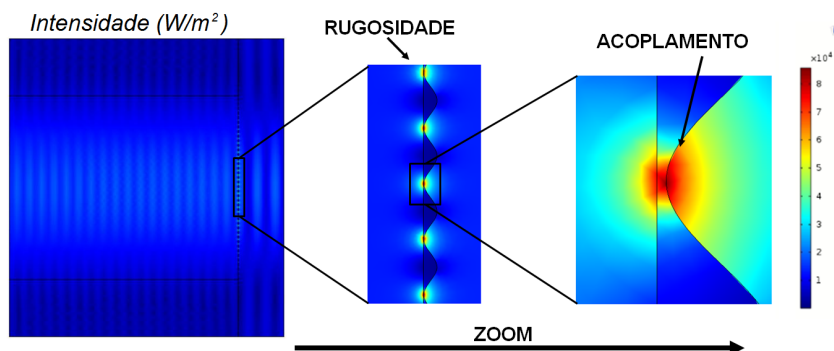
Fonte: o autor, 2022

corrosivo Si Iso Etch. Pode-se observar nas curvas de reflectância o ponto de transição de um metal para o outro na bicamada, na espessura de 10 nm, tanto nos resultados experimentais quanto nas simulações, através da mudança na inclinação, ou tendência, da evolução da curva de reflectância. Além disso, observa-se também que os resultados do modelo numérico (COMSOL), que leva em consideração a rugosidade da superfície metálica provocada pela corrosão, se aproximam mais dos resultados experimentais que os resultados do modelo que considera a corrosão laminar que faz uso do formalismo das equações de Fresnel. O vale na reflectância (região de mínima intensidade) observado para a espessura de aproximadamente 6 nm, tanto nos dados experimentais quanto na simulação numérica, é atribuído ao efeito ressonância de plasmon de superfície que ocorre devido à presença da rugosidade de superfície, como descrito em (ALVES et al., 2018). A Figura 72 mostra a alteração da reflectância em função da espessura da bicamada de Ni(5 nm)/Al(5 nm). De forma similar aos resultados da Figura 71, observa-se também a mudança na tendência da curva de reflectância na transição entre os metais da bicamada, na espessura de 5 nm. O modelo numérico com rugosidade se aproxima melhor dos resultados experimentais em comparação com o modelo analítico.

O acoplamento do sinal óptico com a superfície rugosa da bicamada metálica ocorre em 6 nm de espessura como pode ser observado na Figura 71 e próximo de 2 nm, Figura 72. A Figura 73 ilustra o efeito óptico observado durante a simulação da corrosão bicamada metálica. A Figura 73 corresponde ao ponto de mínima reflectância no gráfico da Figura 71, ou seja,

onde ocorre o vale na curva da reflectância com espessura de 6 nm do metal.

Figura 73 – Resultado da simulação numérica no COMSOL para o acoplamento do sinal óptico na superfície rugosa da bicamada metálica Ti/Al



Fonte: o autor, 2022

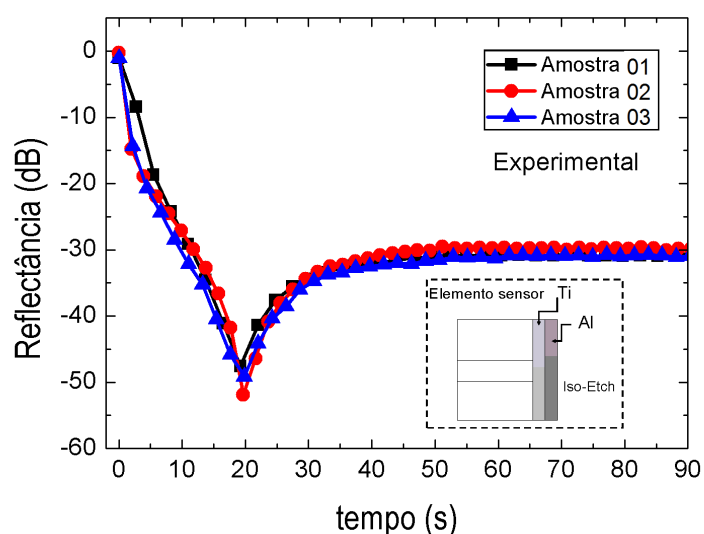
4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SENSOR ÓPTICO DE CORROSÃO COM DUPLA CAMADA METÁLICA

Nesta seção, apresentamos o conjunto de resultados experimentais para o sensor com dupla camada metálica. Os procedimentos de medição da corrosão foram realizados da seguinte maneira: a fibra óptica metalizada é imersa, manualmente, no agente corrosivo por um determinado tempo, suficiente, para que a corrosão da bicamada metálica ocorresse por completa; depois, a fibra foi retirada e o agente corrosivo reutilizado, dessa forma, a realização de uma nova medição foi feita na mesma porção do agente corrosivo, após todos os procedimentos experimentais a solução corrosiva é descartada. Na Figura 74, são apresentadas curvas experimentais obtidas de amostras Ti(10 nm)/Al(10 nm) do mesmo lote de fabricação, ou seja, foram fabricadas ao mesmo tempo, pois as fibras estavam lado a lado na câmara do *sputtering*, no entanto, essas amostras foram escolhidas da região mais externa do suporte apresentado no Capítulo 3, ilustrado na Figura 41. A seções de detecção das fibras são imersas na solução Si Iso-Etch em momentos diferentes, de forma independente.

Na Figura 75 são apresentadas curvas experimentais obtidas de amostras do mesmo lote de fabricação das amostras da Figura 74, a diferença é que essas amostras foram escolhidas da região mais próxima do centro do suporte. Os resultados mostram uma pequena diferença na resposta óptica do sensor na região do vale, entre 19 e 20 segundos de corrosão, para o grupo de amostras das Figuras 74 e 75. Já na Figura 76, é possível observar nos resultados

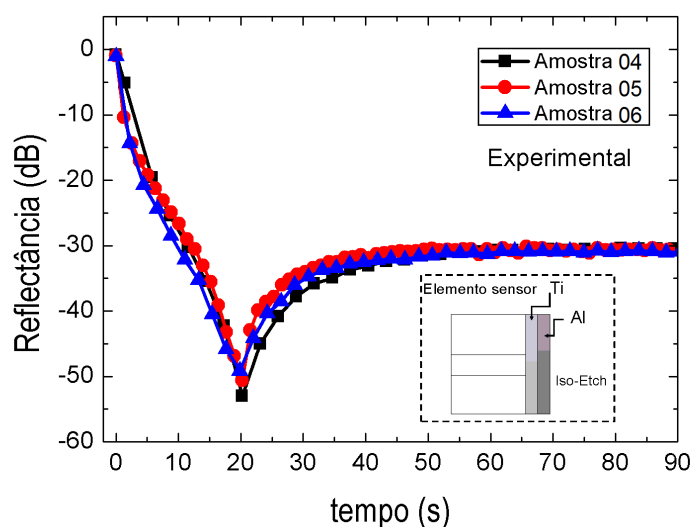
uma diferença na resposta óptica do sensor na região do vale, entre 21 e 22 segundos de corrosão. Essa diferença no processo de corrosão pode ser causada por não uniformidades da estrutura dos metais depositados, ou por agitação da amostra, ou outras variações das condições do agente corrosivo durante a corrosão. Até amostras idênticas podem gerar padrão de rugosidade, devido à corrosão, ligeiramente diferentes, causando a diferença no vale da curva de reflectância.

Figura 74 – Reflectância em função do tempo de corrosão da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) na solução de Si Iso Etch



Fonte: o autor, 2022

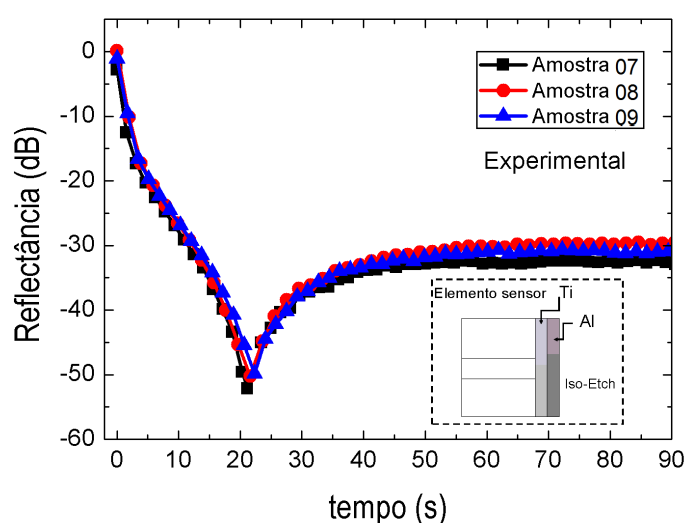
Figura 75 – Reflectância em função do tempo de corrosão da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) na solução de Si Iso Etch



Fonte: o autor, 2022

Para o caso da Figura 74, as taxas de corrosão medidas para o Al (metal mais externo), primeiro a ser corroído, e para o Ti (metal mais interno, próximo à fibra) são de 2,46 nm/s, e 0,22 nm/s, respectivamente. No caso da Figura 75, a taxa de corrosão medida para o Al (metal mais externo), primeiro a ser corroído, e para o Ti (metal mais interno, próximo à fibra) são de 2,64 nm/s e 0,22 nm/s, respectivamente. Já para o grupo de amostras da Figura 76, a taxa de corrosão medida para o Al (metal mais externo), primeiro a ser corroído, e para o Ti (metal mais interno, próximo à fibra) são de 2,54 nm/s e 0,22 nm/s, respectivamente.

Figura 76 – Reflectância em função do tempo de corrosão da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) na solução de Si Iso Etch

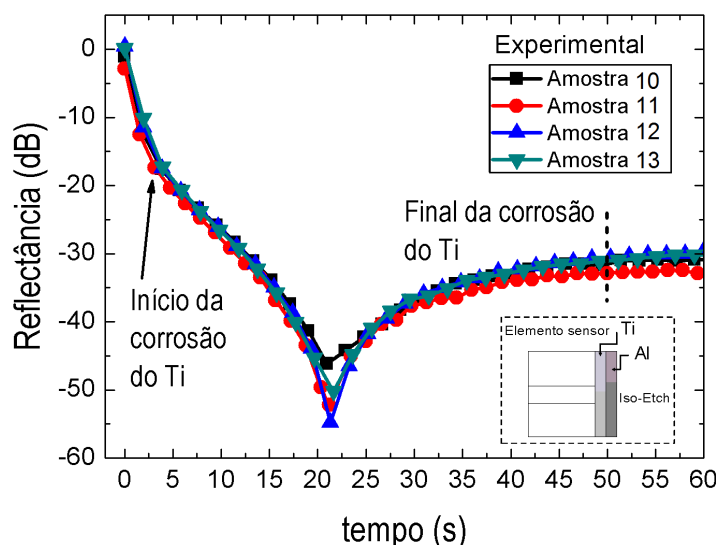


Fonte: o autor, 2022

Na Figura 77, também são apresentados resultados experimentais, nos quais o Si Iso Etch é utilizado no processo de corrosão de um conjunto de quatro sensores com bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) escolhidas na região mais central do suporte. Os resultados obtidos das amostras apresentam uma diferença na resposta óptica do sensor na região do vale de 20,5 a 21 segundos de corrosão, que produz uma maior uniformidade na resposta óptica do sensor, sem as variações nos vales apresentados nos resultados anteriores, o que pode indicar uma maior uniformidade nas estruturas dos filmes depositados ou no processo de corrosão. Entretanto, de maneira geral, há uma conformidade entre os resultados independentemente da posição da amostra no suporte.

Ainda na Figura 77, é possível observar que desde o início da corrosão há alteração na luz refletida. Em dado momento do processo corrosivo, a reflectância cai ao mínimo e depois se estabiliza em um nível constante. O nível constante significa que o processo de corrosão

Figura 77 – Reflectância em função do tempo de corrosão da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) na solução de Si Iso Etch



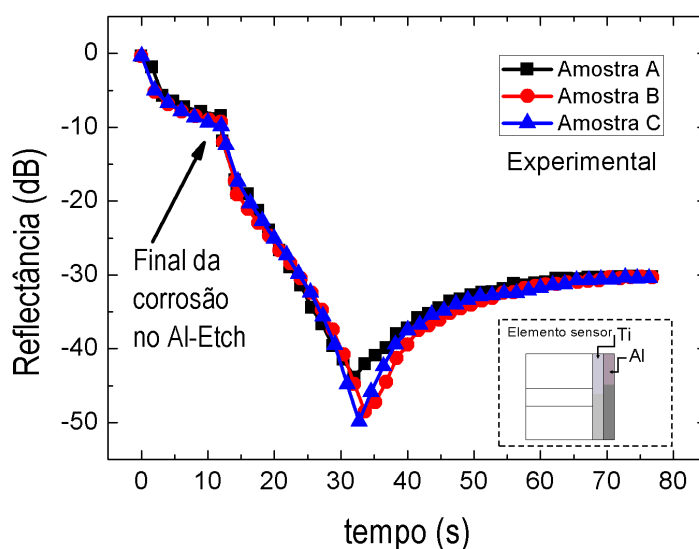
Fonte: o autor, 2022

na dupla camada metálica na extremidade da fibra terminou. No entanto, o nível mínimo de reflectância indica que o vale está associado aos efeitos de espalhamento da luz e acoplamento de plásmom de superfície (FONTANA; PANTELL, 1988; ALVES et al., 2018). Ambos os efeitos são consequência da formação de rugosidade na superfície do filme metálico causado pelo processo de corrosão. A transição entre os metais ocorre em torno do ponto de espessura igual a 10 nm (3,69 segundos na Figura 77), onde pode ser observado que há uma mudança na inclinação (derivada) da curva de reflectância. A observação desta mudança de tendência dá a indicação da transição entre os metais e permite o cálculo da taxa de corrosão da substância em cada um dos metais da bicamada. No caso da Figura 77, a taxa de corrosão medida para o Al (metal mais externo), primeiro a ser corroído, e para o Ti (metal mais interno, próximo à fibra) são de 2,71 nm/s e 0,22 nm/s, respectivamente.

Para medições em laboratório, a ação do processo corrosivo também foi simulada por corrosão controlada da bicamada Ti(10 nm)/Al(10 nm) na região sensora utilizando dois agentes corrosivos, Al-Etch e o Si Iso Etch. A mesma bicamada metálica exposta aos agentes corrosivos em instantes diferentes, alterando-se manualmente o agente corrosivo numa ação sequencial de imersão da ponta da fibra no ácido. Na Figura 78 são mostradas as curvas de variação da reflectância em função do tempo de corrosão da dupla camada metálica. A seção de detecção é imersa na solução Al-Etch para a corrosão do primeiro filme de metal que compõe a dupla camada, o Al, em seguida a seção de detecção é imersa na solução de Si Iso

Etch para a corrosão do segundo filme de metal, o Ti. Nos primeiros 12 segundos de corrosão a potência refletida diminui aproximadamente 9,85 dB, e a taxa de corrosão medida para o Al é 0,83 nm/s. Em seguida, após a imersão da região sensora no Si Iso Etch, a potência da luz refletida diminui rapidamente (40 dB em 20 segundos), chega ao vale e estabiliza no patamar indicando que não há mais metal na ponta da fibra. A taxa de corrosão do Ti medida é de 0,15 nm/s. Assim como na Figura 77, observa-se na Figura 78 que os dados dos 3 experimentos independentes realizados em cada caso apresentam boa concordância entre si, indicando boa repetibilidade dos resultados dos sensores. A partir dos valores das taxas de corrosão obtidas pelo sensor óptico proposto nesta Tese de Doutorado, determinamos o erro relativo na medida da taxa de corrosão, que foi calculado usando como referência o valor da taxa de corrosão do primeiro grupo de amostras (ver Figura 74). A medida da taxa de corrosão do Al no Si Iso Etch, obtida no primeiro grupo de amostras, apresenta concordância com a taxa fornecida pelos demais grupos de amostras (ver Figuras 75-77). Essa concordância, implica no erro relativo de aproximadamente 10 %. A taxa de corrosão do Ti, fornecida pelo primeiro grupo de amostras, é aproximadamente igual ao valor da taxa fornecida pelos demais grupos de amostras, implicando num erro relativo inferior a 5 %.

Figura 78 – Reflectância em função do tempo de corrosão para três amostras de bicamadas Ti(10 nm)/Al(10 nm) no Al-Etch e Si Iso Etch



Fonte: o autor, 2022

Os valores para as taxas de corrosão obtidos dos resultados mostrados nas Figuras 74-78 se aproximam dos valores encontrados na literatura (MARTINS-FILHO et al., 2007; WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003) somente para o Al. Para o Ti os valores medidos são bem diferentes

dos valores reportados. A discrepância entre as taxas de corrosão obtidas pelo sensor óptico proposto neste trabalho e as taxas de corrosão obtidas em (WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003) pode estar relacionada à técnica de medição empregada e à estrutura do material. Isso porque em (WILLIAMS; GUPTA; WASILIK, 2003) é feita a corrosão dos metais em bulk e de forma separada para cada metal, enquanto que neste trabalho é feita a corrosão de uma bicamada de filmes finos metálicos construídos por deposição tipo *sputtering*. Como destacado em (SCHLÜTER et al., 2010), a corrosão para esses dois perfis de materiais pode ocorrer com taxas diferentes. Outro aspecto importante é o nível de pureza de cada componente da solução corrosiva, que pode alterar a taxa de corrosão em algumas dezenas de vezes, como descrito em (FREDJ et al., 2012). Por fim, é importante destacar que a escolha dos metais e de suas espessuras tem impacto na faixa de operação do sensor. O sensor de Ti(10 nm)/Al(10 nm) proposto apresenta uma estrutura otimizada com 20 nm da bicamada metálica, com uma faixa de detecção duas vezes maior que a reportada em (MARTINS-FILHO et al., 2007).

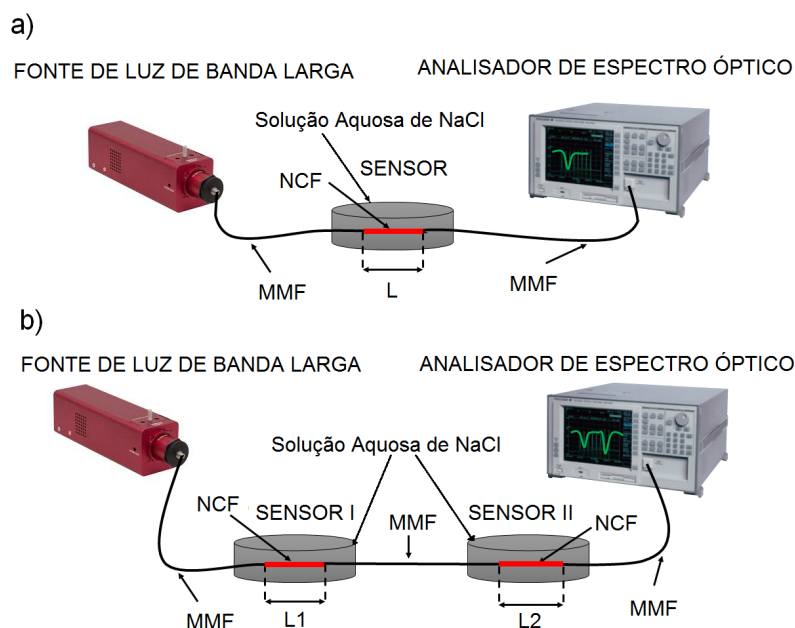
5 SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO À FIBRA ÓPTICA HETERONÚCLEO

Este Capítulo apresenta um conjunto de atividades sistemáticas com as amostras de fibra óptica de estrutura heteronúcleo, empregadas na construção de um sensor de índice de refração, proposto nesta Tese de Doutorado. A Seção 5.1 ilustra detalhes da montagem experimental usada para o sistema de detecção de índice de refração. A Seção 5.2 mostra um conjunto de resultados da modelagem para a caracterização do sensor de índice de refração a partir da investigação da influência do comprimento da região sensora, para o desenvolvimento de elementos sensores para a construção de uma cascata de dispositivos com estruturas de fibra heteronúcleo operando em diferentes comprimentos de onda. Por fim, a Seção 5.3 apresenta o conjunto de resultados experimentais do sensor de índice de refração baseado em fibras ópticas heteronúcleo em cascata multiplexado em comprimento de onda.

5.1 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

A configuração experimental, usada para caracterizar em laboratório o sensor de índice de refração com estrutura heteronúcleo, é ilustrada na Figura 79. Esse sistema consiste numa fonte de luz de banda larga (SLS201L/M, Thorlabs), cuja faixa de espectro é de 360 - 2600 nm, que é acoplada numa fibra MMF, cujo comprimento é de 10 m. No centro da fibra MMF, uma seção de fibra NCF de comprimento L é inserida, formando a estrutura heteronúcleo. O sensor heteronúcleo em cascata é construído com os dois comprimentos de inserção L_1 e L_2 em uma única fibra, separados por um trecho de fibra multimodo de 0,5 metros. A mudança na intensidade da luz induzida pelas condições externas em torno da região heteronúcleo é monitorada com o analisador de espectro óptico (OSA, 350 - 1750 nm, com a resolução de 0,05 nm e 0,01 dB). Os dados de saída do sensor de índice de refração são gravados em computador. As soluções utilizadas para simular as condições externas em torno da região sensora foram obtidas misturando diferentes massas de NaCl em água destilada. O índice de refração da solução de NaCl é medido e calibrado no refratômetro. Colocamos a solução aquosa de NaCl com índice de refração variando de 1,3370 a 1,3840. As medições foram realizadas à temperatura ambiente, e a região sensora foi mantida reta, sem aplicação de tensão axial nem curvatura. Após cada teste, a região sensora foi limpa com água destilada e seca ao ar.

Figura 79 – Configuração experimental para medições (a) diagrama de teste do sensor de estrutura heteronúcleo tradicional (b) diagrama de teste do sensor de fibra de estrutura heteronúcleo em cascata



Fonte: o autor, 2022

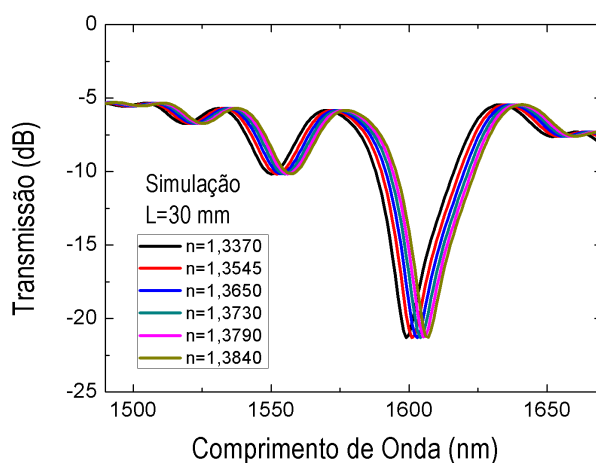
5.2 RESULTADOS DA MODELAGEM DO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO À FIBRA ÓPTICA HETERONÚCLEO

Esta seção apresenta um conjunto de resultados da modelagem descrita na Seção 3.5 do Capítulo 3, para investigar a dependência do comprimento de onda da perda de transmissão para os diferentes comprimentos L da fibra NCF (região sensora), para o desenvolvimento de elementos sensores com estruturas de fibra heteronúcleo operando em diferentes comprimentos de onda. O princípio de operação do sensor de estrutura heteronúcleo MNM pode ser descrito da seguinte forma: A luz se propaga ao longo da fibra MMF de entrada e em seguida entra na seção de fibra NCF e excita vários modos guiados na NCF, de maneira que, a interferência entre os diferentes modos ocorre enquanto a luz se propaga através da seção de fibra NCF. Assim, ao escolher um comprimento adequado para a seção NCF, a luz é acoplada na saída da MMF de uma maneira dependente do comprimento de onda por causa da interferência. Dessa forma, espera-se que a perda de transmissão do sinal de entrada para o sinal de saída aumente ou diminua, à medida que o comprimento de onda da luz propagada aumenta em uma determinada faixa de comprimento de onda (HATTA et al., 2009).

O passo inicial para o projeto do sensor heteronúcleo em cascata é determinar os compri-

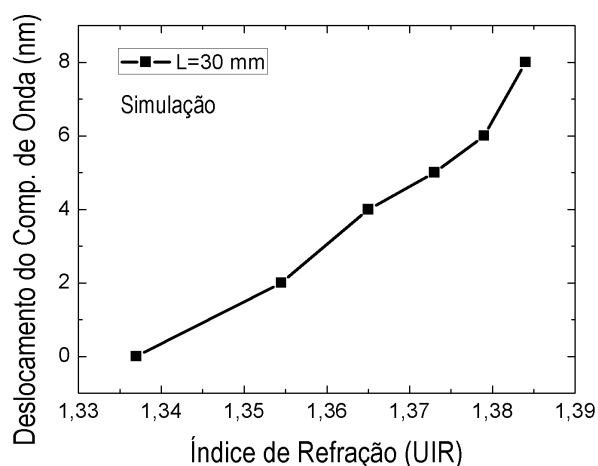
mentos apropriados da fibra NCF para obter as duas regiões de ressonância distinguíveis, ou seja, em comprimentos de onda diferentes no espectro de transmissão do sensor. Para analisar a diferença dos espectros de transmissão entre as estruturas MNM de comprimentos L da NCF, que variam de 30 a 45 mm, simulações são realizadas com as estruturas individuais, sensor tradicional. A Figura 80 mostra o espectro transmissão da estrutura heteronúcleo MNM para o comprimento L com 30 mm para seis valores de índice de refração do meio externo que variam de 1,3370 a 1,3840. Pode-se observar que a potência óptica transmitida apresenta uma região de ressonância em torno do comprimento de onda de 1600 nm.

Figura 80 – Espectro de transmissão para os diferentes índices de refração obtidos a partir da simulação para $L=30$ mm



Fonte: o autor, 2022

Figura 81 – Relação entre o índice de refração e a mudança de comprimento de onda de ressonância obtidos a partir dos resultados da simulação para $L=30$ mm

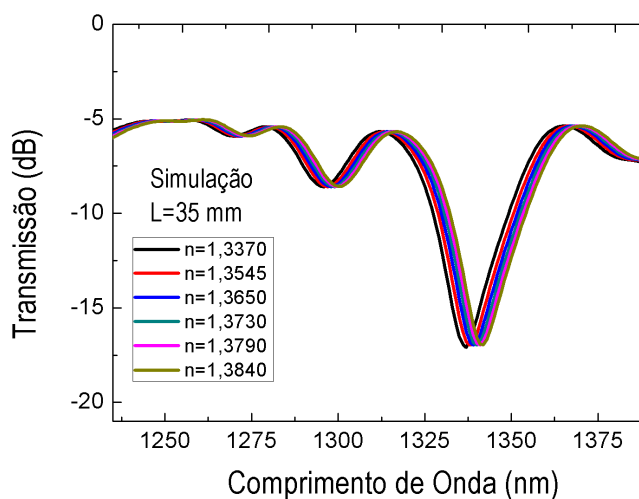


Fonte: o autor, 2022

Ainda na Figura 80, podemos observar claramente que o comprimento de onda de ressonância é deslocado para comprimentos de onda maiores à medida que o índice de refração aumenta. Este fenômeno de mudança de comprimentos de onda de ressonância é atribuído à interferência entre os modos excitados na fibra NCF (LEE; NISHII, 1998; LIU et al., 1999; DUHEM; HENNINOT; DOUAY, 2000). A Figura 81 indica a relação entre os comprimentos de onda do vale nas curvas de transmissão e os índices de refração do meio externo e a curva revela um padrão linear para esta faixa de índice de refração.

A Figura 82 mostra o espectro de transmissão da estrutura heteronúcleo MNM para o comprimento L com 35 mm para valores de índice de refração do meio externo que variam de 1,3370 a 1,3840. A potência óptica transmitida apresenta uma região de ressonância em torno do comprimento de onda de 1330 nm. Que é diferente da região de ressonância da estrutura com L=30 mm. A relação entre os comprimentos de onda do vale nas curvas de transmissão e os índices de refração do meio externo para a estrutura com L igual 35 mm, é ilustrada na Figura 83.

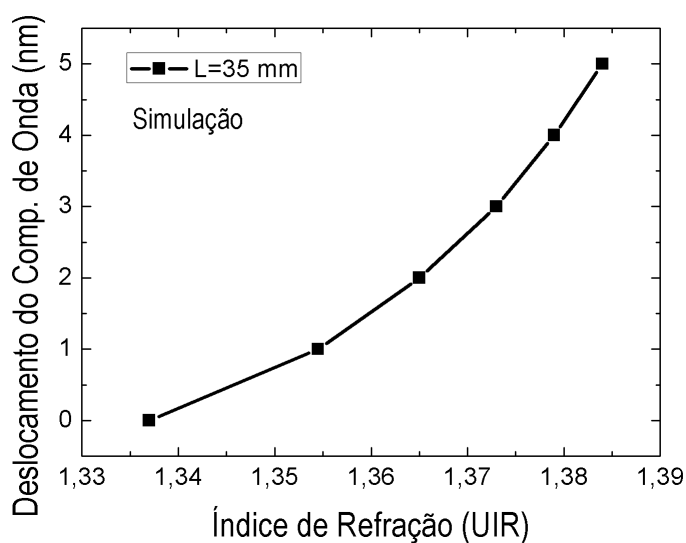
Figura 82 – Espectro de transmissão para os diferentes índices de refração obtidos a partir da simulação para L=35 mm



Fonte: o autor, 2022

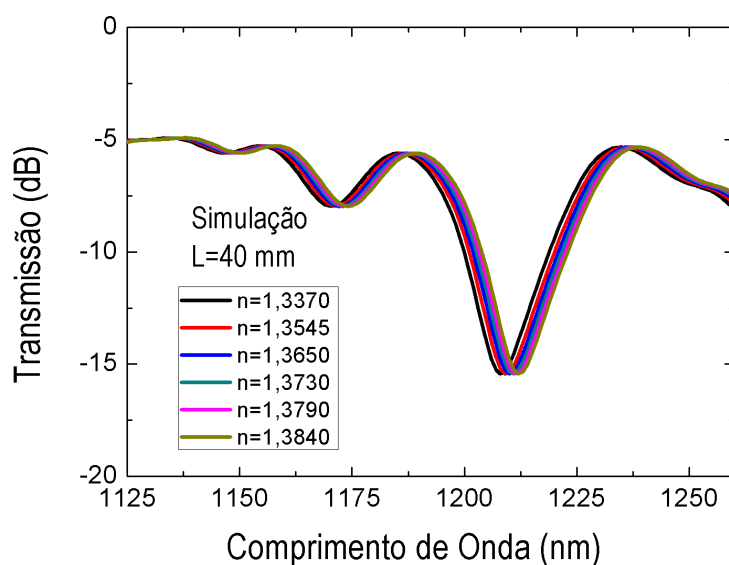
O espectro transmissão, para o comprimento da NCF de 40 mm, apresenta uma região de ressonância em torno do comprimento de onda de 1230 nm, quando o índice de refração do meio externo apresenta valores que variam de 1,3370 a 1,3840, como ilustrado na Figura 84. A relação entre os deslocamentos dos comprimentos de onda do vale nas curvas de transmissão e os índices de refração do meio externo, é ilustrada na Figura 85.

Figura 83 – Relação entre o índice de refração e a mudança de comprimento de onda de ressonância obtidos a partir dos resultados da simulação para $L=35$ mm



Fonte: o autor, 2022

Figura 84 – Espectro de transmissão para os diferentes índices de refração obtidos a partir da simulação para $L=40$ mm

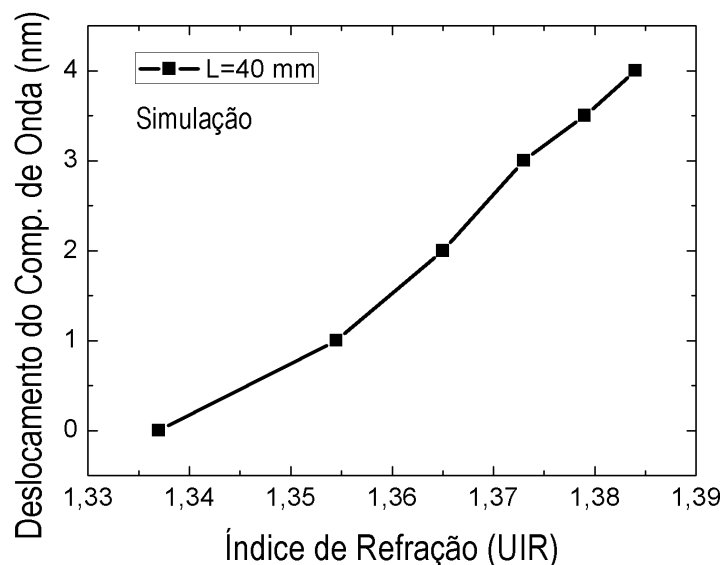


Fonte: o autor, 2022

Já para o comprimento L da região sensora de 45 mm, o espectro transmissão apresenta uma região de ressonância em torno do comprimento de onda de 1080 nm, para variações do índice de refração do meio externo entre 1,3370 e 1,3840, como ilustrado na Figura 86. Já a relação entre os deslocamentos dos comprimentos de onda nas curvas de transmissão em relação as variações de índice de refração do meio externo, é ilustrada na Figura 87.

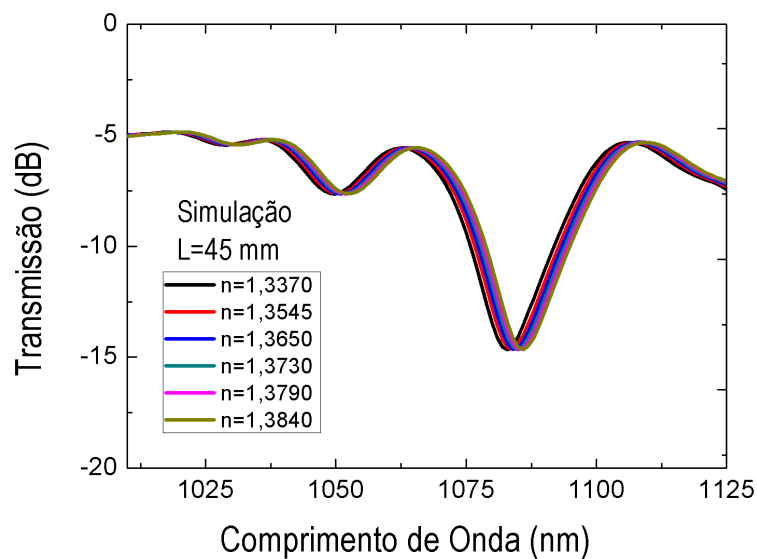
A Figura 88 mostra as curvas para a transmissão obtidas a partir dos dados experimentais

Figura 85 – Relação entre o índice de refração e a mudança de comprimento de onda de ressonância obtidos a partir dos resultados da simulação para $L=40$ mm



Fonte: o autor, 2022

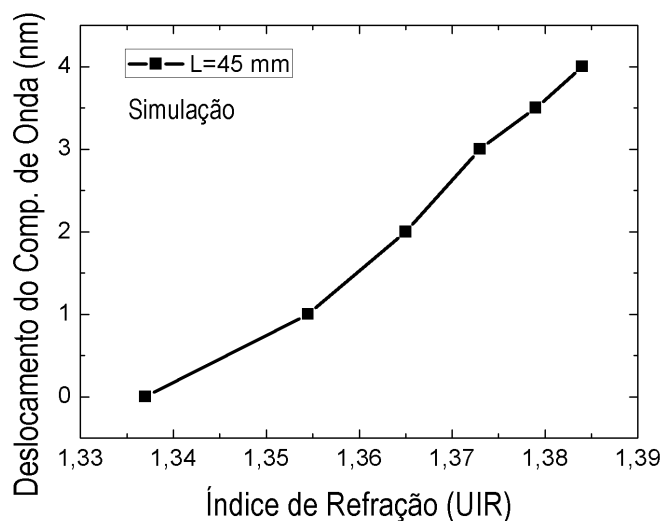
Figura 86 – Espectro de transmissão para os diferentes índices de refração obtidos a partir da simulação para $L=45$ mm



Fonte: o autor, 2022

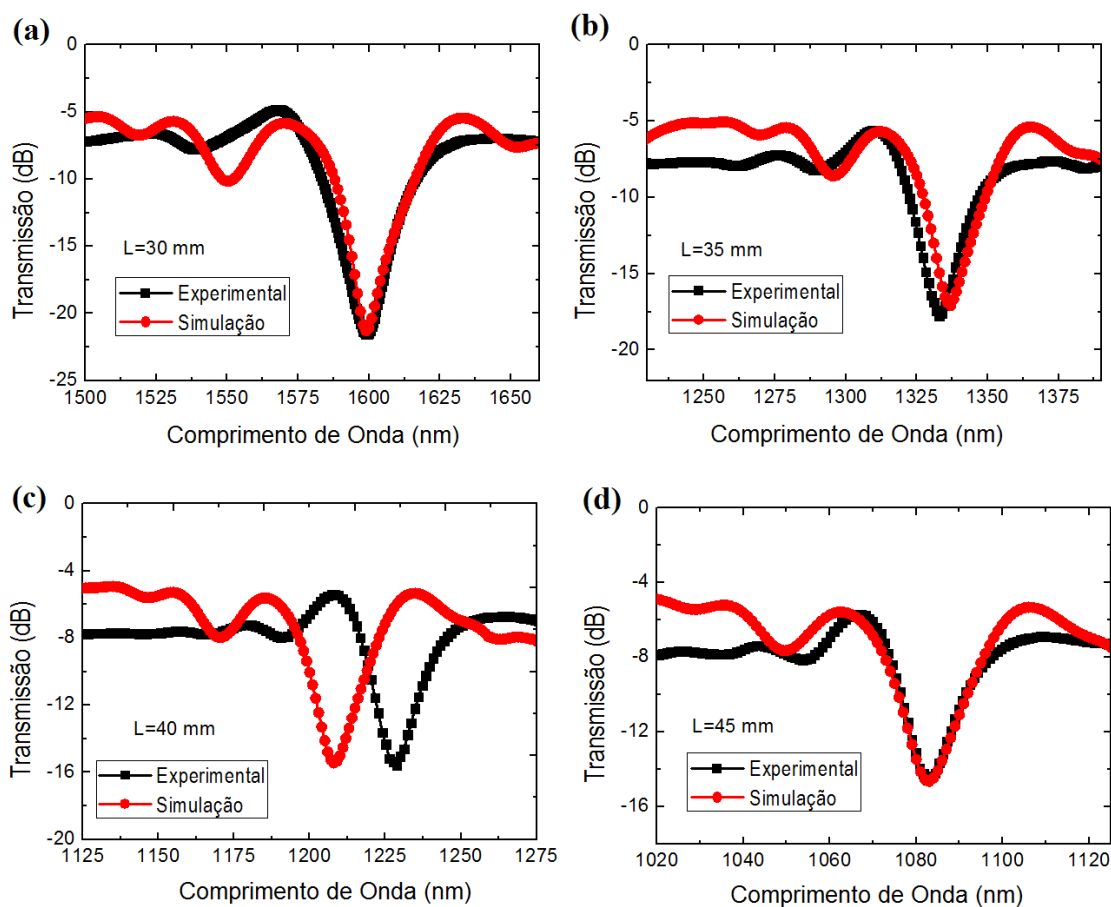
e as curvas para a transmissão obtidas pelo modelo teórico, apresentado na Seção 3.5 do Capítulo 3. Elas correspondem à resposta espectral do sensor heteronúcleo MNM quando o índice de refração do meio externo é 1,3370, e o comprimento da região sensora é igual a 30 mm, 35 mm, 40 mm e 45 mm, como ilustrado nas Figuras 88(a)-(d). Já a Figura 89, mostra a relação entre o comprimento de onda de ressonância e a região da fibra NCF com diferentes comprimentos ($L= 30 - 45$ mm) quando o meio externo tem o IR 1,3370.

Figura 87 – Relação entre o índice de refração e a mudança de comprimento de onda de ressonância obtidos a partir dos resultados da simulação para $L=45$ mm



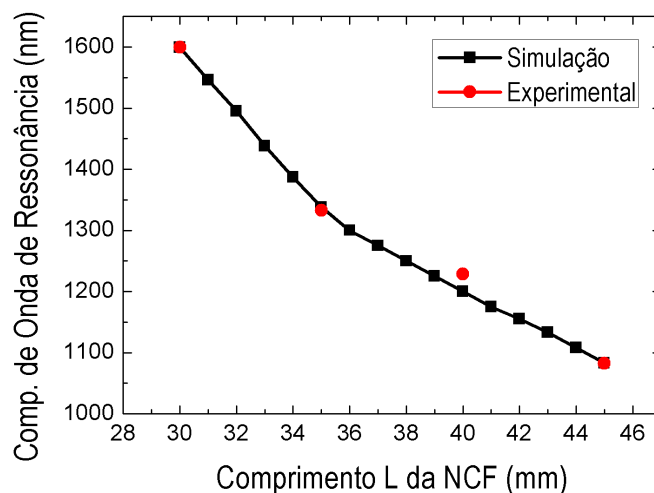
Fonte: o autor, 2022

Figura 88 – Espectro de transmissão quando o índice de refração do meio externo é igual a 1,3370 para o comprimento da NCF (a) $L=30$ mm (b) $L=35$ mm (c) $L=40$ mm e (d) $L=45$ mm



Fonte: o autor, 2022

Figura 89 – Relação entre o comprimento de onda de ressonância e diferentes comprimentos da fibra NCF ($L=30 - 45$ mm) para o IR de 1,3370 do meio externo



Fonte: o autor, 2022

A partir da comparação entre os resultados da simulação e os experimentais, os comprimentos L_1 (Sensor I) e L_2 (Sensor II), para a construção da cascata de dois dispositivos heteronúcleo de perfil MNM, devem ser de 45 mm e 30 mm, respectivamente, para obter as duas regiões de ressonância distinguíveis no espectro de transmissão do sensor, e com a maior diferença entre as duas bandas de ressonância, para evitar interferência entre as bandas. No entanto, devido a vários fatores práticos, como a abertura numérica dependente do comprimento de onda em fibras multimodo e a fusão imperfeita entre fibras, o espectro óptico de transmissão medido para a estrutura MNM pode ter um desvio no comprimento de onda de ressonância quando comparado com o espectro simulado usando o mesmo comprimento de NCF (WANG; FARRELL; YAN, 2008).

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO BASEADO EM FIBRAS HETERONÚCLEO EM CASCATA MULTIPLEXADO EM COMPRIMENTO DE ONDA

Nesta seção, é apresentado um conjunto de resultados experimentais para o sensor heteronúcleo MNM de dispositivo único (sensor tradicional) para diferentes comprimentos da fibra NCF, além de mostrar os resultados experimentais do sensor de índice de refração baseado em estrutura heteronúcleo MNM em cascata multiplexado por comprimento de onda, e funcio-

nam de forma independente. Além disso, apresentamos a sensibilidade em termos do desvio de comprimento de onda do vale em relação as variações de índice de refração do meio externo ao perfil heteronúcleo, e a sensibilidade em termos de intensidade em relação as variações de índice de refração em comprimentos de onda específicos, calculadas, respectivamente, por:

$$S_1 = \frac{\Delta\lambda_R}{\Delta n_{ext}}, \quad (5.1)$$

$$S_2 = \frac{\Delta P_{op}}{\Delta n_{ext}}, \quad (5.2)$$

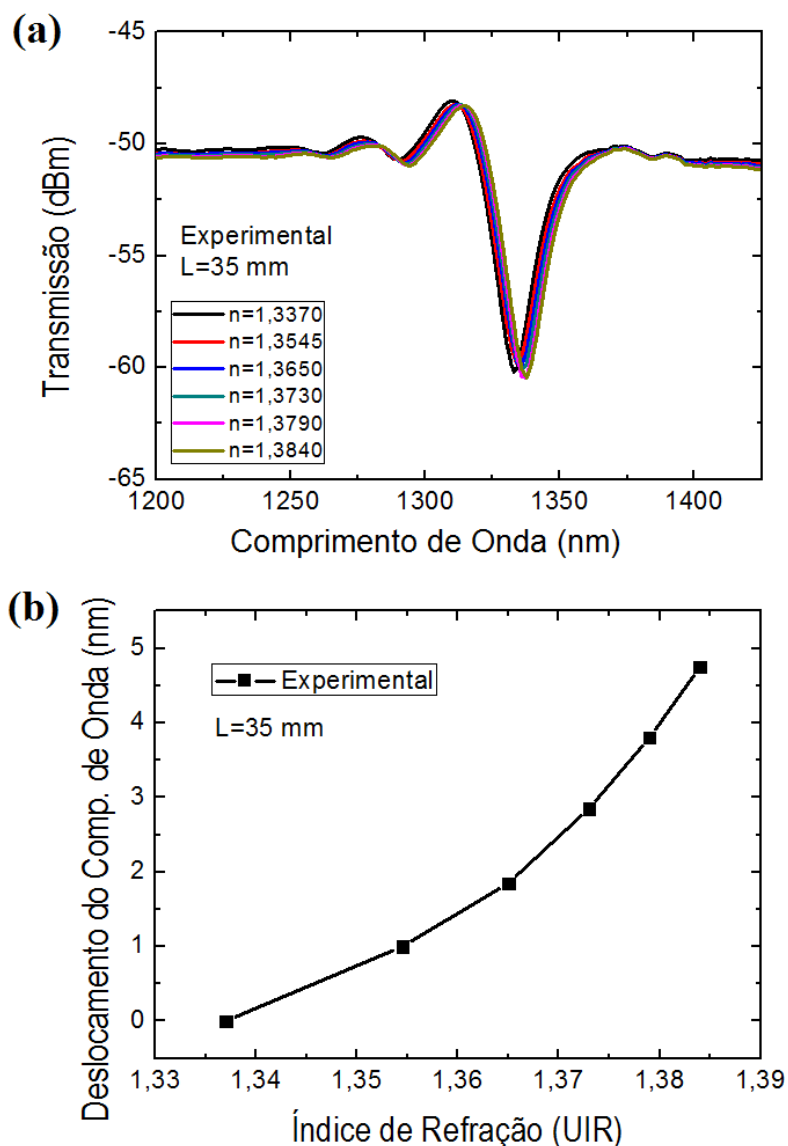
em que $\Delta\lambda_R$ e ΔP_{op} representam as variações do comprimento de onda do vale e as variações da potência óptica transmitida pela fibra, respectivamente, e Δn_{ext} representa a variação do índice refração do meio externo no entorno da região heteronúcleo.

5.3.1 Teste do Sensor heteronúcleo de dispositivo único

Em primeiro lugar, fabricamos o sensor de estrutura heteronúcleo tradicional e testamos a faixa de comprimento de onda de ressonância (vale no espectro de transmissão) para os comprimentos de 30 mm, 35 mm, 40 mm e 45 mm para medição de índice de refração do meio externo à temperatura ambiente (20°C) usando a configuração experimental mostrada na Figura 79(a). Durante o teste, o sensor é mantido reto, e as soluções de cloreto de sódio de diferentes concentrações em água destilada são usadas como amostras com diferentes índices de refração. O índice de refração da solução é medido e calibrado por um refratômetro. Antes de cada medição, limpamos o sensor com água destilada, e secamos ao ar. Em nosso experimento, o sensor é totalmente imerso nas soluções de diferentes concentrações de NaCl, que são injetadas com o auxílio de uma pipeta.

Os espectros de transmissão dos sensores com diferentes comprimentos de fibra NCF de 30 mm, 35 mm, 40 mm e 45 mm são mostrados nas Figuras 90-93. Testamos os dispositivos de estrutura MNM sob os índices de refração de 1,3370, 1,3545, 1,3650, 1,3730, 1,3790 e 1,3840. Com isso, podemos observar que os espectros de transmissão são diferentes para diferentes comprimentos de fibra NCF, como previsto nas simulações mostradas na Seção 5.2. Além disso, à medida que o comprimento da fibra NCF aumenta, há um deslocamento nos comprimentos de onda de vale no espectro de transmissão. Os resultados experimentais mostram que os comprimentos da fibra NCF têm efeito na interferência multimodo.

Figura 90 – (a) Resposta espectral do sensor com a mudança do IR externo; (b) deslocamentos do comprimento de onda do vale sob diferentes IR do meio externo



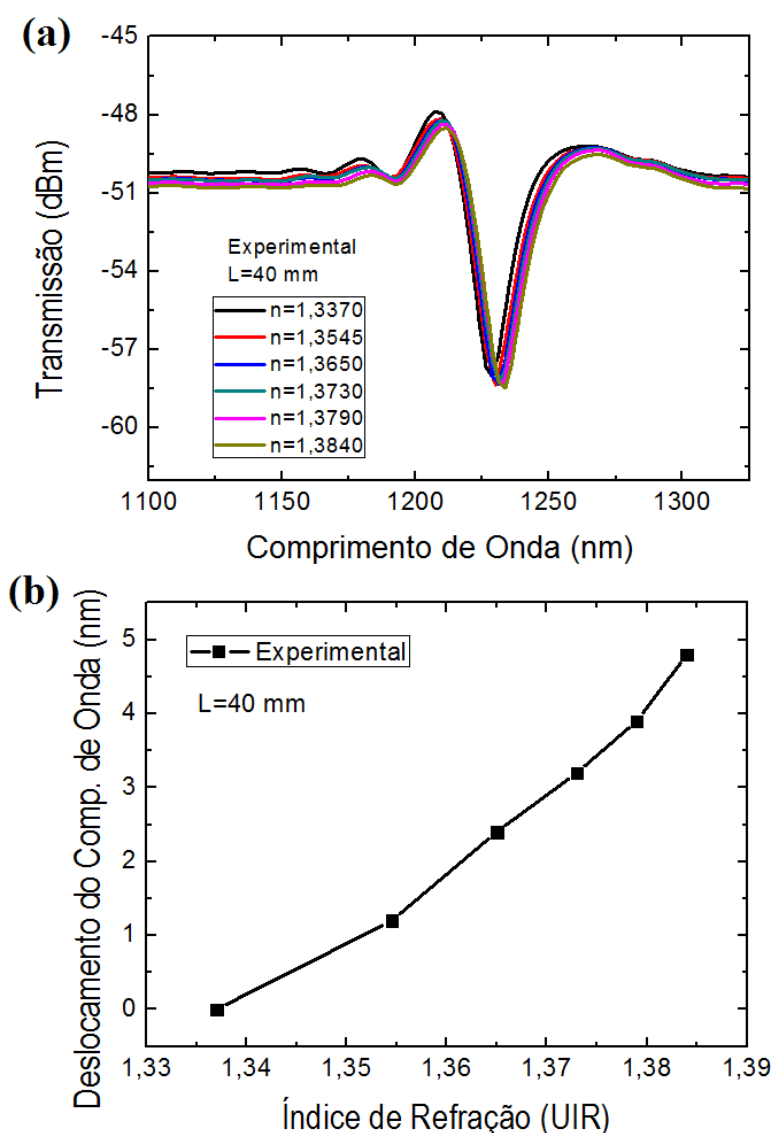
Fonte: o autor, 2022

Para medição de índice de refração do meio externo, os sensores com diferentes comprimentos de fibra NCF são testados individualmente. A Figura 90(a) mostra o espectro transmissão da estrutura MNM para o comprimento da fibra NCF de 35 mm para seis valores de índice de refração do meio externo, entre 1,3370 a 1,3840. Pode-se observar que a potência óptica transmitida apresenta uma região de ressonância em torno do comprimento de onda de 1333 nm. Os deslocamentos dos comprimentos de onda de vale em função das variações de índice de refração, são mostrados na Figura 90(b), e a sensibilidade é 190 nm/UIR, na faixa de índice de refração de 1,3790 a 1,3840.

Para a estrutura MNM, com o comprimento da fibra NCF de 40 mm, o espectro transmissão

para seis valores de índice de refração do meio externo à região sensora, é ilustrado na Figura 91(a). Senso assim, é possível observar que a potência óptica transmitida apresenta uma região de ressonância em torno do comprimento de onda de 1228 nm. A relação entre os desvios dos comprimentos de onda de vale em função das variações de índice de refração, é apresentada na Figura 91(b), e a sensibilidade é 180 nm/UIR, na faixa de índice de refração de 1,3790 a 1,3840.

Figura 91 – (a) Resposta espectral do sensor com a mudança do IR externo; (b) deslocamentos do comprimento de onda do vale sob diferentes IR do meio externo



Fonte: o autor, 2022

Já para a estrutura MNM, com os comprimentos da fibra NCF de 30 e 45 mm, os resultados são mostrados nas Figuras 92 e 93. A Figura 92(a) mostra o espectro de transmissão da estrutura MNM para o comprimento L1 com 45 mm, para seis valores diferentes do índice

de refração do meio externo, entre 1,3370 a 1,3840. Pode-se ver que existe uma região de ressonância em torno do comprimento de onda de 1084 nm. A Figura 93(a) mostra o espectro de transmissão da estrutura MNM, para o comprimento L2 com 30 mm para seis valores de índice de refração do meio externo. Com isso, pode-se observar que a potência óptica transmitida possui uma região de ressonância em torno do comprimento de onda de 1600 nm, diferente da região de ressonância obtida para o comprimento L1. De maneira semelhante à da Figura 92, os vales das ressonâncias da Figura 93 estão deslocados entre si, devido à mudança do índice de refração do meio externo à região sensora.

Figura 92 – (a) Resposta espectral do sensor com a mudança do IR externo; (b) deslocamentos do comprimento de onda do vale sob diferentes IR do meio externo

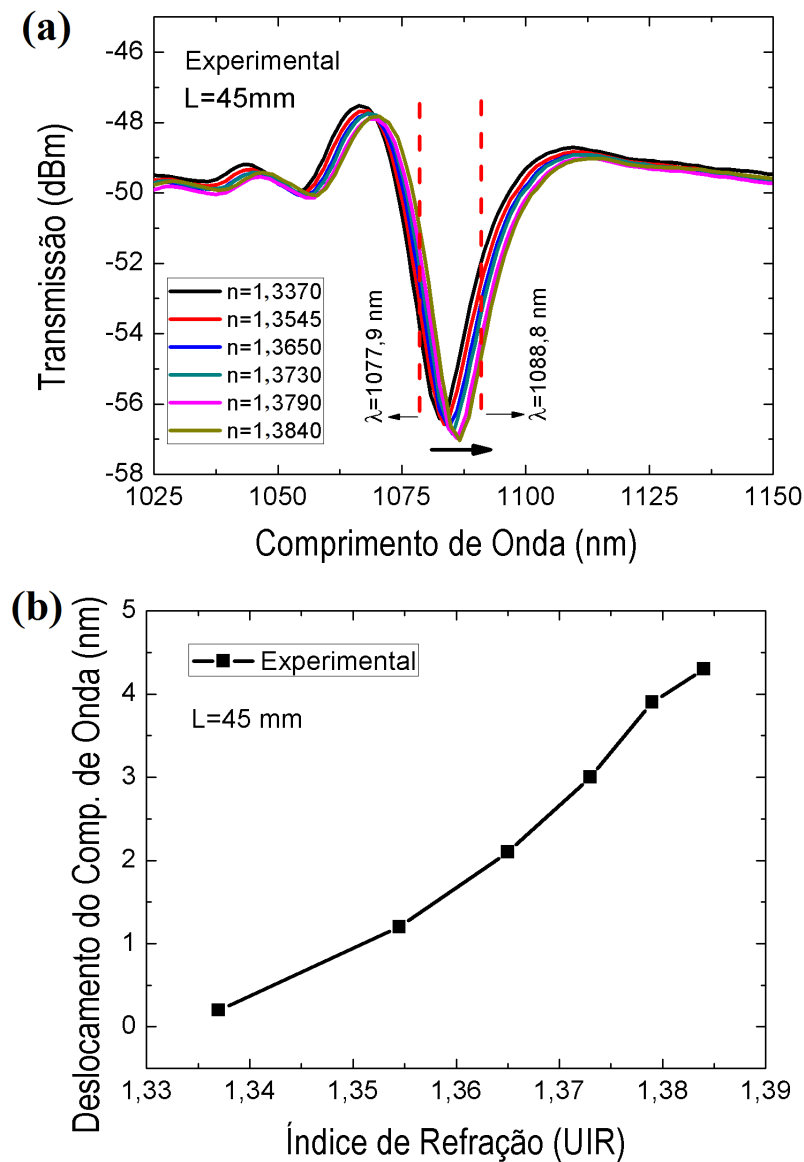
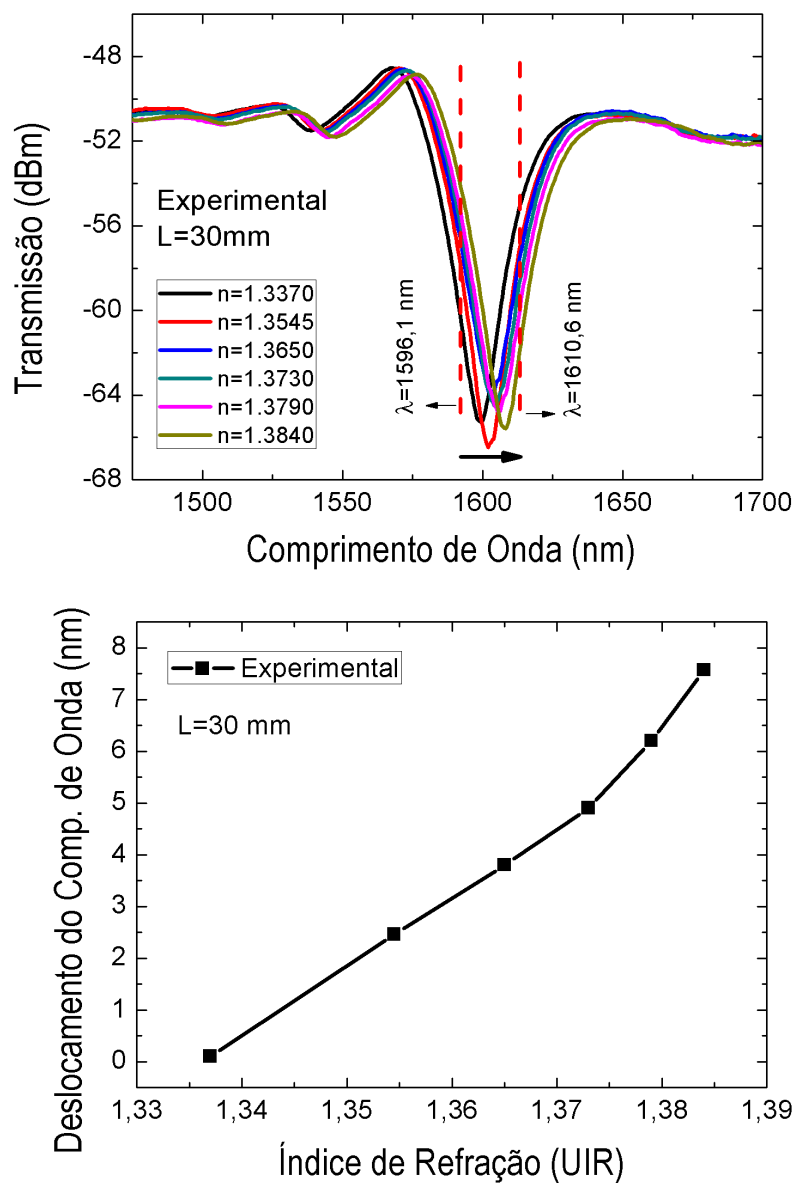


Figura 93 – (a) Resposta espectral do sensor com a mudança do IR externo; (b) deslocamentos do comprimento de onda do vale sob diferentes IR do meio externo



Fonte: o autor, 2022

A relação entre os desvios dos comprimentos de onda de vale, em função das variações de índice de refração, é apresentada nas Figuras 92(b) e 93(b). Os resultados experimentais indicam que o sensor MNM pode fazer medições de índice de refração com base na mudança de vale do comprimento de onda, ou a potência medida no meio das curvas de ressonância, tanto na queda quanto na subida da curva de ressonância. Nesse caso, um comprimento de onda fixo pode ser usado para interrogar o sensor. As sensibilidades em termos de variações de potência óptica transmitida pela variação do índice de refração, e deslocamento do comprimento de onda do pico de ressonância pela variação do índice de refração do meio externo, na faixa de

1,3790 a 1,3840, correspondente a L1 são 116 dB/ RIU ($\lambda = 1077,9$ nm, decida da curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), -92 dB/RIU ($\lambda = 1088,8$ nm, subida da curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840) e 150 nm/RIU (na faixa do IR de 1,3730 a 1,3790). Para L2 é 412 dB/RIU ($\lambda = 1596,1$ nm, decida da curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), -476 dB/RIU ($\lambda = 1610,6$ nm subida da curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840) e 274 nm/RIU (na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), respectivamente. Essas sensibilidades, 150 nm/RIU e 274 nm/RIU, são semelhantes ou maiores do que as relatadas anteriormente (CHEN et al., 2015; LIU et al., 2016).

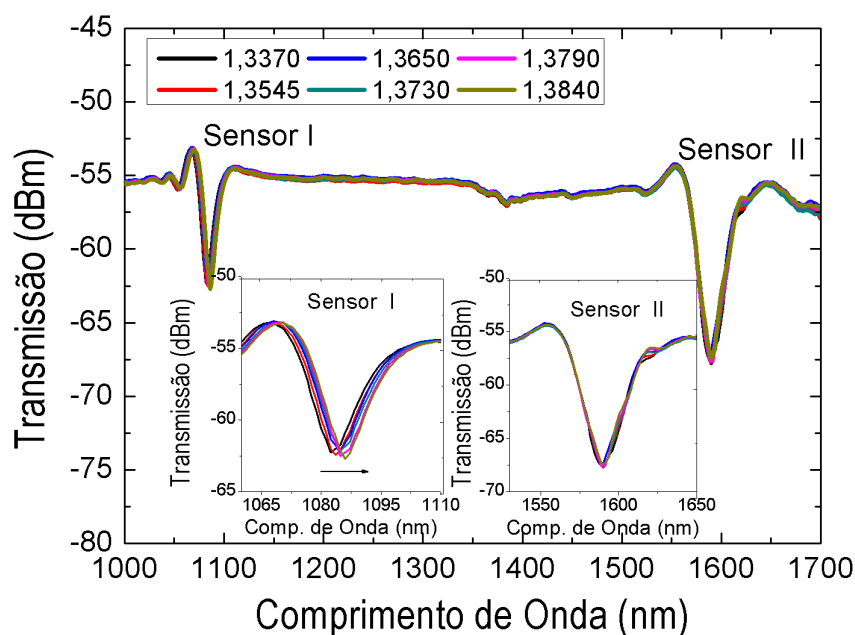
A partir dos resultados, pode-se observar que o comprimento de onda de ressonância nos espectros de transmissão muda para comprimentos de onda maiores à medida que o índice de refração do meio externo aumenta. Além disso, é possível observar que existem regiões de ressonância diferentes para sensores de diferentes comprimentos da fibra NCF, e cada região de ressonância pode ser usada como ponto de medição. Assim, é possível construir uma cascata de dispositivos com base em estruturas de fibra heteronúcleo, que são interrogados em diferentes comprimentos de onda.

5.3.2 Sensor Heteronúcleo em Cascata

O sensor heteronúcleo em cascata é construído com os dois comprimentos de inserção L1 (45 mm) e L2 (30 mm) em uma única fibra, separados por um trecho de fibra multimodo de 0,5 metros. O sistema experimental é mostrado na Figura 79(b), o lado esquerdo do sistema é chamado de Sensor I, com L1, e o lado direito de Sensor II, com L2. Dois recipientes são utilizados para mergulhar as regiões sensoras L1 e L2 em meios líquidos com diferentes índices de refração, como ilustra a Figura 79(b). Realizamos três testes experimentais da seguinte forma: primeiro, fizemos medições exclusivamente no Sensor I, ou seja, mantemos o Sensor II sob o índice de refração do ar, e colocamos o Sensor I em solução aquosa de NaCl com índice de refração variando de 1,3370 a 1,3840. Os resultados deste teste são mostrados na Figura 94. A ressonância no espectro de transmissão gerado pelo Sensor II mantém-se em 1590 nm. Contudo, o comprimento de onda de ressonância gerado pelo Sensor I aumenta de 1082,4 para 1086,45 nm. As sensibilidades em termos de variação de potência e variação de comprimento de onda do vale, em relação a variação do índice de refração do meio externo, são 92 dB/UIR ($\lambda = 1077,9$ nm, decida da curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), -92 dB/UIR ($\lambda = 1088,8$ nm, subida da curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), 160 nm/UIR

(na faixa do IR de 1,3730 a 1,3790). Esses valores estão bem próximos dos resultados obtidos para a estrutura tradicional, medida separadamente, mostrada na Figura 92.

Figura 94 – Caracterização experimental do sensor de estrutura heteronúcleo cascadeado no modo de funcionamento exclusivo do Sensor I ($L_1=45$ nm)

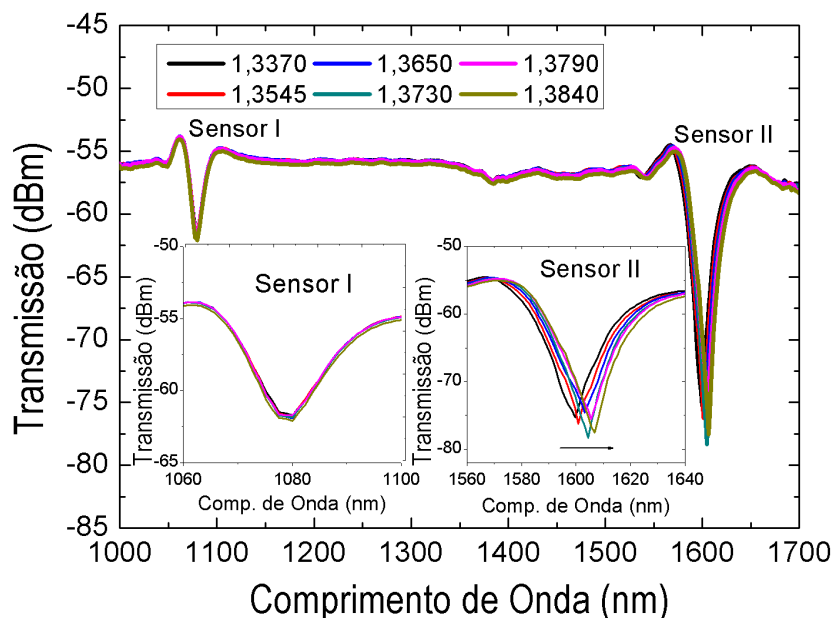


Fonte: o autor, 2022

No segundo teste, as variações de índice de refração são feitas apenas no Sensor II, ou seja, mantemos o Sensor I no ar, e colocamos o Sensor II em solução aquosa de NaCl com índices de refração entre 1,3370 e 1,3840. Os resultados experimentais são mostrados na Figura 95. O comprimento de onda de ressonância gerado pelo Sensor I mantém-se em 1080 nm. Entretanto, o comprimento de onda de ressonância gerado pelo Sensor II aumenta de 1599,6 para 1606,8 nm. As sensibilidades obtidas para o Sensor II são 314 dB/UIR ($\lambda = 1596,1$ nm, decida da curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), -436 dB/UIR ($\lambda = 1610,6$ nm, subida curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), 240 nm/UIR (na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840). Esses valores são próximos aos resultados obtidos para a estrutura tradicional, medida separadamente, mostrados na Figura 93.

Por fim, no terceiro teste experimental, mantemos o Sensor I e Sensor II, realizando medições de variações de índice de refração simultaneamente, ou seja, colocamos o Sensor I e o Sensor II na mesma solução aquosa de NaCl, com índice de refração variando de 1,3370 a 1,3840. Os resultados experimentais são mostrados na Figura 96, onde o comprimento de onda de ressonância gerado pelo Sensor I aumenta de 1082,3 para 1086,38 nm. Além disso,

Figura 95 – Caracterização experimental do sensor de estrutura heteronúcleo cascadeado no modo de funcionamento exclusivo do Sensor II ($L_2=30$ nm)

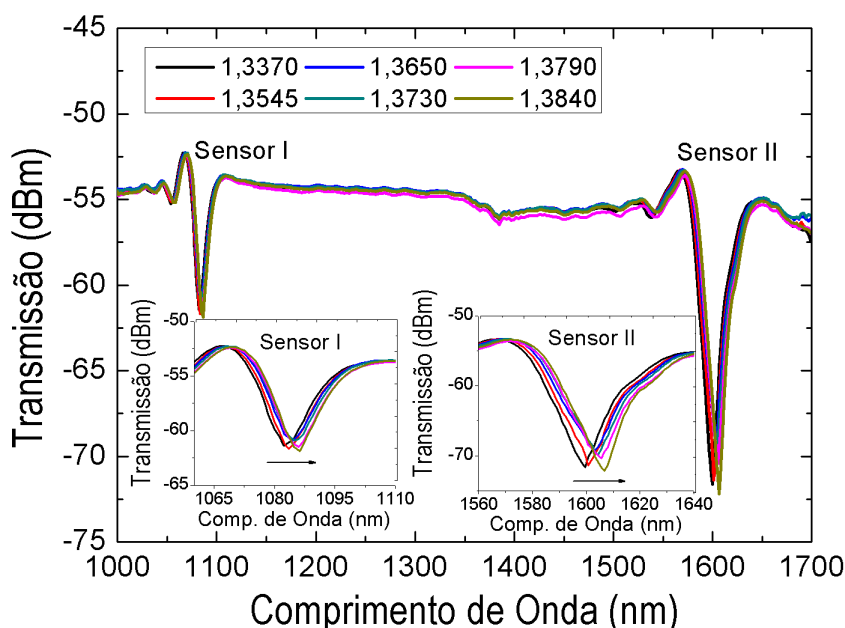


Fonte: o autor, 2022

as sensibilidades são 82 dB/UIR ($\lambda = 1077,9$ nm, decida da curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), -72 dB/UIR ($\lambda = 1088,8$ nm, subida curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), 200 nm/UIR (na faixa do IR de 1,3730 a 1,3790), e o comprimento de onda de ressonância gerado pelo Sensor II aumenta de 1599,6 para 1606,85 nm. Por fim, as sensibilidades são 286 dB/UIR ($\lambda = 1596,1$ nm, decida da curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), -452 dB/UIR ($\lambda = 1610,6$ nm, subida curva, na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840), 250 nm/UIR (na faixa do IR de 1,3790 a 1,3840).

As Figuras 97(a) e (b) mostram a relação entre o deslocamento do comprimento de onda e o índice de refração da solução aquosa de NaCl em diferentes situações experimentais que incluem medições da estrutura heteronúcleo tradicional, com comprimento de inserção L_1 (SL1 Sensor I) e L_2 (SL2 Sensor II), e a estrutura heteronúcleo em cascata, quando apenas um Sensor da estrutura heteronúcleo em cascata realiza medições de variação de índice de refração, enquanto, no outro Sensor o índice de refração é mantido no ar (CSL1, Sensor I realiza medições de IR e Sensor II no ar: CSL2, Sensor II realiza medições de IR e Sensor I no ar), como mostram as Figuras 94 e 95, e quando ambos os dispositivos do sensor de estrutura heteronúcleo em cascata realizam medições simultaneamente (CSL1L2 para o Sensor I e Sensor II), como ilustrado na Figura 96. Os resultados indicam que o deslocamento de comprimento

Figura 96 – Caracterização experimental do sensor em cascata no funcionamento simultâneo do Sensor I e Sensor II

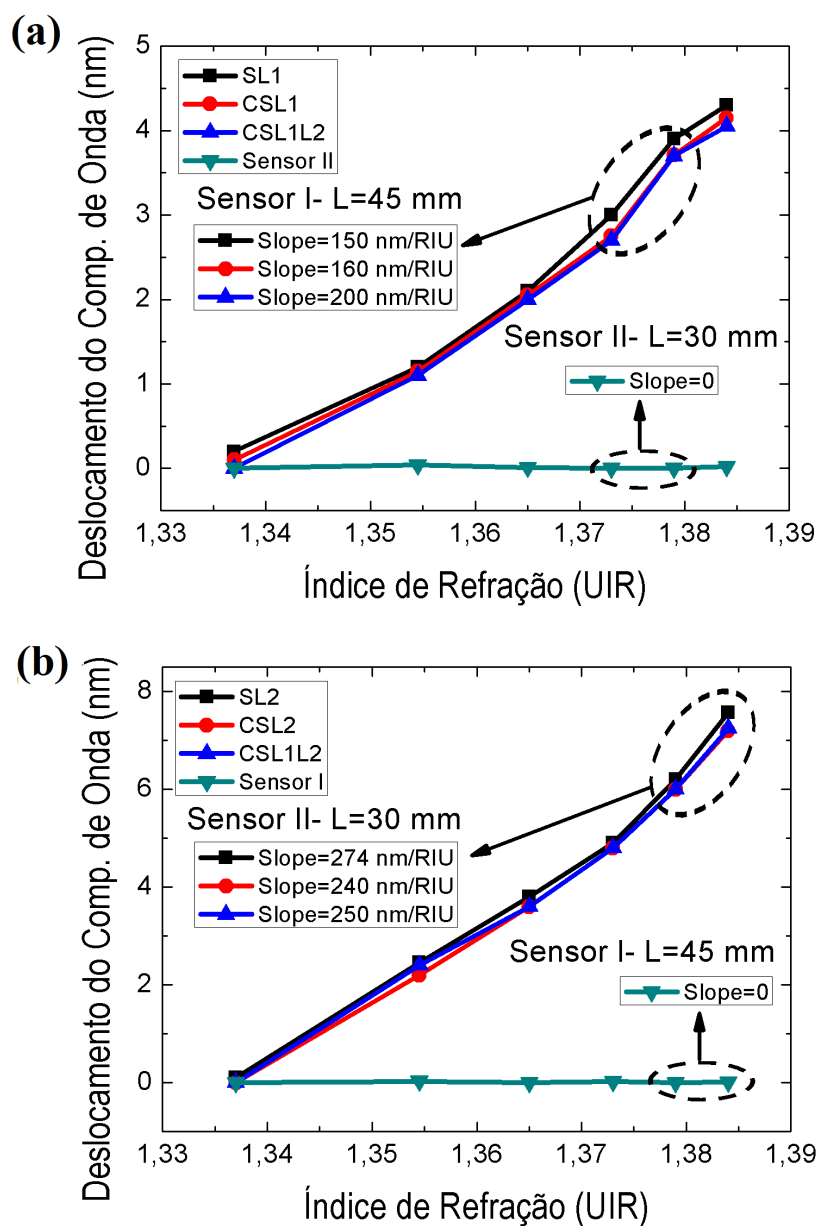


Fonte: o autor, 2022

de onda dos vales e a sensibilidade do sensor em cascata de estrutura heteronúcleo estão de acordo com os resultados da estrutura tradicional, seja com variação de índice de refração apenas em uma região sensora ou nas duas regiões sensoras simultaneamente. Portanto, os resultados experimentais mostram que na cascata de dispositivos não há interferência entre o Sensor I e o Sensor II, eles funcionam de forma independente.

As Figuras 98(a) e (b) mostram a relação entre a transmissão relativa e o índice de refração da solução aquosa de NaCl para um comprimento de onda fixo escolhido no meio das curvas de ressonância (tanto no decaimento quanto na subida das curvas) em diferentes testes, que incluem a estrutura heteronúcleo tradicional (SL1, com comprimento de inserção L1 Sensor I) e (SL2, com comprimento de inserção L2 Sensor II), e a estrutura heteronúcleo em cascata, quando as medições são realizadas apenas por um dos dispositivos do sensor em cascata de estrutura heteronúcleo (CSL1 Sensor I e CSL2 Sensor II), e quando ambos os dispositivos do sensor em cascata realizam medições ao mesmo tempo (CSL1L2, para o Sensor I e Sensor II). Os resultados mostram que a variação em potência transmitida e a sensibilidade do sensor em cascata de estrutura heteronúcleo permanecem em concordância com os resultados da estrutura tradicional, seja apenas uma região sensora realizando medições ou com medições nas duas regiões sensoras simultaneamente.

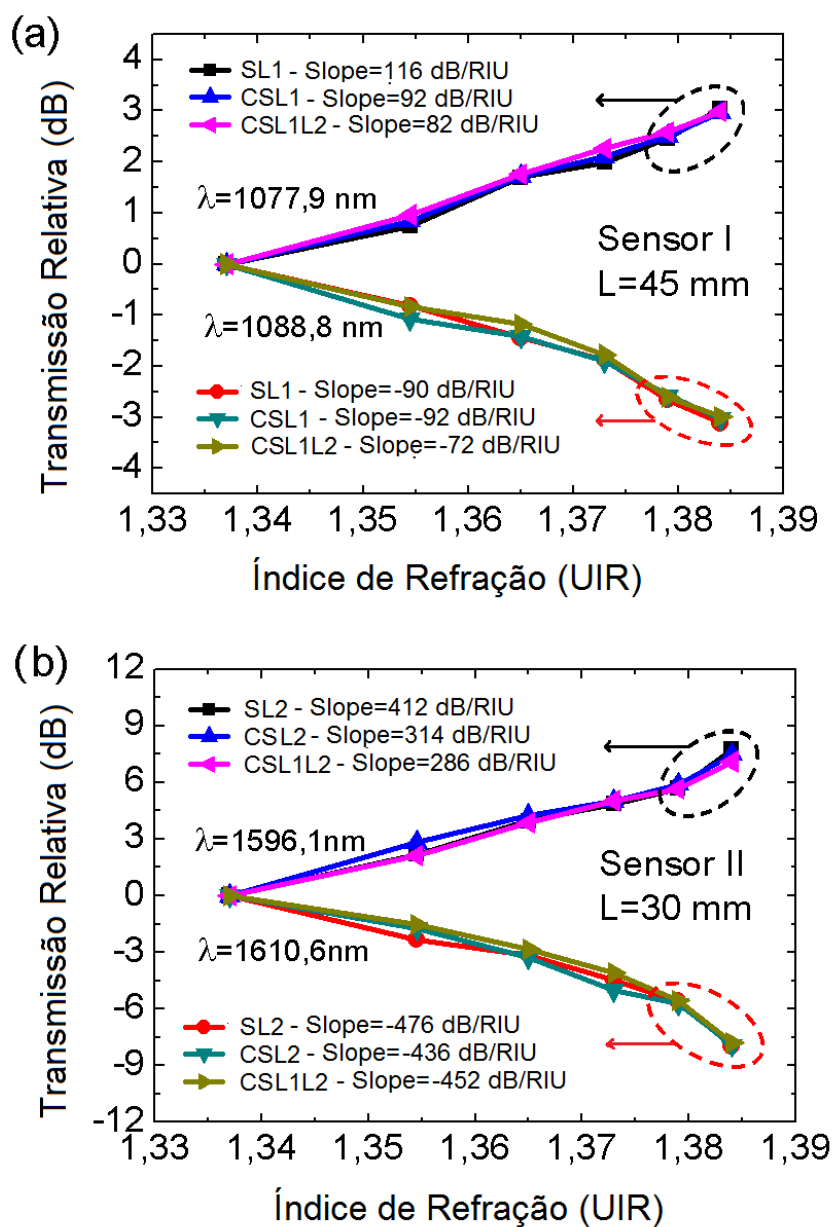
Figura 97 – (a) e (b) mostram relação entre o comprimento de onda de ressonância e o índice de refração da solução em diferentes situações experimentais que inclui a estrutura heteronúcleo tradicional e em cascata



Fonte: o autor, 2022

Portanto, os resultados experimentais mostram que é possível fazer medições simultâneas e independentes sem interferência entre o Sensor I e o Sensor II. Além disso, nosso dispositivo apresenta a diferença de 513 nm entre duas bandas de ressonância, que é definida como o menor comprimento de onda de ressonância do Sensor II menos o maior comprimento de onda de ressonância do Sensor I. Caso a diferença entre as duas bandas de ressonância seja muito pequena, pode acontecer interferência nas medições entre os dois dispositivos.

Figura 98 – (a) e (b) mostram a relação entre a transmissão relativa e o índice de refração da solução aquosa de NaCl para um comprimento de onda fixo em diferentes situações experimentais que inclui a estrutura heteronúcleo tradicional e em cascata



Fonte: o autor, 2022

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esta Tese de Doutorado apresenta a construção de dois dispositivos à base de fibra óptica, primeiro, um sensor com bicamada metálica depositado na face final de uma fibra óptica mono-modo padrão para monitorar corrosão foi proposto e caracterizado por simulações e resultados experimentais. Dois estudos foram apresentados para a região do sensor, com diferentes espessuras e metais, com bicamadas Ti (10 nm)/Al (10 nm) e Ni (5 nm)/Al (5 nm). A espessura e a composição das camadas metálicas foram otimizadas por meio de simulações. Os resultados mostraram que, dependendo das propriedades ópticas e posicionamento dos filmes na fibra, é possível medir a taxa de corrosão de cada metal individualmente. Eles também mostraram que é possível identificar o fim da corrosão da camada metálica externa, mesmo que as taxas de corrosão dos metais sejam próximas, pois o efeito da corrosão na refletância depende do índice de refração do metal. A utilização de uma bicamada, ao invés de uma monocamada como nas publicações anteriores, melhora o intervalo de medição do sensor, mitigando o problema do período cego do sensor identificado em estruturas de monocamada, e fornece a taxa de corrosão logo no início do processo de corrosão do material.

Em seguida, demonstramos experimentalmente uma cascata de dois dispositivos sensores com estruturas de fibra heteronúcleo de interferência multimodo, com resposta independente, que são interrogados em diferentes comprimentos de onda para detecção de índice de refração multiponto. Diferentemente de relatos anteriores na literatura, usamos estruturas de fibra multimodo/sem núcleo com menor perda de inserção projetadas para ter diferentes comprimentos de onda de ressonância, que são arranjadas em série, em vez de em paralelo. A configuração em série implica que não são necessários acopladores de fibra, circuladores ou refletores, o que simplifica o sistema de sensores. Ao combinar estruturas de diferentes comprimentos de inserção heteronúcleo, podemos ajustar o comprimento de onda de vale do dispositivo. Para o comprimento de inserção da fibra heteronúcleo de $L_1=45$ mm, o dispositivo apresenta um vale centrado em 1082,5 nm com 15,1 nm FWHM (largura a meia altura) para meio externo IR de 1,3370. Ele se desloca 4,1 nm para comprimentos de onda mais longos à medida que o índice de refração do meio externo aumenta de 1,3370 para 1,3840. Para a estrutura de heteronúcleo $L_2 = 30$ mm, o vale é centrado em 1599,7 nm com 23,3 nm FWHM para meio externo IR de 1,3370, que se desloca 7,47 nm à medida que o índice de refração aumenta de 1,3370 para 1,3840. Os resultados experimentais estão de acordo com os resultados de simulação obtidos

a partir de uma abordagem teórica do efeito interferométrico que ocorre entre os modos de propagação em estruturas heteronúcleo em fibras ópticas.

As sensibilidades do dispositivo são apresentadas em termos de mudança de comprimento de onda de vale e também em termos de intensidade em relação as variações de índice de refração, em comprimentos de onda específicos. Com a sensibilidade obtida para os dois dispositivos, 116 dB/UIR e -476 dB/UIR, a resolução dos sensores é estimada em $8,6 \times 10^{-5}$ UIR e $2,1 \times 10^{-5}$ UIR, respectivamente, assumindo que o instrumento de medição tenha resolução de 0,01 dB. A sensibilidade em termos de deslocamento de comprimento de onda de vale em relação às variações de IR é de cerca de 250 nm/UIR, a resolução dos dispositivos é estimada em cerca de 2×10^{-4} UIR, assumindo que o instrumento de medição tem uma resolução de 0,05 nm.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DA TESE DE DOUTORADO

Esta Tese contribui com os seguintes aspectos:

- Desenvolvimento de um sensor à fibra óptica com dupla camada metálica na faceta para monitorar processos corrosivos. O sensor de Ti/Al proposto apresenta uma estrutura otimizada com 20 nm da bicamada metálica, com uma faixa de detecção duas vezes maior que a reportada na literatura. É importante destacar que a escolha dos metais e de suas espessuras tem impacto na faixa de operação do sensor.
- Elaboração de um sensor para detectar variações de índice de refração usando uma cascata de dispositivos com base em estruturas de fibra heteronúcleo, que funcionam de forma independente, e são interrogados em diferentes comprimentos de onda. Os perfis são formados por estruturas de fibra multimodo/sem núcleo com menor perda de inserção. Esse sensor exibe boas figuras de mérito, em termos de sensibilidade e resolução e apresenta uma diferença de 513 nm entre duas bandas de interrogação.
- Implementação de modelos computacionais tanto para o elemento sensor com dupla camada metálica na faceta da fibra, para investigar a influência dos parâmetros do elemento sensor como espessuras e o posicionamento dos filmes finos na fibra, quanto para o elemento sensor à fibra óptica de estrutura Heteronúcleo, a partir da avaliação da influência do comprimento da região sensora.

- Realização de uma revisão da literatura com as principais estruturas e técnicas para monitorar processos corrosivos usando fibra óptica. Realização de uma análise qualitativa dos sensores de corrosão revisados, com base em parâmetros como perfil de elemento sensor e obtenção da taxa de corrosão.
- Realização de uma ampla revisão da literatura sobre os sensores de índice de refração à base de fibra óptica com estrutura heteronúcleo. É apresentada a estrutura e processos de fabricação dos elementos sensores, além de uma análise da faixa de operação, sensibilidade e resolução.

6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Estudar os danos provocados no sistema sensor de corrosão quando exposto a altas temperaturas, superiores a 200 °C, levando em consideração que altas temperaturas podem acelerar o processo de corrosão no metal. Esse estudo será feito nos meios gasosos e líquidos.
- Investigar e caracterizar o processo de corrosão de outros metais, como o ferro, zinco e cobre, na composição da bicamada metálica, assim como outros agentes corrosivos à temperatura ambiente e em altas temperaturas.
- Construir um protótipo para o sensor de corrosão para a realização de aplicações específicas, como monitoramento em dutos de petróleo e gás, interiores de máquinas elétricas e outros. Considerando a necessidade de projetar uma proteção para a região sensora capaz de resistir a ambientes hostis com altas temperaturas e a tensões mecânicas oriundos do ambiente. Essa proteção pode ser construída usando um polímero especial capaz de resistir a tensões mecânicas e altas temperaturas.
- Testar o sensor de índice de refração à fibra óptica com estrutura heteronúcleo para detecção de índices de refração em faixas específicas, para aplicações em química e bioquímica, por exemplo, detecção de óleo em água e reações químicas em baterias.
- Investigar os efeitos de flexão e vibração na estrutura de fibra heteronúcleo MNM. Construir um modelo teórico ou utilizar o COMSOL como plataforma de modelagem,

para simular o comportamento da luz em uma estrutura de fibra MNM dobrada ou sob efeitos de vibração. Serão investigadas aplicações específicas, como um sensor de fluxo de ar e um sensor de vibração baseados neste efeito.

- Testar novos comprimentos de fibra NCF na construção do perfil heteronúcleo MNM para realizar detecção de índice de refração em torno das faixas de comprimento de onda de 1310 e 1550 nm. Assim, construir uma nova cascata de dispositivos multiplexados em comprimentos de onda que compreendem as janelas que transmitem sinais de forma mais eficaz.

REFERÊNCIAS

- ABDERRAHMANE, S.; HIMOUR, A.; KHERRAT, R.; CHAILLEUX, E.; JAFFREZIC-RENAULT, N.; STREMSDOERFER, G. An optical fibre corrosion sensor with an electroless deposit of Ni-P. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 75, n. 1-2, p. 1-4, 2001.
- AISYAH, P. Y.; HATTA, A. M.; PRATAMA, D. Y. Design of SMS (single mode-multi mode coreless-single mode) optical fiber as corrosion sensor. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Second International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2016)*. [S.l.], 2016. v. 10150, p. 101500Q.
- AKITA, S.; SASAKI, H.; WATANABE, K.; SEKI, A. A humidity sensor based on a hetero-core optical fiber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 147, n. 2, p. 385-391, 2010.
- ALMUBAIED, O.; CHAI, H. K.; ISLAM, M. R.; LIM, K.-S.; TAN, C. G. Monitoring corrosion process of reinforced concrete structure using FBG strain sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 66, n. 8, p. 2148-2155, 2017.
- ALVAREZ, R. B.; MARTIN, H. J.; HORSTEMEYER, M.; CHANDLER, M. Q.; WILLIAMS, N.; WANG, P. T.; RUIZ, A. Corrosion relationships as a function of time and surface roughness on a structural ae44 magnesium alloy. *Corrosion Science*, Elsevier, v. 52, n. 5, p. 1635-1648, 2010.
- ALVES, H. P.; NASCIMENTO, J. F.; FONTANA, E.; COÊLHO, I. J.; MARTINS-FILHO, J. F. Transition layer and surface roughness effects on the response of metal-based fiber-optic corrosion sensors. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 36, n. 13, p. 2597-2605, 2018.
- ANTONIO-LOPEZ, J.; CASTILLO-GUZMAN, A.; MAY-ARRIOJA, D.; SELVAS-AGUILAR, R.; LIKAMWA, P. Tunable multimode-interference bandpass fiber filter. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, v. 35, n. 3, p. 324-326, 2010.
- BAI, Y.; YIN, B.; LIU, C.; LIU, S.; LIAN, Y.; JIAN, S. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on NFN structure. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 26, n. 21, p. 2193-2196, 2014.
- BARABÁSI, A.-L.; STANLEY, H. E. et al. *Fractal concepts in surface growth*. [S.l.]: Cambridge university press, 1995.
- BENNETT, K. D.; MCLAUGHLIN, L. Monitoring of corrosion in steel structures using optical fiber sensors. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Smart Structures and Materials 1995: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. [S.l.], 1995. v. 2446, p. 48-59.
- BUENO, A.; CAUCHETEUR, C.; KINET, D.; MÉGRET, P. Refractive index sensors based on optical fiber hetero-core structures and Fabry-Pérot interferometers. In: SPIE. *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors*. [S.l.], 2013. v. 8794, p. 149-152.
- BURKHARD, H.; DINGES, H.; KUPHAL, E. Optical properties of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-y}\text{As}_y$, InP , GaAs , and GaP determined by ellipsometry. *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, v. 53, n. 1, p. 655-662, 1982.

CHEN, Y.; HAN, Q.; LIU, T.; XIAO, H. Wavelength dependence of the sensitivity of all-fiber refractometers based on the singlemode-multimode-singlemode structure. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 6, n. 4, p. 1–7, 2014.

CHEN, Y.; WANG, Y.; CHEN, R.; YANG, W.; LIU, H.; LIU, T.; HAN, Q. A hybrid multimode interference structure-based refractive index and temperature fiber sensor. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 16, n. 2, p. 331–335, 2015.

CHIAVAIOLI, F.; JANNER, D. Fiber optic sensing with lossy mode resonances: Applications and perspectives. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 39, n. 12, p. 3855–3870, 2021.

COMSOL. *Wave Optics Module User's Guide, COMSOL Multiphysics*. [S.l.]: publisher=American Association of Physics Teachers, 2015. 54-60 p.

COMSOL, M. *Wave Optics Module*. [S.l.]: Revista COMSOL, 2015.

COMSOL, M. *COMSOL Multiphysics: The Finite Element Method (FEM)*. 2016. Nov., 2016. Disponível em: <<<http://www.comsol.com>>>. Acesso em Abril 9, 2020.

DEY, K.; ROY, S.; KISHORE, P.; SHANKAR, M. S.; RAMESH, B.; RANJAN, R. Analysis and performance of edge filtering interrogation scheme for FBG sensor using SMS fiber and OTDR. *Results in Optics*, Elsevier, v. 2, p. 100039, 2021.

DONG, S.; LIAO, Y.; TIAN, Q. Intensity-based optical fiber sensor for monitoring corrosion of aluminum alloys. *Applied optics*, Optical Society of America, v. 44, n. 27, p. 5773–5777, 2005.

DONG, S.; LIAO, Y.; TIAN, Q.; LUO, Y.; QIU, Z.; SONG, S. Optical and electrochemical measurements for optical fibre corrosion sensing techniques. *Corrosion science*, Elsevier, v. 48, n. 7, p. 1746–1756, 2006.

DONG, Y.; SUN, C.; XIAO, H.; DONG, C.; JIAN, S. Twist and temperature characteristics of the PD-NSN fiber structure based on in-line Mach-Zehnder interferometer. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 33, p. 39–44, 2017.

DU, C.; TANG, Q.; ZHOU, J.; GUO, X.; YU, T.; WANG, X. Fiber optic sensors based on photoacoustic effect for rebar corrosion measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 68, n. 11, p. 4559–4565, 2019.

DUHEM, O.; HENNINOT, J.; DOUAY, M. Study of in fiber Mach-Zehnder interferometer based on two spaced 3-dB long period gratings surrounded by a refractive index higher than that of silica. *Optics Communications*, Elsevier, v. 180, n. 4-6, p. 255–262, 2000.

EFENDIOGLU, H.; SAHIN, A.; YILDIRIM, T.; FIDANBOYLU, K. Design of hetero-core smart fiber optic macrobend sensors. In: IEEE. *2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. [S.l.], 2011. p. 11–372.

FAN, L.; BAO, Y. Review of fiber optic sensors for corrosion monitoring in reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, v. 120, p. 104029, 2021.

FAN, L.; BAO, Y.; MENG, W.; CHEN, G. In-situ monitoring of corrosion-induced expansion and mass loss of steel bar in steel fiber reinforced concrete using a distributed fiber optic sensor. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 165, p. 679–689, 2019.

FAN, L.; TAN, X.; ZHANG, Q.; MENG, W.; CHEN, G.; BAO, Y. Monitoring corrosion of steel bars in reinforced concrete based on helix strains measured from a distributed fiber optic sensor. *Engineering Structures*, Elsevier, v. 204, p. 110039, 2020.

FONTANA, E. *Eletromagnetismo - Parte II: Capítulo 10 - Guias de Onda*. 2013. Out., 2013. Disponível em: <<<http://lsi.fotonica.ufpe.br/fontana/Eletromagnetismo2>>>. Acesso em Abril 9, 2020.

FONTANA, E.; PANTELL, R. Characterization of multilayer rough surfaces by use of surface-plasmon spectroscopy. *Physical Review B*, APS, v. 37, n. 7, p. 3164, 1988.

FREDJ, N.; BURLEIGH, T.; HEIDERSBACH, K.; CROWDER, B. Corrosion of carbon steel in waters of varying purity and velocity. In: ONEPETRO. *CORROSION 2012*. [S.l.], 2012.

FUENTES-RUBIO, Y.-A.; DOMÍNGUEZ-CRUZ, R.-F.; GUZMÁN-SEPÚLVEDA, J.-R. Multipoint fiber optics refractive index sensor based on multimode interference effects. *Applied Optics*, Optica Publishing Group, v. 60, n. 31, p. 9691–9695, 2021.

GENTIL, V. *Corrosão*. [S.l.]: Grupo Gen - Ltc, 2011.

GIALLORENZI, T. G.; BUCARO, J. A.; DANDRIDGE, A.; COLE, J. H. 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*, IEEE, v. 23, n. 9, p. 44–50, 1986.

GOH, L. S.; KUMEKAWA, N.; WATANABE, K.; SHINOMIYA, N. Hetero-core spliced optical fiber SPR sensor system for soil gravity water monitoring in agricultural environments. *Computers and electronics in agriculture*, Elsevier, v. 101, p. 110–117, 2014.

GRATTAN, S. K.; TAYLOR, S. E.; SUN, T.; BASHEER, P.; GRATTAN, K. T. Monitoring of corrosion in structural reinforcing bars: performance comparison using in situ fiber-optic and electric wire strain gauge systems. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 9, n. 11, p. 1494–1502, 2009.

GUO, C.; NIU, P.; WANG, J.; ZHAO, J.; ZHANG, C. Dual-point reflective refractometer based on parallel no-core fiber/FBG structure. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 40, p. 46–51, 2018.

GUZMÁN-SEPÚLVEDA, J. R.; GUZMÁN-CABRERA, R.; CASTILLO-GUZMÁN, A. A. Optical sensing using fiber-optic multimode interference devices: a review of nonconventional sensing schemes. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 5, p. 1862, 2021.

HADJIFOTIOU, T.; MCFARLANE, J. Fibre optic communications. In: *Telecommunications Engineer's Reference Book*. [S.l.]: Elsevier, 1993. p. 53–1.

HAN, G.; YAN, J.; GUO, Z.; GREENWOOD, D.; MARCO, J.; YU, Y. A review on various optical fibre sensing methods for batteries. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 150, p. 111514, 2021.

HATTA, A. M. et al. Singlemode-multimode-singlemode optical fibre structures for optical sensing. *Dublin Institute of Technology, Dublin*, 2009.

HAUS, J. *Optical sensors: basics and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

HOSOKI, A.; NISHIYAMA, M.; IGAWA, H.; CHOI, Y.; WATANBEA, K. Surface plasmon resonance hydrogen sensor based on hetero-core optical fiber structure. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 47, p. 128–131, 2012.

HOSOKI, A.; NISHIYAMA, M.; KUMEKAWA, N.; WATANABE, K.; YATABE, R.; TAHARA, Y.; ONODERA, T.; SUGIYAMA, A.; SAKURAI, N. Hetero-core structured fiber optic chemical sensor based on surface plasmon resonance using Au/lipid films. *Optics Communications*, Elsevier, v. 524, p. 128751, 2022.

HSU, J.-M.; ZHENG, W.-H.; CHEN, J.-Z.; LEE, C.-L.; HORNG, J.-S. Temperature fiber sensors based on Mach-Zehnder interferometer with sturdy structure. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 15, n. 12, p. 6995–7000, 2015.

HU, W.; CAI, H.; YANG, M.; TONG, X.; ZHOU, C.; CHEN, W. Fe–C-coated fibre Bragg grating sensor for steel corrosion monitoring. *Corrosion Science*, Elsevier, v. 53, n. 5, p. 1933–1938, 2011.

HUANG, L.-S.; LIN, G.-R.; FU, M.-Y.; SHENG, H.-J.; SUN, H.-T.; LIU, W.-F. A refractive-index fiber sensor by using no-core fibers. In: IEEE. *2013 International Symposium on Next-Generation Electronics*. [S.l.], 2013. p. 100–102.

HUANG, S.-Y.; BLAKE, J. N.; KIM, B. Y. Perturbation effects on mode propagation in highly elliptical core two-mode fibers. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 23–33, 1990.

IGA, M.; HIRAMA, K.; HOTTA, S.; IGARASHI, H.; SEKI, A.; WATANABE, K.; KUBOTA, Y. Novel fiber optic sensor using heterocore structures and its applications. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology (ICOSN 2001)*. [S.l.], 2001. v. 4416, p. 78–81.

IGA, M.; SEKI, A.; KUBOTA, Y.; WATANABE, K. Acidity measurements based on a hetero-core structured fiber optic sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 96, n. 1-2, p. 234–238, 2003.

IGA, M.; SEKI, A.; WATANABE, K. Hetero-core structured fiber optic surface plasmon resonance sensor with silver film. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 101, n. 3, p. 368–372, 2004.

IGA, M.; SEKI, A.; WATANABE, K. Gold thickness dependence of spr-based hetero-core structured optical fiber sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 106, n. 1, p. 363–368, 2005.

JACKSON, J. D. *Classical electrodynamics*. [S.l.]: American Association of Physics Teachers, 1999.

JOHNSON, P.; CHRISTY, R. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd. *Physical review B*, APS, v. 9, n. 12, p. 5056, 1974.

JUNG, Y.; KIM, S.; LEE, D.; OH, K. Compact three segmented multimode fibre modal interferometer for high sensitivity refractive-index measurement. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 17, n. 5, p. 1129, 2006.

KAZANSKIY, N.; KHONINA, S.; BUTT, M.; KAŻMIERCZAK, A.; PIRAMIDOWICZ, R. State-of-the-art optical devices for biomedical sensing applications—a review. *Electronics*, MDPI, v. 10, n. 8, p. 973, 2021.

KIM, Y.-J.; PAEK, U.-C.; LEE, B. H. Measurement of refractive-index variation with temperature by use of long-period fiber gratings. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 27, n. 15, p. 1297–1299, 2002.

KÖHLER, M. *Etching in microsystem technology*. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2008.

KOYAMA, Y.; NISHIYAMA, M.; WATANABE, K. Smart textile using hetero-core optical fiber for heartbeat and respiration monitoring. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 18, n. 15, p. 6175–6180, 2018.

KWAKERNAAK, A.; HOFSTEDE, J.; POULIS, J.; BENEDICTUS, R. Improvements in bonding metals for aerospace and other applications. In: *Welding and Joining of Aerospace Materials*. [S.I.]: Elsevier, 2012. p. 235–287.

LEE, B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical fiber technology*, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 57–79, 2003.

LEE, B. H.; NISHII, J. Notch filters based on cascaded multiple long-period fibre gratings. *Electronics Letters*, v. 34, n. 19, p. 1872, 1998.

LEUNG, A.; SHANKAR, P. M.; MUTHARASAN, R. A review of fiber-optic biosensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 125, n. 2, p. 688–703, 2007.

LEUNG, C.; WAN, K.; CHEN, L. A novel optical fiber sensor for steel corrosion in concrete structures. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, v. 8, n. 3, p. 1960–1976, 2008.

LI, C.; NING, T.; WEN, X.; LI, J.; ZHENG, J.; YOU, H.; CHEN, H.; ZHANG, C.; JIAN, W. Strain and temperature discrimination using a fiber Bragg grating and multimode interference effects. *Optics Communications*, Elsevier, v. 343, p. 6–9, 2015.

LI, C.; NING, T.; ZHANG, C.; LI, J.; WEN, X.; PEI, L.; GAO, X.; LIN, H. Liquid level measurement based on a no-core fiber with temperature compensation using a fiber Bragg grating. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 245, p. 49–53, 2016.

LI, J.; LÜ, L.; LAI, M. O.; RALPH, B. *Image-based fractal description of microstructures*. [S.I.]: Springer Science & Business Media, 2003.

LI, L.; XIA, L.; WUANG, Y.; RAN, Y.; YANG, C.; LIU, D. Novel NCF-FBG interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 24, n. 24, p. 2268–2271, 2012.

LIN, G.-R.; FU, M.-Y.; LEE, C.-L.; LIU, W.-F. Dual-parameter sensor based on a no-core fiber and fiber Bragg grating. *Optical Engineering*, SPIE, v. 53, n. 5, p. 050502, 2014.

LIN, G.-R.; MAU, J.-C.; TSAI, P.-T.; SUN, H.-T.; SHENG, H.-J.; FU, M.-Y.; LIU, W.-F. Refractive index sensor base on hetero-core-structure fiber. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*. [S.I.], 2011. p. C566.

- LIU, D.; KUMAR, R.; WEI, F.; HAN, W.; MALLIK, A. K.; YUAN, J.; YU, C.; KANG, Z.; LI, F.; LIU, Z. et al. Highly sensitive twist sensor based on partially silver coated hollow core fiber structure. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 36, n. 17, p. 3672–3677, 2018.
- LIU, X.; ZHANG, X.; LIU, Y.; LIU, Z.; PENG, W. Multi-point fiber-optic refractive index sensor by using coreless fibers. *Optics Communications*, Elsevier, v. 365, p. 168–172, 2016.
- LIU, Y.; PENG, W. Fiber-optic surface plasmon resonance sensors and biochemical applications: a review. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 39, n. 12, p. 3781–3791, 2021.
- LIU, Y.; WILLIAMS, J.; ZHANG, L.; BENNION, I. Phase shifted and cascaded long-period fiber gratings. *Optics communications*, Elsevier, v. 164, n. 1-3, p. 27–31, 1999.
- LIU, Z.; LIU, L.; ZHU, Z.; ZHANG, Y.; WEI, Y.; ZHANG, Y.; YANG, J.; YUAN, L. Dual-channel surface plasmon resonance refractive index sensor based on modified hetero-core structure fiber. *Optics Communications*, Elsevier, v. 403, p. 290–295, 2017.
- LIU, Z.; WEI, Y.; ZHANG, Y.; LIU, C.; ZHANG, Y.; ZHAO, E.; YANG, J.; LIU, C.; YUAN, L. Distributed fiber surface plasmon resonance sensor based on the incident angle adjusting method. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 40, n. 19, p. 4452–4455, 2015.
- LU, H.; WANG, X.; ZHANG, S.; WANG, F.; LIU, Y. A fiber-optic sensor based on no-core fiber and Faraday rotator mirror structure. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 101, p. 507–514, 2018.
- LU, X.; THOMAS, P. J.; HELLEVANG, J. O. A review of methods for fibre-optic distributed chemical sensing. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 13, p. 2876, 2019.
- LUO, H.; SUN, Q.; XU, Z.; LIU, D.; ZHANG, L. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using multimode microfiber-based dual Mach-Zehnder interferometer. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 39, n. 13, p. 4049–4052, 2014.
- LUO, Y.; XIA, L.; YU, C.; LI, W.; SUN, Q.; WANG, Y.; LIU, D. Multi-parameter optical fiber sensor based on enhanced multimode interference. *Optics Communications*, Elsevier, v. 344, p. 120–124, 2015.
- MA, J.; LU, B.; SUN, D.; WANG, Z.; ZHAO, X. Experimental study on a novel corrosion sensor for steel strand using FBG. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2021*. [S.l.], 2021. v. 11591, p. 1159124.
- MAEDA, M.; KADOKURA, M.; AOKI, R.; KAWAKAMI, M.; KOYAMA, Y.; NISHIYAMA, M.; WATANABE, K. Non-invasive swallowing examination device using hetero-core fiber optic pressure sensor. In: IEEE. *2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)*. [S.l.], 2021. p. 315–316.
- MARCUSE, D. Loss analysis of single-mode fiber splices. *Bell system technical journal*, Wiley Online Library, v. 56, n. 5, p. 703–718, 1977.
- MARTINS-FILHO, J. F.; FONTANA, E.; GUIMARAES, J.; PIZZATO, D.; COELHO, I. S. Fiber-optic-based corrosion sensor using OTDR. In: IEEE. *Sensors, 2007 IEEE*. [S.l.], 2007. p. 1172–1174.

- MATIAS, I. R.; IKEZAWA, S.; CORRES, J. *Fiber Optic Sensors: current status and future possibilities*. [S.l.]: Springer, 2016. v. 21.
- MCPEAK, K. M.; JAYANTI, S. V.; KRESS, S. J.; MEYER, S.; IOTTI, S.; ROSSINELLI, A.; NORRIS, D. J. Plasmonic films can easily be better: rules and recipes. *ACS photonics*, ACS Publications, v. 2, n. 3, p. 326–333, 2015.
- MIKAMI, M.; KOMATSU, D.; HOSOKI, A.; NISHIYAMA, M.; IGAWA, H.; SEKI, A.; KUBODERA, S.; WATANABE, K. Quick response hydrogen LSPR sensor based on a hetero-core fiber structure with palladium nanoparticles. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 29, n. 1, p. 48–58, 2021.
- MIN, R.; LIU, Z.; PEREIRA, L.; YANG, C.; SUI, Q.; MARQUES, C. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 140, p. 107082, 2021.
- MIROVITSKII, D. Distributed and quasi-distributed optical fiber sensors. *Measurement Techniques*, Springer, v. 34, n. 12, p. 1269–1272, 1991.
- MIYAGI, M.; NISHIDA, S. An approximate formula for describing dispersion properties of optical dielectric slab and fiber waveguides. *JOSA*, Optica Publishing Group, v. 69, n. 2, p. 291–293, 1979.
- MOHAMMED, W. S.; MEHTA, A.; JOHNSON, E. G. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 469, 2004.
- MOHAMMED, W. S.; SMITH, P. W.; GU, X. All-fiber multimode interference bandpass filter. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 31, n. 17, p. 2547–2549, 2006.
- MUKAI, T.; FUKANO, H. Multipoint refractive index measurement using multimode interference-based fiber-optic sensors driven by an integrable tunable laser assembly. *Japanese Journal of Applied Physics*, IOP Publishing, v. 59, n. SO, p. SOOE02, 2020.
- NASCIMENTO, J. F.; SILVA, M. J.; COÊLHO, I. J.; CIPRIANO, E.; MARTINS-FILHO, J. F. Amplified OTDR systems for multipoint corrosion monitoring. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, v. 12, n. 3, p. 3438–3448, 2012.
- NISHIYAMA, M.; SASAKI, H.; WATANABE, K. Wearable sensing clothes embedding a hetero-core optic fiber for recognizing arm segment posture and motion. In: IEEE. *SENSORS, 2006 IEEE*. [S.l.], 2006. p. 1519–1522.
- NISHIYAMA, M.; SASAKI, H.; WATANABE, K. A deformation sensitive pad-structure embedded with hetero-core optic fiber sensors. *Sensors and actuators A: physical*, Elsevier, v. 136, n. 1, p. 205–211, 2007.
- NISHIYAMA, M.; WATANABE, K. Wearable sensing glove with embedded hetero-core fiber-optic nerves for unconstrained hand motion capture. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 58, n. 12, p. 3995–4000, 2009.
- OKAMOTO, K. *Fundamentals of Optical Waveguides* 2nd edn (New York: Academic). 2006.
- OKIMURO, R.; NISHIYAMA, M.; HOSOKI, A.; WATANABE, K. Hetero-core fiber optic humidity sensor with layer-by-layer polymer film including TiO₂ nanoparticles using UV light. In: IEEE. *2015 9th International Conference on Sensing Technology (ICST)*. [S.l.], 2015. p. 320–324.

- OLIVEIRA, R.; ARISTILDE, S.; OSÓRIO, J. H.; FRANCO, M. A.; BILRO, L.; NOGUEIRA, R. N.; CORDEIRO, C. M. Intensity liquid level sensor based on multimode interference and fiber Bragg grating. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 27, n. 12, p. 125104, 2016.
- OLIVEIRA, R.; MARQUES, T. H.; BILRO, L.; NOGUEIRA, R.; CORDEIRO, C. M. Multiparameter POF sensing based on multimode interference and fiber Bragg grating. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 35, n. 1, p. 3–9, 2017.
- OLIVEIRA, R.; OSÓRIO, J. H.; ARISTILDE, S.; BILRO, L.; NOGUEIRA, R. N.; CORDEIRO, C. M. Simultaneous measurement of strain, temperature and refractive index based on multimode interference, fiber tapering and fiber Bragg gratings. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 27, n. 7, p. 075107, 2016.
- PALM, K. J.; MURRAY, J. B.; NARAYAN, T. C.; MUNDAY, J. N. Dynamic optical properties of metal hydrides. *Acs Photonics*, ACS Publications, v. 5, n. 11, p. 4677–4686, 2018.
- PEREZ, J. L. C.; GUTIÉRREZ-GUTIÉRREZ, J.; MAYORAL, C. P.; PÉREZ-CAMPOS, E. L.; CANSECO, M. d. S. P.; CARRILLO, L. T.; MAYORAL, L. P.-C.; TREVIÑO, M. V.; APREZA, E. L.; LAGUNA, R. R. Fiber optic sensors: a review for glucose measurement. *Biosensors*, MDPI, v. 11, n. 3, p. 61, 2021.
- QI, Y.; MA, L.; KANG, Z.; BAI, Y.; YIN, B.; JIAN, S. Highly sensitive curvature sensor based on a multicladding fiber sandwiched dual no-core fibers structure. *Applied Optics*, Optica Publishing Group, v. 53, n. 28, p. 6382–6388, 2014.
- QI, Y.; MA, L.; SUN, J.; KANG, Z.; BAI, Y.; JIAN, S. Highly sensitive bending sensor based on multimode-multimode-coreoffset fiber structure. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 75, p. 52–56, 2015.
- QIAO, G.; ZHOU, Z.; OU, J. Thin Fe-C alloy solid film based fiber optic corrosion sensor. In: IEEE. *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. [S.l.], 2006. p. 541–544.
- RAJAN, G. *Optical fiber sensors: advanced techniques and applications*. [S.l.]: CRC press, 2015.
- RAKIĆ, A. D.; DJURIŠIĆ, A. B.; ELAZAR, J. M.; MAJEWSKI, M. L. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Applied optics*, Optica Publishing Group, v. 37, n. 22, p. 5271–5283, 1998.
- RAMANI, V.; KUANG, K. S. C. Monitoring of rebar corrosion in concrete structures using a lens-based plastic optical fiber (LPOF) sensor. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 276, p. 122129, 2021.
- READY, J. F. *Industrial applications of lasers*. [S.l.]: Elsevier, 1997.
- REN, L.; JIANG, T.; JIA, Z.-g.; LI, D.-s.; YUAN, C.-l.; LI, H.-n. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology. *Measurement*, Elsevier, v. 122, p. 57–65, 2018.
- RODRIGUES, R.; GABOREAU, S.; GANCE, J.; IGNATIADIS, I.; BETELU, S. Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 269, p. 121240, 2021.

- ROGERS, A. Distributed optical-fibre sensors. In: SPRINGER. *Optical Fiber Sensors*. [S.l.], 1987. p. 143–163.
- ROGERS, A. J. Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions. *Applied optics*, Optical Society of America, v. 20, n. 6, p. 1060–1074, 1981.
- SADIKU, M. N. *Numerical techniques in electromagnetics*. [S.l.]: CRC press, 2000.
- SASAKI, H.; KUBOTA, Y.; WATANABE, K. Sensitivity property of a hetero-core-spliced fiber optic displacement sensor. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Photonics North 2004: Photonic Applications in Telecommunications, Sensors, Software, and Lasers*. [S.l.], 2004. v. 5579, p. 136–143.
- SCHLÜTER, K.; ZAMPONI, C.; PIORRA, A.; QUANDT, E. Comparison of the corrosion behaviour of bulk and thin film magnesium alloys. *Corrosion science*, Elsevier, v. 52, n. 12, p. 3973–3977, 2010.
- SCHWARTZ, B.; ROBBINS, H. Chemical etching of silicon: IV. Etching technology. *Journal of the electrochemical society*, IOP Publishing, v. 123, n. 12, p. 1903, 1976.
- SEKI, A.; KATAKURA, H.; KAI, T.; IGA, M.; WATANABE, K. A hetero-core structured fiber optic ph sensor. *Analytica chimica acta*, Elsevier, v. 582, n. 1, p. 154–157, 2007.
- SHAO, M.; QIAO, X.; JIASURNAME, Z.; FUSURNAME, H.; LIU, Y.; LI, H.; ZHAO, X. Refractive index measurement based on fiber Bragg grating connected with a multimode fiber core. *Optics Communications*, Elsevier, v. 351, p. 70–74, 2015.
- SILVA, S.; PACHON, E. G.; FRANCO, M. A.; JORGE, P.; SANTOS, J.; MALCATA, F. X.; CORDEIRO, C. M.; FRAZÃO, O. Curvature and temperature discrimination using multimode interference fiber optic structures - A proof of concept. *Journal of Lightwave technology*, IEEE, v. 30, n. 23, p. 3569–3575, 2012.
- STENZEL, O. et al. *The physics of thin film optical spectra*. [S.l.]: Springer, 2015.
- SUN, A.; WU, Z. Hetero-core fiber Bragg grating for simultaneous measurement of strain and bending based on cladding mode ratiometric detection. *Optik*, Elsevier, v. 124, n. 20, p. 4206–4208, 2013.
- TANG, F.; ZHOU, G.; LI, H.-N.; VERSTRYNGE, E. A review on fiber optic sensors for rebar corrosion monitoring in RC structures. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 313, p. 125578, 2021.
- TENG, C.; LI, M.; MIN, R.; DENG, S.; CHEN, M.; XUE, M.; YUAN, L.; DENG, H. A high-sensitivity SPR sensor based on MMF-tapered HCF-MMF fiber structure for refractive index sensing. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, 2022.
- UDD, E. An overview of fiber-optic sensors. *review of scientific instruments*, AIP, v. 66, n. 8, p. 4015–4030, 1995.
- UDD, E.; JR, W. B. S. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

- VENKETESWARAN, A.; LALAM, N.; WUENSCHALL, J.; JR, P. R. O.; BADAR, M.; CHEN, K. P.; LU, P.; DUAN, Y.; CHORPENING, B.; BURIC, M. Recent advances in machine learning for fiber optic sensor applications. *Advanced Intelligent Systems*, Wiley Online Library, v. 4, n. 1, p. 2100067, 2022.
- WADE, S.; WALLBRINK, C. D.; MCADAM, G.; GALEA, S.; HINTON, B.; JONES, R. A fibre optic corrosion fuse sensor using stressed metal-coated optical fibres. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 131, n. 2, p. 602–608, 2008.
- WALKER, P.; TARN, W. H. *CRC handbook of metal etchants*. [S.l.]: CRC press, 1990.
- WANG, K.; DONG, X.; KÖHLER, M. H.; KIENTLE, P.; BIAN, Q.; JAKOBI, M.; KOCH, A. W. Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (MMI): a review. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 21, n. 1, p. 132–142, 2020.
- WANG, Q.; FARRELL, G.; YAN, W. Investigation on single-mode–multimode–single-mode fiber structure. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 26, n. 5, p. 512–519, 2008.
- WANG, X.; DONG, X.; ZHOU, Y.; NI, K.; CHENG, J.; CHEN, Z. Hot-wire anemometer based on silver-coated fiber Bragg grating assisted by no-core fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 25, n. 24, p. 2458–2461, 2013.
- WATANABE, K.; TAJIMA, K.; KUBOTA, Y. Macrobending characteristics of a hetero-core splice fiber optic sensor for displacement and liquid detection. *IEICE transactions on electronics*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 83, n. 3, p. 309–314, 2000.
- WEBB, D. Optical-fiber sensors: an overview. *Mrs Bulletin*, Cambridge University Press, v. 27, n. 5, p. 365–369, 2002.
- WILLIAMS, K. R.; GUPTA, K.; WASILIK, M. Etch rates for micromachining processing-Part II. *Journal of microelectromechanical systems*, IEEE, v. 12, n. 6, p. 761–778, 2003.
- WRIGHT, R. F.; DIEMLER, N.; EGBU, J. C.; BURIC, M. P.; JR, P. R. O. Metallic coating enabled optical fiber sensor for distributed corrosion monitoring. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Fiber Optic Sensors and Applications XVII*. [S.l.], 2021. v. 11739, p. 117390E.
- WU, Q.; QU, Y.; LIU, J.; YUAN, J.; WAN, S.-P.; WU, T.; HE, X.-D.; LIU, B.; LIU, D.; MA, Y. et al. Singlemode-multimode-singlemode fiber structures for sensing applications - A review. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 21, n. 11, p. 12734–12751, 2020.
- WU, Y.; YANG, Y.; JIN, W.; SHEN, Y.; JIAN, S. Compact Mach-Zehnder interferometer-based no-core fiber hollow-core fiber no-core fiber structure. *Optical Engineering*, SPIE, v. 56, n. 3, p. 030501, 2017.
- WU, Z.; LIU, B.; ZHU, J.; LIU, J.; WAN, S.; WU, T.; SUN, J. Ultrahigh resolution thickness measurement technique based on a hollow core optical fiber structure. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 7, p. 2035, 2020.
- XU, W.; SHI, J.; YANG, X.; XU, D.; RONG, F.; ZHAO, J.; YAO, J. Improved numerical calculation of the single-mode-no-core-single-mode fiber structure using the fields far from cutoff approximation. *Sensors*, MDPI, v. 17, n. 10, p. 2240, 2017.

YAN, S.; PU, S.; ZHANG, Y.; YUAN, M.; ZHANG, C. Sensing properties of graphene-oxide-functionalized single-mode-no-core-single-mode fiber structure. *Results in Physics*, Elsevier, p. 104310, 2021.

YAO, Y.; YAN, M.; BAO, Y. Measurement of cable forces for automated monitoring of engineering structures using fiber optic sensors: A review. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 126, p. 103687, 2021.

YU, S.; PEI, L.; LIU, C.; WANG, Y.; WENG, S. Simultaneous strain and temperature measurement using a no-core fiber-based modal interferometer with embedded fiber Bragg grating. *Optical Engineering*, SPIE, v. 53, n. 8, p. 087105, 2014.

YUHASHI, K.; IDA, J.; KUBODERA, S.; WATANABE, K.; NISHIYAMA, M. A surface plasmon resonance temperature sensor using TiO₂ nanoparticles on hetero-core fiber optic structure with Au thin film. *Japanese Journal of Applied Physics*, IOP Publishing, v. 61, n. 5, p. 056501, 2022.

ZANGANI, D. Smart high-performance textiles for protection in construction and geotechnical applications. In: *Smart textiles for protection*. [S.l.]: Elsevier, 2013. p. 276–305.

ZHANG, C.; XU, S.; ZHAO, J.; LI, H.; BAI, H.; MIAO, C. Intensity-modulated refractive index sensor with anti-light source fluctuation based on no-core fiber filter. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 97, p. 358–363, 2017.

ZHANG, C.; XU, S.; ZHAO, J.; LI, H.; BAI, H.; MIAO, C. Multipoint refractive index and temperature fiber optic sensor based on cascaded no core fiber-fiber Bragg grating structures. *Optical Engineering*, SPIE, v. 56, n. 2, p. 027102, 2017.

ZHANG, J.; PU, S.; RAO, J.; YAO, T. Refractive index and temperature sensors based on no-core fiber cascaded with long period fiber grating. *Journal of Modern Optics*, Taylor & Francis, v. 65, n. 9, p. 1098–1103, 2018.

ZHANG, M.; HOU, L.; ZHANG, H.; ZHANG, X.; YANG, J. Composite modal interferometer for simultaneous triple-parameter measurement based on cascaded no-cladding fiber and thin-core fiber structure. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 180133–180139, 2020.

ZHANG, N.; CHEN, W.; ZHENG, X.; HU, W.; GAO, M. Optical sensor for steel corrosion monitoring based on etched fiber Bragg grating sputtered with iron film. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 15, n. 6, p. 3551–3556, 2015.

ZHANG, R.; PU, S.; LI, X. Gold-film-thickness dependent SPR refractive index and temperature sensing with hetero-core optical fiber structure. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 19, p. 4345, 2019.

ZHAO, Y.; CAI, L.; LI, X.-G.; MENG, F.-C. Liquid concentration measurement based on SMS fiber sensor with temperature compensation using an FBG. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, v. 196, p. 518–524, 2014.

ZHAO, Y.; ZHAO, J.; ZHAO, Q. Review of no-core optical fiber sensor and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 313, p. 112160, 2020.

ZHENG, J.; LI, J.; NING, T.; PEI, L.; JIAN, S.; WEN, Y. Improved self-imaging for multi-mode optical fiber involving cladding refractive index. *Optics Communications*, Elsevier, v. 311, p. 350–353, 2013.

ZINOVIEV, K. E.; GONZÁLEZ-GUERRERO, A. B.; DOMÍNGUEZ, C.; LECHUGA, L. M. Integrated bimodal waveguide interferometric biosensor for label-free analysis. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 29, n. 13, p. 1926–1930, 2011.

APÊNDICE A – LISTA DE PUBLICAÇÕES

A.1 Artigo publicado em periódico

- H. J. B. de Oliveira, E. A. S. Junior, H. P. Alves, J. F. do Nascimento, L. H. Vilela-Leão, C. S. Gonçalves, J. F. Martins-Filho, "Corrosion Sensor Using Metallic Double Layer in Optical Fiber". *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 20, p. 513-525, 2021.

A.2 Artigos aceitos em periódico

- H. J. B. de Oliveira, A. A. D. da Silva, M. S. P. e Silva, H. P. Alves, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Refractive Index Sensors Based on Cascaded Multimode Interference Hetero-core Optical Fibers". *Applied Optics*, 2023. DOI: 10.1364/AO.480299.
- A. A. Dias da Silva, H. J. B. Oliveira, H. P. Alves, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Computational Modeling of Magnetic Field Optical Fiber Sensor Considering Temperature Effects". *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2022.

A.3 Artigos submetidos para periódico

- M. S. P. e Silva, H. P. Alves, H. J. B. de Oliveira, L. H. Vilela-Leão, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Temperature, Refractive Index and Corrosion Simultaneous Monitoring using Raman Anti-Stokes Reflectometric Optical Fiber Sensor". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.

A.4 Artigo publicado em conferência internacional

- H. J. B. de Oliveira, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Computational modeling of H₂S gas sensor using surface plasmon resonance in a d-shaped optical fiber". 2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC). IEEE, 2018.

A.5 Artigos publicados em conferências nacionais

- H. J. B. de Oliveira, A. A. Dias da Silva, M. S. P. e Silva, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Sensor de Índice de Refração Baseado em Fibras Ópticas Heteronúcleo

em Cascata Multiplexado em Comprimento de Onda". 20^o Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica. 2022.

- H. J. B. de Oliveira, A. A. Dias da Silva, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Sensor de Índice de Refração à Fibra Óptica Heteronúcleo com Estrutura MSM". In: MOMAG 2020 - 19^o SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14^o CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2020, Niterói. Anais do MOMAG 2020.

A.6 Artigos publicados em conferências nacionais em colaboração em outros projetos

- M. S. P. e Silva, H. P. Alves, H. J. B. de Oliveira, L. H. Vilela-Leão, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Sensor Distribuído Baseado Em Espelhamento Raman Para Monitoramento Simultâneo de Temperatura, Índice de Refração e Corrosão" 20^o Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica. 2022.
- C. H. J. de Oliveira, H. J. B. de Oliveira, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Sensor à Fibra Óptica Heteronúcleo Para Monitoramento Da Densidade de Eletrólito de Baterias de Chumbo-Ácido". 20^o Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica. 2022.
- A. A. Dias da Silva, H. J. B. de Oliveira, H. P. Alves, J. F. do Nascimento, J. F. Martins-Filho, "Modelagem Computacional de Sensor de Campo Magnético à Fibra Óptica Considerando Efeitos de Temperatura". In: MOMAG 2020 - 19^o SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14^o CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2020, Niterói. Anais do MOMAG 2020.