



**UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO**



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Eletrônica e Sistemas



Graduação em Engenharia Eletrônica

Leonardo Soares Cavalcante de Miranda

**Sensor de corrosão a fibra óptica heteronúcleo para
aplicações na indústria de petróleo e gás**

Recife

2024

Leonardo Soares Cavalcante de Miranda

**Sensor de corrosão a fibra óptica heteronúcleo para
aplicações na indústria de petróleo e gás**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a): Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, Ph.D.

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Miranda, Leonardo Soares Cavalcante de.

Sensor de corrosão a fibra óptica heteronúcleo para aplicações na indústria de petróleo e gás / Leonardo Soares Cavalcante de Miranda. - Recife, 2024.

57 p. : il., tab.

Orientador(a): Joaquim Ferreira Martins Filho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Eletrônica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. fibra óptica heteronúcleo. 2. sensor de corrosão. 3. sensor óptico de corrosão. 4. indústria de petróleo e gás natural. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Leonardo Soares Cavalcante de Miranda

Sensor de corrosão a fibra óptica heteronúcleo para aplicações na indústria de petróleo e gás

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 14/06/2024

Banca Examinadora

Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior, D.Sc.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Henrique Alves Patriota, D.Sc.
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Agradecimentos

Aos meus pais e minha irmã, por todo amor e incentivo essenciais nos momentos mais difíceis dessa jornada.

A minha amada Mari, por tornar tudo um pouco mais leve, pelo companheirismo e apoio.

Ao meu orientador, Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, pela orientação, ensinamentos, paciência e sobretudo sua dedicação à pesquisa.

Aos amigos do laboratório de sensores, em especial Hébio Oliveira e Thales Henrique, pela colaboração, ensinamentos e incentivo.

Aos queridos amigos da *prim*, pelas boas conversas e momentos de descontração.

Por fim, agradeço ao Programa de Recursos Humanos 38.1 da Agência Nacional de Petróleo (PRH 38.1-ANP) pelo apoio financeiro concedido, o qual viabilizou a realização deste trabalho.

*“Poets say science takes away from
the beauty of the stars — mere globs
of gas atoms. Nothing is ‘mere’. I too
can see the stars on a desert night,
and feel them. But do I see less or
more?”*

Richard Feynman

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Eletrônica e Sistemas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica(Eng.)

Sensor de corrosão a fibra óptica heteronúcleo para aplicações na indústria de petróleo e gás

Leonardo Soares Cavalcante de Miranda

Este trabalho aborda a fabricação e caracterização de dois sensores de corrosão baseados em fibra óptica heteronúcleo MSM (*Multimode-Single mode-Multimode*) ambos com fina camada de 200 nm de alumínio como elemento transdutor. Um dispositivo foi caracterizado utilizando fonte de luz banda larga e analisador de espectro óptico para detecção da corrosão do metal em ácido Cr-etcher. O sistema para caracterização do segundo sensor foi composto por um laser centrado em 1550 nm, fotodetector e o ácido Al-etcher para corrosão da camada de alumínio. As sensibilidades obtidas foram: 0,038 dBm/nm para o sistema de detecção por análise espectral, com faixa de potência de -58 dBm a -50 dBm ao longo da corrosão; 0,005 dBm/nm no dispositivo que usa o fotodetector para monitorar a corrosão, com faixa de potência de -3,5 dBm a -2,6 dBm. Os resultados obtidos demonstram que a estrutura proposta é uma potencial alternativa aos sensores de corrosão comerciais baseados em eletrônica, destacando-se especialmente para aplicações na indústria de óleo e gás.

Palavras-chave: fibra óptica heteronúcleo; sensor de corrosão; sensor óptico de corrosão; indústria de petróleo e gás natural.

Abstract of Course Conclusion Work, presented to Department of Eletronic and Systems, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Electronic Engineering(Eng.)

Heterocore optical fiber corrosion sensor for Oil and Gas Industries applications.

Leonardo Soares Cavalcante de Miranda

This work addresses the fabrication and characterization of two corrosion sensors based on MSM (Multimode-Single mode-Multimode) heterocore optical fibers with a thin layer of 200 nm aluminum as transducer element. The first device was characterized using a broadband light source and a spectrum analyzer to detect metal corrosion in Cr-etcher acid. The second sensor was characterized using a laser centered on 1550 nm, a photodetector and Al-etcher acid for corrosion of the aluminium layer. The sensitivities obtained were: 0.038 dBm/nm for the detection system based on spectral analysis, the total power range along the corrosion was -58 dBm to -50 dBm; 0.005 dBm/nm for the device that uses the photodetector to monitor corrosion, the power range throughout the process was -3.5 dBm to -2.6 dBm. The results obtained show that the proposed device is a potential alternative to commercial electronics-based corrosion sensors, especially for applications in the oil and gas industry.

Keywords: heterocore optical fiber; corrosion sensor; optical corrosion sensor; oil and gas industries.

Lista de Figuras

2.1	Visão transversal da fibra óptica de índice degrau.	19
2.2	Fibra Heteronúcleo MSM	23
2.3	Fibra Heteronúcleo MNM	24
2.4	Espectro de transmissão MNM para diferentes índices de refração	25
3.1	SMS metalizado e seu espectro transmitido.	27
3.2	Perfil-D metalizado: (a) Elemento sensor. (b) Sistema de detecção da corrosão.	28
3.3	Sensor baseado em FBG metalizada. (a) Elemento sensor. (b) Sistema de detecção da corrosão.	29
3.4	Sensor multiponto baseado em FBG tensionada. (a) Elemento sensor. (b) Sensor multiponto	29
3.5	Sensor baseado em FBG para detectar vibrações.	30
3.6	Espectro e gráfico obtido com medidor de potência do sensor FBG para detecção de vibrações.	31
3.7	Sistema de detecção de corrosão baseado em LPFG.	31
3.8	Sensor de corrosão baseado em fibra cônica.	32
3.9	Estrutura sensora baseada em interferômetro de Fabry-Pérot.	33
3.10	Sensor baseado em MZI. (a) Elemento sensor. (b) Sistema de detecção de corrosão	34
3.11	Sensor baseado em RPS. (a) Elemento sensor. (b) Sistema de detecção de corrosão	35
3.12	Sensor multiponto de face clivada	36

4.1	Fabricação do Heteronúcleo. (a) Fim da etapa primeira etapa de fabricação do Heteronúcleo. (b) Início da segunda etapa. (c) Fim da segunda etapa, MSM concluído.	39
4.2	Espectro da MSM com 30 mm de comprimento	40
4.3	Máquina de <i>sputtering</i> (a) Com câmara de vácuo fechada (b) Com câmara de vácuo aberta	41
4.4	(a) Câmara de vácuo da máquina de <i>sputter</i> . (b) Suporte metálico para metalização	42
4.5	Ilustração do heteronúcleo metalizado. (a) Seção transversal. (b) Seção longitudinal.	42
4.6	Representação tridimensional do heteronúcleo metalizado	43
4.7	Sistema de monitoramento da corrosão com ácido Cr-Etcher baseado em OSA	43
4.8	Sistema de Monitoramento da corrosão com ácido Al-Etcher baseado em fotodetector	44
5.1	Potência do laser transmitida ao longo da corrosão do MSM por Al-etcher para a amostra H1.	46
5.2	Regressão Linear da Potência em 1550 nm ao longo da corrosão do MSM H1 por Al-Etcher.	47
5.3	Potência do laser transmitida ao longo da corrosão por Al-etcher para a amostra H3.	48
5.4	Espectro transmitido para diferentes tempos durante a corrosão por Cr-etcher da amostra H2.	48
5.5	Potência em 1550 nm ao longo da corrosão por Cr-etcher para amostra H2 e regressão linear.	49
5.6	Representação da corrosão do sensor.	51

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros qualitativos dos sensores de corrosão	37
5.1	Figuras de mérito dos sensores	50

Lista de Abreviaturas

FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
Fe-c	Aço-carbono
Gr/AgNW	Nanotubos de Grafeno e Prata
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LPFG	<i>Long Period Fiber Grating</i>
MMF	<i>Multi-Mode Fiber</i>
MNM	<i>Multimode - No core - Multimode</i>
MSM	<i>Multimode - Single mode - Multimode</i>
MZI	<i>Mach-Zender Interferometer</i>
NaCl	Cloreto de sódio
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometry</i>
POF	<i>Plastic Optical Fiber</i>
RPS	Ressonância de Plásmon de Superfície
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
TE	<i>Transverse Electric</i>
TM	<i>Transverse Magnetic</i>

Lista de Símbolos

β	Constante de Propagação
ϵ	Permissividade elétrica do meio
ϵ_0	Permissividade elétrica no vácuo
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
ϕ	Ângulo do sistema de coordenadas cilíndricas
χ	Suscetibilidade elétrica
ω	Velocidade angular
a	Raio do núcleo da fibra
\mathbf{B}	Vetor densidade de fluxo magnético
c	Velocidade da luz no vácuo
cr	Taxa de corrosão
\mathbf{D}	Vetor densidade de fluxo elétrico
d_{al}	Espessura da camada de alumínio
\mathbf{E}	Vetor campo elétrico
$\tilde{\mathbf{E}}$	Transformada de Fourier do campo elétrico
\mathbf{H}	Vetor campo magnético
k_0	Número de onda no vácuo
L	Comprimento do trecho Heteronúcleo
n	Índice de refração
\bar{n}	Índice de refração efetivo
n_1	Índice de refração no núcleo
n_2	Índice de refração na casca
n_{ext}	Índice de refração do meio externo
\mathbf{P}	Vetor polarização induzida
P_{op}	Potência óptica
\mathbf{r}	Raio do sistema de coordenadas cilíndricas
S	Sensibilidade

t Tempo

z Altura do sistema de coordenadas cilíndricas

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Contexto e Motivação	17
1.2	Objetivo	17
1.2.1	Objetivos Específicos	17
2	Fundamentação Teórica	19
2.1	Fibras Ópticas	19
2.1.1	Propagação da Luz em Fibras Ópticas	20
2.1.2	Modos de Propagação	22
2.2	Fibra Óptica Heteronúcleo	23
3	Sensores de Corrosão a Fibra Óptica	26
3.1	Sensores Baseados em Fibra Heteronúcleo	26
3.2	Sensores Baseados em Fibra Perfil-D	27
3.3	Sensores Baseados em Estrutura de Grade	28
3.4	Sensores Baseados em Fibra Cônica	32
3.5	Sensores Baseados em Interferômetros	32
3.6	Sensores Baseados em Ressonância de Plásmon de Superfície	34
3.7	Sensores Baseados em Fibra de Face Clivada	34
4	Metodologia	38
4.1	Fabricação da Estrutura Heteronúcleo	38
4.2	Metalização	41
4.3	Sistema de Detecção de Corrosão	41

5	Resultados	45
6	Considerações Finais	52
6.1	Conclusão	52
6.2	Trabalhos Futuros	53
	Referências	54

Capítulo 1

Introdução

A demanda energética anual vem crescendo rapidamente nas últimas décadas: se em 2019 eram utilizados $638 \times 10^{18} J$, há uma expectativa de que até 2050 a demanda aumente para $760 \times 10^{18} J$ (World. . . , 2019). Apesar do grande crescimento absoluto da necessidade por energia, cientistas afirmam que é necessário reduzir a emissão de carbono e outros gases do efeito estufa pela metade até 2050 para evitar que o aquecimento global cause danos irreversíveis (Sachs, 2007). Essa questão traz um dilema, pois, apesar do investimento em fontes de energia renovável, entende-se que elas não serão suficientes para suprir toda a demanda esperada (Ashry et al., 2021), de forma que boa parte da energia utilizada será oriunda de combustíveis fósseis. Consequentemente, as empresas do ramo de petróleo e gás natural vêm buscando aumentar a eficiência e confiabilidade operacional, visando reduzir o impacto ambiental através do investimento em equipamentos mais confiáveis e com maior longevidade, que suportem ambientes hostis encontrados em diversos processos da indústria. Nesse contexto, sensores baseados em fibras ópticas destacam-se em relação aos eletrônicos devido a vantagens inerentes à própria fibra (Ashry et al., 2021), como capacidade de transmitir sinais por longas distâncias sem perdas apreciáveis de potência, sensoriamento passivo, não utilizar corrente elétrica, resistência a altas temperaturas, dentre outras qualidades (Baldwin, 2018).

1.1 Contexto e Motivação

A corrosão é um dos grandes desafios tecnológicos enfrentados pela indústria de Óleo e Gás, afetando a vida útil dos equipamentos utilizados nos processos de exploração, produção, transporte e refino. Além do dano material e prejuízo financeiro, a corrosão é um dos principais causadores de acidentes e catástrofes nesse ramo, o que gera danos socio-ambientais (Popoola et al., 2013). Faz-se, portanto, essencial o monitoramento e controle da corrosão para otimizar o gerenciamento e a operação dos processos onde o fenômeno ocorre.

Esse cenário explicita a relevância dos sensores baseados em fibra óptica, graças às qualidades intrínsecas à fibra: possibilitam monitoramento não destrutivo, medições distribuídas e localizadas, longo alcance, ocupam pouco espaço, baixo peso, imunidade à interferência eletromagnética, compatibilidade com sistemas de comunicação óptica, além da alta passividade e confiabilidade, características chave para a aplicação em setores de petróleo e gás natural. Os sensores de corrosão baseados em fibra óptica, além das vantagens já citadas, possibilitam o monitoramento da taxa de corrosão em tempo real e durante a operação, isto é, sem a necessidade de parar o processo para realizar medições. Essas constituem grandes benefícios em relação aos sensores de corrosão comerciais mais comuns, como o cupom de corrosão, teste ultrassônico ou o método de vazamento de fluxo magnético, os dois últimos, por exemplo, necessitam da interrupção da produção para realizar a inspeção de dutos (Jiang et al., 2017).

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar e desenvolver dispositivos sensores a fibra óptica heteronúcleo com possíveis aplicações para a indústria de Óleo e Gás.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Conhecer os processos de fabricação dos dispositivos a base de fibra óptica heteronúcleo e fabricar os sensores.

- Conhecer os processos de metalização por *sputtering* e realizar a metalização dos dispositivos a fibra óptica.
- Revisar a literatura sobre os dispositivos a fibra óptica para sensoriamento de corrosão.
- Realizar os experimentos de corrosão em ambiente controlado de laboratório.
- Analisar os resultados com vistas às aplicações na indústria de petróleo e gás.

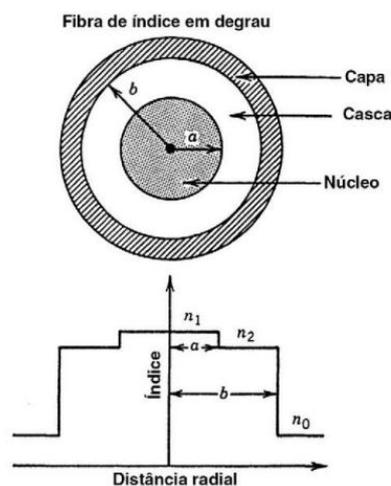
Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Fibras Ópticas

A fibra óptica consiste em uma estrutura cilíndrica, o núcleo, envolta por outra estrutura de mesmo formato, mas com índice de refração menor, a casca. A diferença de índice de refração entre núcleo e casca possibilita o fenômeno da reflexão interna total, que resulta na propagação do sinal óptico através da fibra. Neste capítulo, considera-se apenas as fibras de índice degrau, nas quais existe uma diferença brusca de índice de refração na interface núcleo-casca, conforme a Figura 2.1.

Figura 2.1: Visão transversal da fibra óptica de índice degrau.



Fonte: Agrawal, 2014.

O índice de refração na fibra óptica do tipo degrau pode ser descrito pela Equação 2.1, onde a é o raio do núcleo, n_1 e n_2 são os índices no núcleo e na casca, respectivamente, e \mathbf{r} é a coordenada radial do sistema de coordenadas cilíndrica, que será utilizado mais adiante.

$$n(\mathbf{r}) = \begin{cases} n_1 & \text{se } \mathbf{r} \leq a \\ n_2 & \text{se } a < \mathbf{r} \leq b \\ n_{ext} & \text{se } \mathbf{r} > b \end{cases} \quad (2.1)$$

2.1.1 Propagação da Luz em Fibras Ópticas

O fenômeno da propagação de ondas eletromagnéticas em qualquer meio é descrito pelas equações de Maxwell (Agrawal, 2014), mostradas nas equações 2.2 a 2.5. Como as fibras ópticas são meios dielétricos, a Equação 2.4 é homogênea (Agrawal, 2014).

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.5)$$

Os vetores campo elétrico e campo magnético (\mathbf{E} e \mathbf{H} , respectivamente) se relacionam com os vetores densidade de fluxo (\mathbf{D} e \mathbf{B} , respectivamente) através das relações constitutivas, em 2.6 e 2.7. A Equação 2.7 é simplificada devido ao fato das fibras ópticas serem meios não magnéticos, assim o vetor polarização magnética \mathbf{M} é nulo e não consta na equação.

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.7)$$

onde ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo, μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo e \mathbf{P} , é a polarização elétrica induzida. Caso seja feita a aproximação de primeira ordem para o vetor polarização $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$ considera-se a fibra como um meio linear.

Tomando o rotacional de 2.2 e substituindo \mathbf{B} por 2.7 obtemos do lado direito o rotacional da densidade de fluxo magnético, que pode ser substituído por 2.3 e \mathbf{D} é escrito pelo campo elétrico multiplicado pela permissividade do materia ($\epsilon \mathbf{E}$), resultando na Equação 2.8.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

É possível simplificar a expressão 2.8 utilizando uma identidade do cálculo vetorial: $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$. Como consideramos a polarização linear com o campo elétrico, nota-se que o divergente de \mathbf{E} é nulo, através da equação de 2.4. Com isso, elimina-se o termo $\nabla(\nabla \cdot \mathbf{E})$ e se reescreve a equação:

$$0 - \nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{(1 + \chi)}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

Tomando a transformada de Fourier da Equação 2.9, obtém-se a equação de Helmholtz, onde $\tilde{\mathbf{E}}$ representa o campo que depende da frequência e do espaço, não mais do tempo (Agrawal, 2014; Fontana, 2023) e k_0 é o número de onda no vácuo, definido como $k_0 = \omega/c$:

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} + \epsilon(r, \omega) k_0^2 \tilde{\mathbf{E}} = 0 \quad (2.10)$$

2.1.2 Modos de Propagação

O campo elétrico pode ser encontrado a partir de 2.10 adotando coordenadas cilíndricas, devido a simetria geométrica da fibra óptica, e utilizando separação de variáveis (Agrawal, 2014). Aplica-se as condições de contorno: a luz guiada pela fibra tem campos finitos no núcleo ($\mathbf{r} = 0$), os campos são nulos quando $\mathbf{r} \rightarrow \infty$, e as componentes tangenciais dos campos são contínuas na interface entre núcleo e casca ($\mathbf{r} = a$), para obter:

$$\tilde{\mathbf{E}}_z(\mathbf{r}, \phi, z) = \begin{cases} AJ_m(p\mathbf{r})e^{im\phi}e^{i\beta z} & \text{se } \mathbf{r} \leq a \\ CK_m(q\mathbf{r})e^{im\phi}e^{i\beta z} & \text{se } \mathbf{r} > a \end{cases} \quad (2.11)$$

em que β é a constante de propagação, A e C são constantes, J_m e K_m são funções de Bessel, m é um inteiro não negativo e (\mathbf{r}, ϕ, z) são as variáveis do sistema de coordenadas cilíndricas. Os parâmetros p e q dependem do tipo de fibra óptica e da frequência da onda eletromagnética, dados por:

$$p^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (2.12)$$

$$q^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (2.13)$$

A Equação 2.11 pode ser resolvida considerando um conjunto de parâmetros k_0, a, n_1 e n_2 para determinar a constante de propagação β . Note que k_0 depende da frequência da luz, enquanto os outros parâmetros são características da fibra óptica.

Podem existir mais de uma solução para cada valor de m , por isso, denota-se β_{mn} , onde n também é um inteiro não negativo. Cada solução da equação, e sua respectiva constante de propagação, é chamada de um modo de propagação óptico. Os modos de propagação são, portanto, soluções de 2.10 que satisfazem as condições de contorno da fibra óptica, de continuidade na interface núcleo-casca e têm a característica de manter a distribuição espacial dos campos inalterada ao longo da propagação pela fibra óptica (Agrawal, 2014).

A partir da constante de propagação de um modo (β_{mn}), define-se o índice efetivo ou índice modal por 2.14. Para os casos em que $n_1 > \bar{n} > n_2$ temos os modos guiados pela

fibra óptica. Caso o contrário, quando o índice modal é menor que o índice da casca então o modo é radiado, refrata para a casca da fibra óptica e não é guiado, ou seja, ocorre a quebra do fenômeno da reflexão interna total.

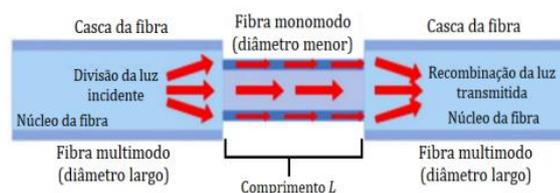
$$\bar{n} = \frac{\beta}{k_0} \quad (2.14)$$

2.2 Fibra Óptica Heteronúcleo

A estrutura heteronúcleo consiste em uma fibra óptica que contém um trecho curto (da ordem de alguns milímetros) com uma variação de diâmetro do núcleo (Oliveira, 2022a). A fabricação desse dispositivo é feita através da emenda entre dois ramos de um tipo de fibra com um segmento de outro tipo, entre os dois ramos.

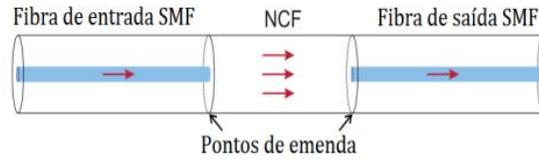
A fibra MSM (*Multimode - Single mode - Multimode*) é fabricada a partir da emenda de dois trechos de fibra multimodo (MMF) com um segmento de fibra monomodo (SMF) na região central das emendas (Oliveira, 2022a). A Figura 2.2 representa a estrutura. Já o dispositivo MNM (*Multimode - No core fiber - Multimode*), por sua vez, é contruído com a fusão de uma fibra sem núcleo (NCF) entre dois trechos de fibra MMF, conforme ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.2: Fibra Heteronúcleo MSM



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2022a.

Ambas estruturas heteronúcleo citadas se baseiam no mesmo princípio para realizar o sensoriamento de grandezas físicas, a interferência multimodal. Quando a luz passa da MMF para a NCF, a casca da NCF funciona como o núcleo, e o meio externo (com menor índice de refração) como casca, possibilitando a reflexão interna total (Oliveira,

Figura 2.3: Fibra Heteronúcleo MNM

Fonte: Adaptado de Wang et al., 2021.

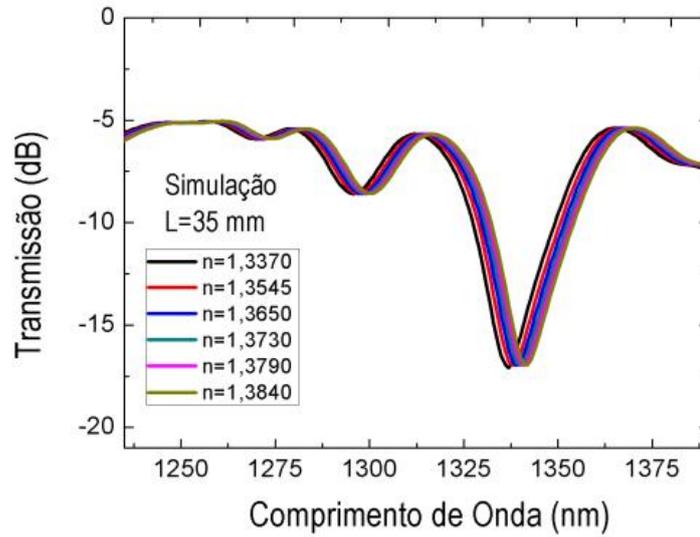
2022b). Os diversos modos propagantes na fibra sem núcleo irão interferir mutuamente, construtivamente e destrutivamente, com um padrão de interferência que depende do comprimento do heteronúcleo, do índice de refração do meio sensoriado e do comprimento de onda da luz (Oliveira, 2022a). Dessa forma, a alteração nesses parâmetros muda o padrão de interferência entre os modos propagados e, conseqüentemente, o espectro transmitido é afetado. Por isso, sistemas de detecção baseados em MSM ou MNM comumente contam com analisador de espectro óptico (OSA) para realizar a detecção do deslocamento de comprimento de onda gerado por variações de índice de refração no meio monitorado.

Para a estrutura MSM o fenômeno que possibilita sensoriamento de índice de refração é similar, porém, uma fração do sinal luminoso que sai da MMF para a SMF acopla na casca da fibra monomodo, a Figura 2.2 ilustra isso. Os modos de casca então interferem com o único modo propagado pelo núcleo, no entanto, um único modo de casca é responsável por maior parte da interferência (Oliveira, 2022a), a partir dessa consideração é escrita a Equação 2.15, que rege o comprimento de onda dos vales no espectro de transmissão da MSM (Oliveira, 2022a). A Figura 2.4 ilustra o espectro de transmissão de um sinal óptico que se propaga através de uma fibra heteronúcleo MNM e seus vales podem ser observados.

$$\lambda_v = \frac{2\Delta n_{eff}^n L}{2m + 1}, \quad (2.15)$$

Onde λ_v é o comprimento de onda do vale no espectro de transmissão do heteronúcleo, L é o comprimento da fibra sensora, m é um inteiro positivo e Δn_{eff}^n é o índice efetivo do n -ésimo modo propagante, que depende dos índices de refração no núcleo e casca do

Figura 2.4: Espectro de transmissão MNM para diferentes índices de refração



Fonte: Oliveira, 2022b

trecho heteronúcleo e do índice de refração do meio externo (Oliveira, 2022a).

Capítulo 3

Sensores de Corrosão a Fibra Óptica

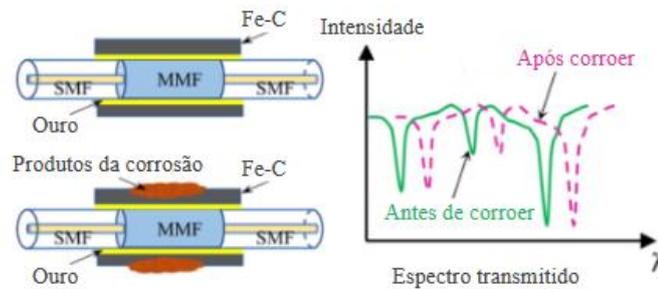
Neste capítulo são apresentados os principais sistemas de detecção de corrosão baseados em fibra óptica encontrados na literatura. Deu-se preferência para a literatura mais recente e a análise dos sistemas está dividida entre as diferentes estruturas de fibra óptica utilizadas nos sensores. Na Seção 3.1 são apresentados sensores que utilizam fusão de diferentes tipos de fibra como elemento sensor. A Seção 3.2 aborda o sistema de detecção de corrosão baseado em perfil-D metalizado. Já a Seção 3.3 traz os dispositivos que se baseiam em grade de Bragg e grade de período longo. A Seção 3.4 aborda o sistema que utiliza fibra cônica para monitorar corrosão. A Seção 3.5 apresenta as estruturas baseadas em interferômetros de Mach-Zender e Fabry-Pérot. A Seção 3.6 aborda um dispositivo baseado no fenômeno de ressonância de plásmons de superfície (RPS). Por fim, a Seção 3.7 descreve o sistema que se baseia em face clivada metalizada para medir taxa de corrosão.

3.1 Sensores Baseados em Fibra Heteronúcleo

Em (Tang et al., 2022) é proposto um sensor pontual baseado em fibra heteronúcleo do tipo monomodo-multimodo-monomodo (SMS). Inicialmente, uma camada de 100 nm de ouro é depositada sobre a fibra para conduzir a galvanização de 20 μm de aço carbono (Fe-C). Uma solução aquosa de 3,5% de NaCl é utilizada para corrosão do metal por 48 horas. A corrosão é monitorada através do deslocamento nos picos e vales do espectro de transmissão da SMS, que pode ser visto na Figura 3.1. Por isso, utiliza-se luz banda

larga para emissão e um OSA para leitura do sinal transmitido. A taxa de corrosão é obtida através da correlação entre a perda de massa no metal corroído e o deslocamento dos vales no espectro, conforme ilustrado na Figura 3.1. (Lin et al., 2023) propuseram uma estrutura SMS com fibra multimodo sem núcleo (NCF) no interior. O sensor é fixado por fita em uma barra de ferro imersa na solução corrosiva (3,5% de NaCl em água). Os produtos da corrosão alteram a composição do meio aquoso e, conseqüentemente, o índice de refração. Essa variação é monitorada pelo espectro de transmissão da SMS. Um sensor muito similar é proposto em (Tang et al., 2024).

Figura 3.1: SMS metalizado e seu espectro transmitido.

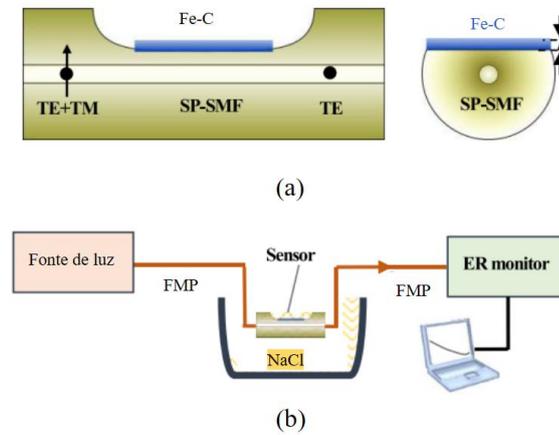


Fonte: adaptado de Tang et al., 2022.

3.2 Sensores Baseados em Fibra Perfil-D

O sensor ilustrado na Figura 3.2(a) foi proposto por (Hu et al., 2017) e consiste em fibra óptica monomodo com perfil-D metalizado de 12 mm de comprimento com 50 nm de aço carbono. A estrutura funciona como uma espécie de polarizador, absorvendo a onda TM em maior proporção que a TE (Hu et al., 2017). O sistema de detecção da Figura 3.2(b) conta com fibra mantenedora de polarização (FPM) para transmitir o sinal emitido por uma fonte de luz não polarizada ao sensor e deste para o monitor de relação de extinção (ER). A taxa de corrosão do metal é obtida através da alteração da relação entre os modos TE e TM, que ao longo da corrosão do metal tendem a se igualar. Essa configuração permite obter a taxa de corrosão em tempo real.

Figura 3.2: Perfil-D metalizado: (a) Elemento sensor. (b) Sistema de detecção da corrosão.



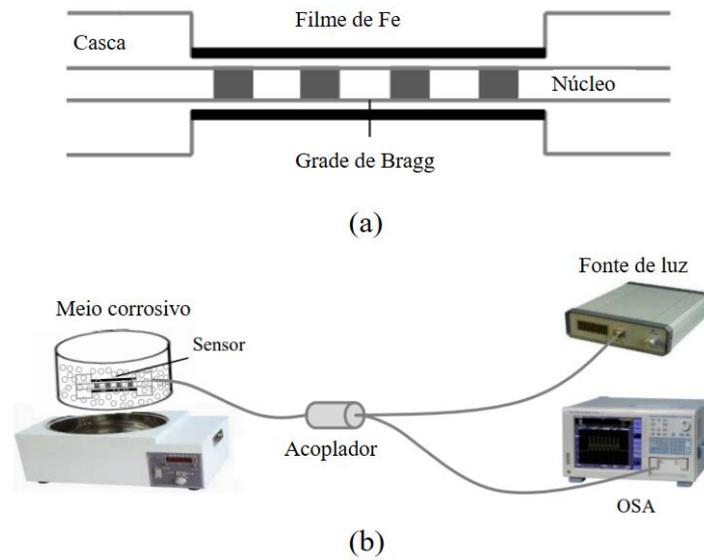
Fonte: adaptado de Hu et al., 2017.

3.3 Sensores Baseados em Estrutura de Grade

Zhang e seus colaboradores propuseram um sensor de corrosão baseado em uma fibra monomodo com grade de Bragg (FBG) de 8 mm de comprimento (Zhang et al., 2015). Na região da grade, a casca é retirada parcialmente e é depositada uma camada de 30 nm de ferro carbono(Fe-C). A estrutura é ilustrada na Figura 3.3(a) e seu funcionamento se baseia na dependência do comprimento de onda de Bragg refletido com o índice efetivo do meio. Ao longo da corrosão, a perda de massa no metal e a formação dos subprodutos alteram o índice efetivo da grade, o que gera o deslocamento do comprimento de Bragg. A detecção da corrosão é feita através da correlação entre o deslocamento do comprimento de onda refletido com a perda de massa da camada de ferro. O sistema de monitoramento, Figura 3.3(b), é composto por uma fonte de luz banda larga, o sensor e um OSA, que possibilita detectar a taxa de corrosão pontual.

A Figura 3.4(a) mostra o elemento sensor baseado em FBG monomodo fixo em um suporte polimérico que gera tensão na FBG. O funcionamento da estrutura proposta por (Vahdati et al., 2022) se baseia na falha do metal que tensiona a FBG, quando isso ocorre o comprimento de onda de Bragg sofre uma alteração repentina. O sensor de corrosão multiponto da Figura 3.4(b) conta com quatro desses dispositivos descritos em cascata, cada um com diferente comprimento de onda de Bragg, permitindo assim obter

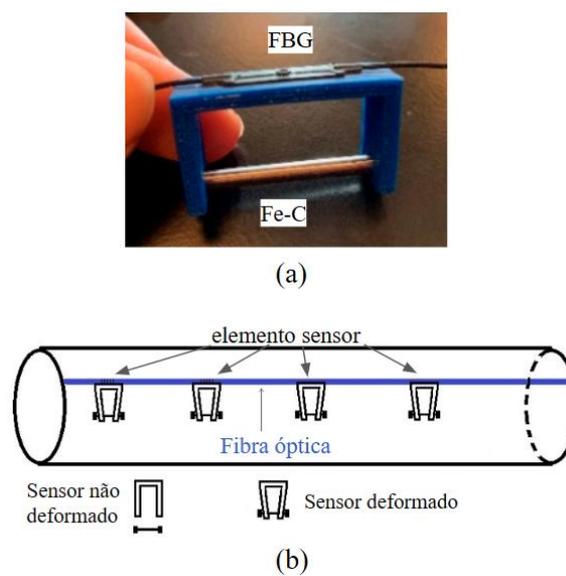
Figura 3.3: Sensor baseado em FBG metalizada. (a) Elemento sensor. (b) Sistema de detecção da corrosão.



Fonte: adaptado de Zhang et al., 2015.

a taxa média de corrosão no momento em que o metal de sacrifício falha, de forma que o monitoramento da corrosão não ocorre em tempo real.

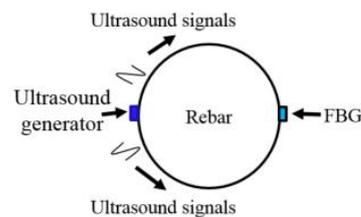
Figura 3.4: Sensor multiponto baseado em FBG tensionada. (a) Elemento sensor. (b) Sensor multiponto



Fonte: adaptado de Vahdati et al., 2022.

A Figura 3.5 exibe a estrutura proposta por (Du et al., 2019), que utiliza uma FBG presa em uma barra de ferro-carbono e um gerador de ultrassom também fixado no metal. O sistema de monitoramento conta com uma MMF coberta com nanocompósito de ouro para gerar o sinal ultrassom a partir do efeito fotoacústico. As ondas sonoras se propagam pelo metal, porém, ao longo do processo de corrosão, a perda de massa e a formação de produtos altera a atenuação das diferentes frequências sonoras transmitidas. O sensor detecta a taxa de corrosão devido a variação no comprimento de onda refletido pela grade, que é sensível a vibrações na fibra. (Du et al., 2019) utilizaram laser na região mais linear do espectro da FBG e medidor de potência óptica para detectar o sinal luminoso transmitido, conforme ilustrado na Figura 3.6. Este arranjo possibilita a medição da taxa de corrosão pontual e em tempo real. Um sistema similar que também utiliza FBG fixada em metal para detectar alteração nas vibrações do metal foi proposto por (Sousa et al., 2022), porém, este utiliza um OSA para detectar a variação no comprimento de onda de Bragg.

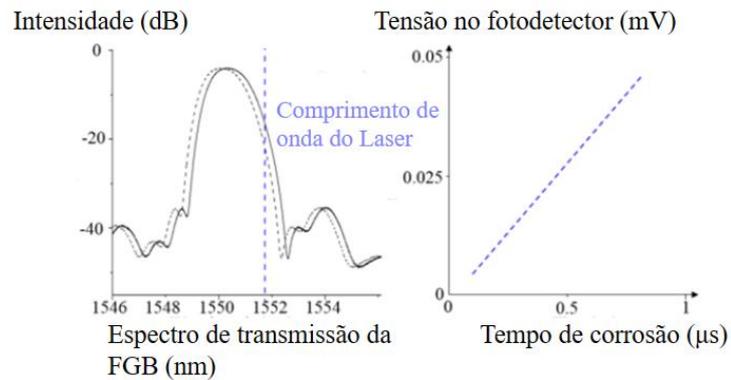
Figura 3.5: Sensor baseado em FBG para detectar vibrações.



Fonte: adaptado de Du et al., 2019.

O sensor proposto na Figura 3.7 usa fibra com grade de período longo (LPFG) com deposição de nanotubos de grafeno e prata (Gr/AgNW) como condutor para a galvanização de uma camada de 20 μm de ferro carbono (Guo, Fan e Chen, 2020). A grade é responsável por acoplar alguns modos na casca, onde sofrem maior atenuação, o que gera vales no espectro transmitido pela fibra (Guo, Fan e Chen, 2020). Devido à dependência do índice efetivo na casca e o comprimento de onda desses modos, é possível correlacionar a perda de massa do metal corroído com o deslocamento dos vales no espectro da LPFG

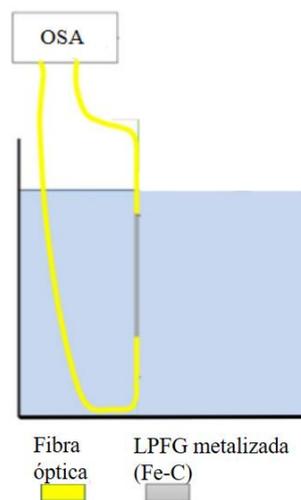
Figura 3.6: Espectro e gráfico obtido com medidor de potência do sensor FBG para detecção de vibrações.



Fonte: adaptado de Du et al., 2019.

(Zhou et al., 2023). O sistema para o experimento da corrosão utilizou um OSA para medição do espectro transmitido pela LPFG imersa em uma solução aquosa de 3,5% de NaCl, por 72 horas. O sensor proposto realiza o monitoramento pontual da corrosão em tempo real. Um sistema de detecção semelhante é encontrado em (Zhou et al., 2023).

Figura 3.7: Sistema de detecção de corrosão baseado em LPFG.



Fonte: adaptado de Guo, Fan e Chen, 2020.

3.4 Sensores Baseados em Fibra Cônica

Um sensor baseado em fibra óptica polimérica (POF) cônica é proposto por (Luo et al., 2021) para detectar a corrosão a partir da compressão na fibra gerada pela expansão do metal corroído. O sensor foi fixado a uma barra de Fe-C, conforme mostra a Figura 3.8, imersa em um meio salino (solução aquosa de 3,5% de NaCl). Os produtos da corrosão aumentam o volume da estrutura metálica gerando alterações na atenuação da POF cônica. O sistema utiliza LED para gerar o sinal, um medidor de potência óptica para aquisição da luz transmitida e realiza o monitoramento da taxa de corrosão em tempo real em um único ponto da barra de aço.

Figura 3.8: Sensor de corrosão baseado em fibra cônica.



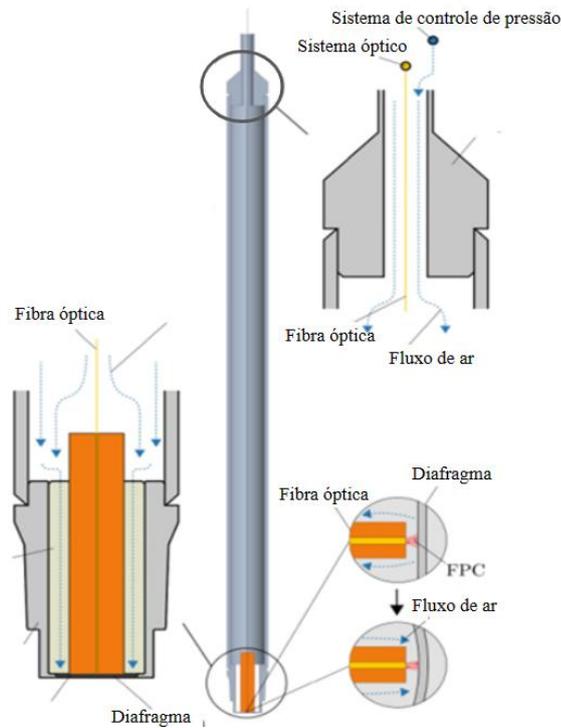
Fonte: adaptado de Luo et al., 2021.

3.5 Sensores Baseados em Interferômetros

O sensor da Figura 3.9, proposto por (Sweeney, Schrell e Petrie, 2021), consiste em uma câmara pressurizada, um sistema de controle de pressão e um diafragma de alumínio que irá refletir a luz guiada por uma fibra em um interferômetro de Fabry-Pérot. A deflexão no diafragma depende da sua espessura e da pressão na câmara. Dessa forma, a taxa de corrosão é medida utilizando a relação entre a depleção do diafragma e sua espessura para o valor de pressão conhecido no interior da câmara. Esse sistema possibilita obter a taxa de corrosão em tempo real através da alteração na fase da luz, gerada pela alteração do comprimento do caminho percorrido entre a fibra e o diafragma metálico. A aquisição de

dados da deflexão do diafragma é feita a partir de um interferômetro de baixa coerência e permite, a partir da deflexão, obter a taxa de corrosão em tempo real.

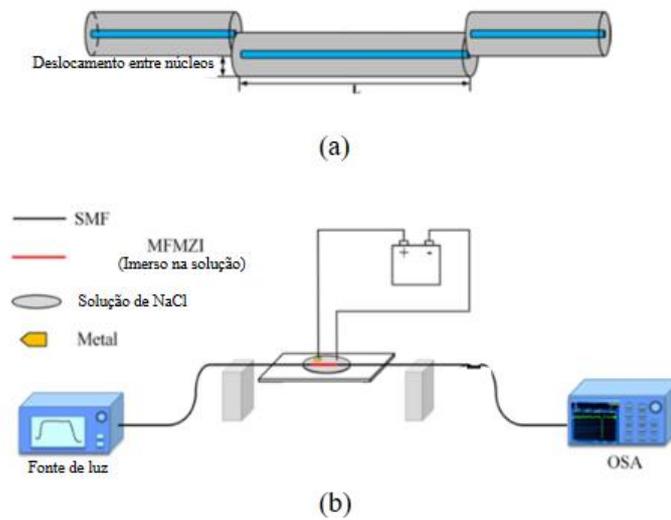
Figura 3.9: Estrutura sensora baseada em interferômetro de Fabry-Pérot.



Fonte: adaptado de Sweeney, Schrell e Petrie, 2021.

O sensor de corrosão baseado em um interferômetro Mach-Zender (MZI) feito com fusão de fibras com incompatibilidade de núcleo (*mismatching*), proposto por (Gong et al., 2020), é mostrado na Figura 3.10(a). O sistema de monitoramento detecta a taxa de corrosão de uma barra de ferro carbono em tempo real através da alteração no índice de refração do meio, pois, ao longo da corrosão, a composição do meio é alterada. A Figura 3.10(b) ilustra a montagem experimental. O índice de refração da solução corrosiva é responsável por alterar o espectro de transmissão no MZI, por isso, o sistema de detecção utiliza uma fonte de luz banda larga e um OSA para realizar a medição do espectro transmitido.

Figura 3.10: Sensor baseado em MZI. (a) Elemento sensor. (b) Sistema de detecção de corrosão



Fonte: adaptado de Gong et al., 2020.

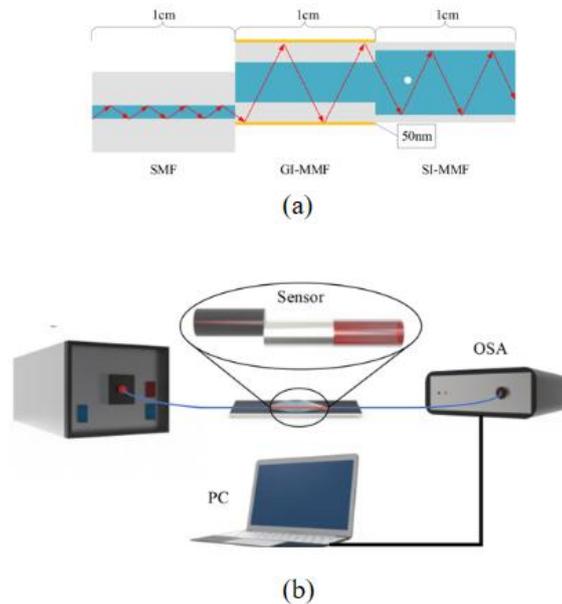
3.6 Sensores Baseados em Ressonância de Plásmon de Superfície

A Figura 3.11(a) ilustra o elemento sensor baseado em ressonância de plásmon de superfície (RPS) proposto por (Zhang et al., 2023). A estrutura é formada por um centímetro de fibra multimodo com índice gradiente metalizada com 50 nm de prata, fundida na extremidade esquerda com um centímetro de SMF com núcleo deslocado de $46,875 \mu\text{m}$, e na extremidade direita com fibra monomodo de índice de refração em degrau (núcleos alinhados), com também um centímetro de comprimento. O monitoramento da taxa de corrosão em tempo real é feito através da variação da profundidade do vale de ressonância do efeito RPS. O sistema, conforme ilustrado na Figura 3.11(b), conta com uma fonte de luz banda larga e um OSA para aquisição do sinal transmitido pelo sensor.

3.7 Sensores Baseados em Fibra de Face Clivada

Em (Martins-Filho et al., 2007) um sistema de monitoramento multiponto da taxa de corrosão baseado em fibra com face clivada e metalizada foi proposto. O sistema da

Figura 3.11: Sensor baseado em RPS. (a) Elemento sensor. (b) Sistema de detecção de corrosão

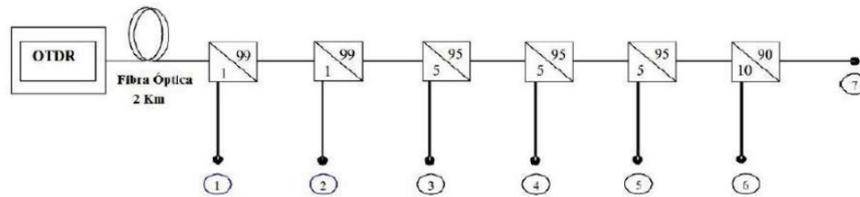


Fonte: adaptado de Zhang et al., 2023.

Figura 3.12 consiste em uma SMF com sete acopladores direcionais, que direcionam o sinal para as sete cabeças sensoras. Cada elemento sensor é composto por uma SMF de face clivada metalizada com 100 nm de alumínio depositado por evaporação térmica (Martins-Filho et al., 2007). Um equipamento para realizar a reflectometria óptica no domínio do tempo (OTDR) faz a aquisição do sinal refletido pela fibra, e em cada face metalizada há um pico de reflexão detectado pelo OTDR, de forma que quando ocorre a corrosão completa do alumínio no sensor 1, por exemplo, observa-se a queda do respectivo pico no OTDR e obtém-se a taxa de corrosão média no ponto 1. Em (Alves et al., 2018) os autores analisam o efeito da corrosão não uniforme na mesma estrutura e propõem um modelo para a rugosidade na camada metálica a partir de dados experimentais.

A Tabela 3.1 resume as informações qualitativas dos sensores de corrosão apresentados nesta revisão. A primeira coluna indica qual a estrutura proposta para o sensor, a segunda indica qual metal foi utilizado como transdutor da corrosão, observa-se que a maior parte dos sensores contam com uma camada metálica sobre a fibra para realizar a transdução de corrosão para índice de refração e os que não possuem metal se baseiam na alteração do índice de refração da solução corrosiva para realizar a detecção. A coluna de princípio

Figura 3.12: Sensor multiponto de face clivada



Fonte: adaptado de Martins-Filho et al., 2007.

físico representa o fenômeno a ser observado que terá relação com a taxa de corrosão do meio monitorado, os parâmetros λ_B , λ_v , λ_i e λ_R representam os comprimentos de onda, respectivamente, de Bragg, de um vale no espectro de transmissão, do modo atenuado na fibra LPFG, e de ressonância do efeito RPS. A coluna “Taxa de corrosão” indica quando o monitoramento é em tempo real ou “atrasado”, isto é, a taxa só é obtida quando ocorre a corrosão completa de um metal de prova. A coluna ”detecção”explicita se o sinal óptico detectado é o refletido ou transmitido pelo elemento sensor e a última coluna mostra o equipamento utilizado para detectar do sinal. Observando a tabela nota-se que a maior parte dos sensores utiliza o analisador de espectro óptico (OSA) para realizar o monitoramento, o que pode ser uma desvantagem em relação ao custo. Além disso, os únicos sensores multiponto não possibilitam o sensoriamento da corrosão em tempo real e também utilizam equipamentos de detecção mais caros, como o OSA ou OTDR, quando comparados com um fotodetector ou medidor de potência óptica (MP).

Tabela 3.1: Parâmetros qualitativos dos sensores de corrosão

Elemento Sensor	Metal	Princípio Físico	Taxa de Corrosão	Pontos de Detecção	Detecção	Equip. de Detecção
SMS-M	Fe-C	λ_v	Tempo real	Pontual	Transmissão	OSA
SNS	-	λ_v	Tempo real	Pontual	Transmissão	OSA
D-M	Fe-C	EP	Tempo real	Pontual	Transmissão	Monitor ER
FBG-SC-M	Fe-C	λ_b	Tempo real	Pontual	Reflexão	OSA
FBG-T-M	Fe-C	λ_b	Atrasada	Multiponto	Reflexão	OSA
FBG-US	-	PT	Tempo real	Pontual	Transmissão	MP
LPFG-M	Fe-C	λ_i	Tempo real	Pontual	Transmissão	OSA
TF	-	PA	Tempo real	Pontual	Transmissão	MP
FPI	Al	Fase	Tempo real	Pontual	Transmissão	Interferômetro
MZI	-	λ_v	Tempo real	Pontual	Transmissão	OSA
FND	Ag	λ_r	Tempo real	Pontual	Transmissão	OSA
FCM	Al	R	Atrasada	Multiponto	Reflexão	OTDR

SMS-M - Heteronúcleo SMS metalizado, em (Tang et al., 2023); SNS - Heteronúcleo monomodo-sem núcleo-monomodo, em (Lin et al, 2023; Tang et. al., 2024); D-M - Perfil D metalizado, em (Hu et al., 2017); FBG-SC-M - FBG sem casca metalizado, em (Zhang et al., 2015); FBG-T-M - FBG tensionado por metal, em (Vahdati et al., 2022); FBG-US - FBG associada a gerador de Ultrassom, em (Du et al., 2019); LPFG-M - Fibra de grade com período longo metalizada, em (Guo, Fan e Chen, 2020; Zhou et al., 2023); TF - fibra cônica, em (Luo et al., 2021); FPI - Interferômetro de Fabry-Pérot, em (Sweeney, Schrell e Petrie, 2021); MZI - Interferômetro de Mach-Zender, em (Gong et al.,2020); FND - Fibra com núcleo deslocado, em (Zhang et al., 2023); FCM - Face clivada Metalizada, em (Martins-Filho et al., 2007; Alves et al., 2018).

Capítulo 4

Metodologia

Este capítulo aborda com detalhes os procedimentos realizados para fabricação do sensor de corrosão baseado em fibra óptica heteronúcleo, desde a fabricação da estrutura heteronúcleo até a metalização. Por fim apresenta os dois sistemas de detecção de corrosão utilizados.

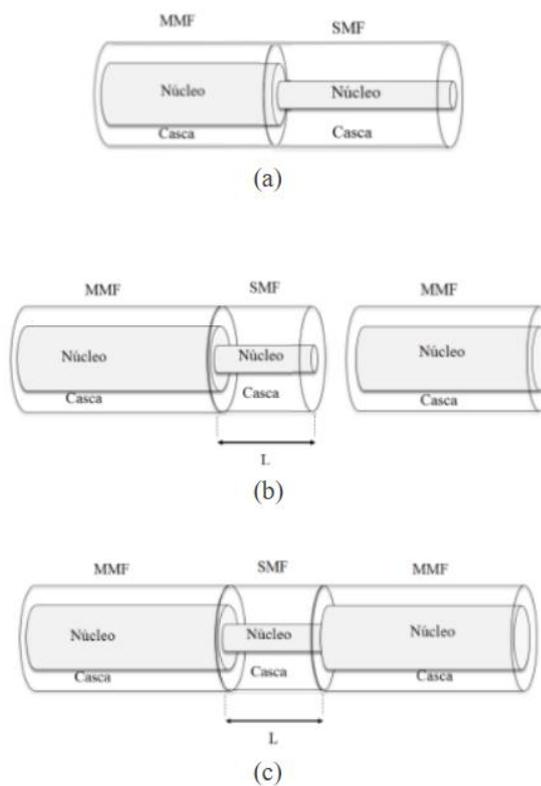
4.1 Fabricação da Estrutura Heteronúcleo

A fabricação do heteronúcleo é realizada em duas etapas: a primeira etapa consiste em fundir a MMF com o trecho de inserção heteronúcleo (no caso, monomodo). Inicia-se retirando a capa de acrilato da fibra em um segmento curto, entre 5 e 6 cm, de forma a restar apenas núcleo e casca. Em seguida, é feita a limpeza de resíduos com um lenço e álcool isopropílico e, por fim, a fibra é clivada utilizando o clivador (*Fiber Cleaver Fitel S326*). O mesmo processo é realizado para a SMF: remove-se o acrilato, limpa-se com álcool e cliva-se a fibra óptica. No entanto, o comprimento da fibra inserida é um parâmetro importante para determinar as características do sensor, por isso, recomenda-se deixar um trecho com o dobro do valor “ L ” desejado. Após clivar ambas as fibras, é feita a emenda utilizando a máquina de fusão (*Fusion Splicer Fitel S178A*). O resultado do fim da primeira etapa é ilustrado na Figura 4.1(a).

Na segunda etapa, é feita a remoção da capa de outro segmento de fibra multimodo, sua limpeza e clivagem. Em seguida, é necessário clivar a outra extremidade do trecho

de inserção heteronúcleo, esta fase é fundamental para determinar o comprimento do heteronúcleo. Utiliza-se um paquímetro para garantir a precisão do comprimento da SMF e, após o corte, a fibra composta pela emenda MMF-SMF tem a estrutura da Figura 4.1(b). Então, faz-se a emenda dela com a fibra MMF clivada no início da segunda etapa para concluir a fabricação, obtendo a estrutura da Figura 4.1(c).

Figura 4.1: Fabricação do Heteronúcleo. (a) Fim da etapa primeira etapa de fabricação do Heteronúcleo. (b) Início da segunda etapa. (c) Fim da segunda etapa, MSM concluído.

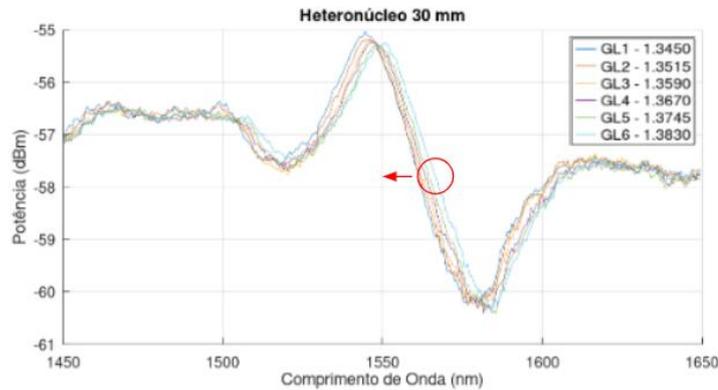


Fonte: adaptado de Oliveira, 2022b.

O comprimento do Heteronúcleo foi definido com o objetivo de otimizar o monitoramento da corrosão a partir de um sistema baseado em um laser de comprimento de onda de 1550 nm e um fotodetector. Para isso, optou-se por tentar sintonizar a região mais linear do espectro do heteronúcleo no comprimento de onda do laser. De acordo com (Oliveira, 2022a), nota-se que a MSM de 30 mm tem um vale em, aproximadamente, 1580 nm, que pode ser observado na Figura 4.2. A partir da equação 2.15, percebe-se que para reduzir o comprimento de onda do vale é necessário reduzir a dimensão do trecho

heteronúcleo, e assim é feito o deslocamento da região mais linear (circulada em vermelho na Figura 4.2) para 1550 nm.

Figura 4.2: Espectro da MSM com 30 mm de comprimento



Fonte: adaptado de Oliveira, 2022a.

Um dos ácidos utilizados, o Al-Etcher (25 H₂PO₄ : 1 HNO₃ : 5 CH₃COOH), tem índice de refração = 1,38 no comprimento de onda de 1550 nm (Oliveira et al., 2021), de modo que, no fim da corrosão, o espectro estaria novamente nessa região, conforme mostra a Figura 4.2 para um índice de refração de 1,383. Assim, sintonizar o MSM para que o comprimento de onda do laser (1550 nm) esteja na metade da região mais linear é razoável.

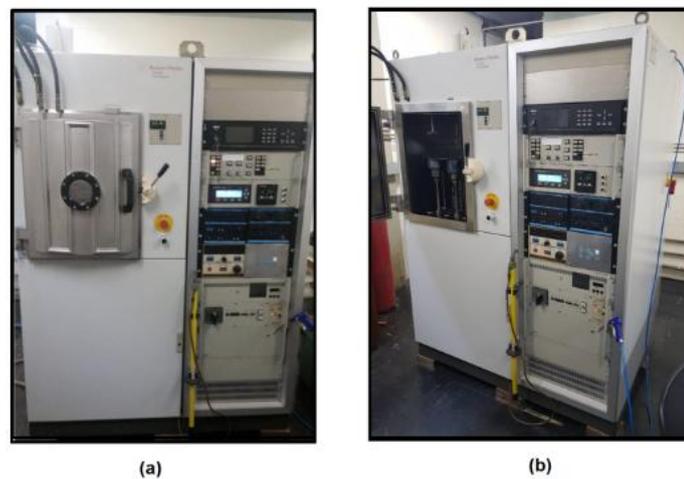
Em contrapartida à sintonização do comprimento de onda almejado, existem algumas fontes de imprecisão nesse processo de escolha do comprimento do heteronúcleo: o valor de L foi definido considerando o ar como meio externo (com índice de refração próximo de 1, diferente do índice do ácido na qual a corrosão ocorrerá), além disso, o MSM é muito sensível às variações do tamanho do trecho de inserção, tal que uma alteração de 0,11 mm gera um deslocamento de 17 nm (para $L = 28,69\text{mm}$ foi obtido $\lambda_v = 1550,4\text{nm}$ enquanto para $L = 28,58\text{mm}$ obteve-se $\lambda_v = 1567,2\text{nm}$), tornando difícil o ajuste da resposta espectral.

Empiricamente, encontrou-se o comprimento de 28,6 mm para centralizar a região linear em 1550 nm, com o heteronúcleo no ar. Esse foi o comprimento das estruturas MSM fabricadas para a metalização.

4.2 Metalização

A metalização foi realizada pelo processo de *sputtering*, utilizando o dispositivo “*Balzers-Pfeffer model PLS 500*”, mostrado na Figura 4.3, que pertence ao Departamento de Física da UFPE. Foi depositada uma camada de 200 nm de alumínio sobre as amostras de heteronúcleo fixas na placa ilustrada na Figura 4.4(b).

Figura 4.3: Máquina de *sputtering* (a) Com câmara de vácuo fechada (b) Com câmara de vácuo aberta



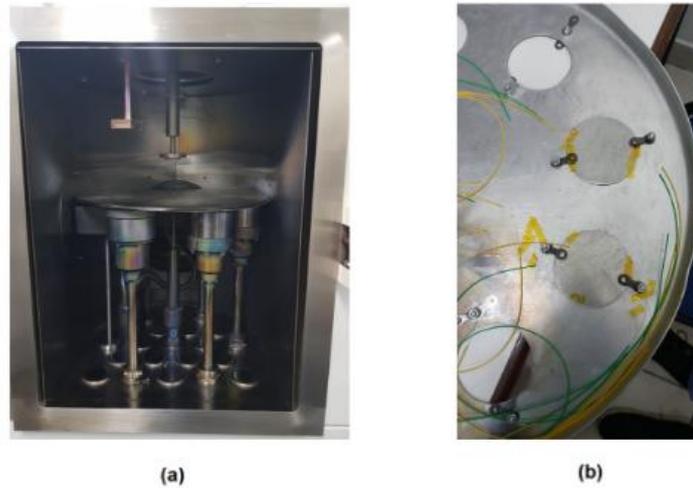
Fonte: Oliveira, 2022b.

A metalização ocorre sem haver a rotação do heteronúcleo, de forma que a porção da fibra em contato com o anteparo da Figura 4.4(b) não recebe a camada metálica, assim, o alumínio é depositado apenas sobre o semicilindro exposto da estrutura. A Figura 4.5 ilustra em (a) a seção transversal e em (b) a seção longitudinal do MSM metalizado, já a Figura 4.6 conta com uma representação tridimensional do sensor.

4.3 Sistema de Detecção de Corrosão

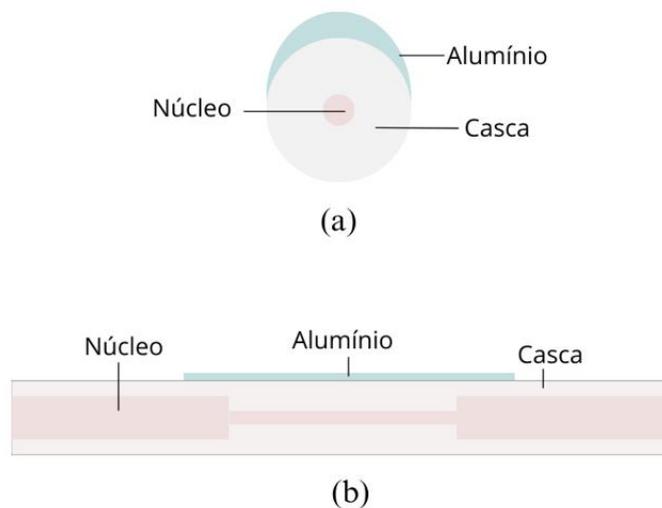
Foram montados dois sistemas de detecção diferentes: o primeiro usa o ácido Cr-Etcher ($9\%(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6 + 6\%\text{HClO}_4 + \text{H}_2\text{O}$) para corroer o metal, OSA (Ando AQ-6315A, realizando 200 médias e com resolução de 10 nm) e luz banda larga, para obter o espectro ao longo da corrosão. O ácido em questão tem taxa de corrosão de 3,8

Figura 4.4: (a) Câmara de vácuo da máquina de *sputter*. (b) Suporte metálico para metalização



Fonte: o Autor.

Figura 4.5: Ilustração do heteronúcleo metalizado. (a) Seção transversal. (b) Seção longitudinal.

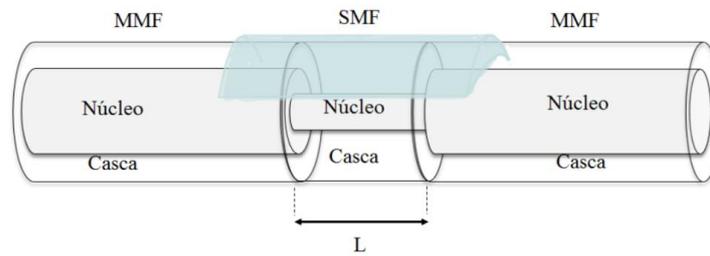


Fonte: o Autor.

nm/min (Williams, Gupta e Wasilik, 2003), de forma que a duração total do processo de corrosão é aproximadamente 53 minutos, tempo suficiente para registrar mais de 60 espectros do MSM. A Figura 4.7 ilustra a montagem descrita, .

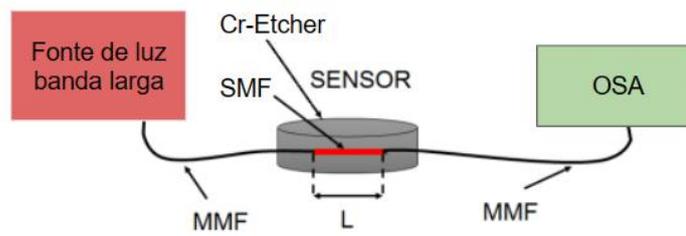
O segundo sistema, mostrado na Figura 4.8, utiliza o Al-Etcher, laser no comprimento 1550 nm (*New focus* TLB 3900) e um fotodetector (DET410 da *ThorLabs*). A taxa de

Figura 4.6: Representação tridimensional do heteronúcleo metalizado



Fonte: o Autor.

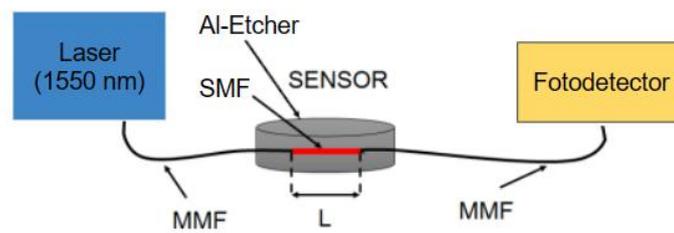
Figura 4.7: Sistema de monitoramento da corrosão com ácido Cr-Etcher baseado em OSA



Fonte: adaptado de Oliveira, 2022b.

corrosão desse ácido é de 50 nm/min (Martins-Filho et al., 2007), resultando em um tempo total próximo de 4 minutos para corroer completamente os 200 nm de alumínio no dispositivo. Devido à curta vida útil do sensor nessa montagem, não é possível obter o espectro ao longo do experimento (o OSA leva cerca de 45 segundos para registrar um espectro), mas o fotodetector é rápido o suficiente, permitindo obter a potência transmitida ao longo do processo de corrosão.

Figura 4.8: Sistema de Monitoramento da corrosão com ácido Al-Etcher baseado em fotodetector



Fonte: adaptado de Oliveira, 2022b.

Capítulo 5

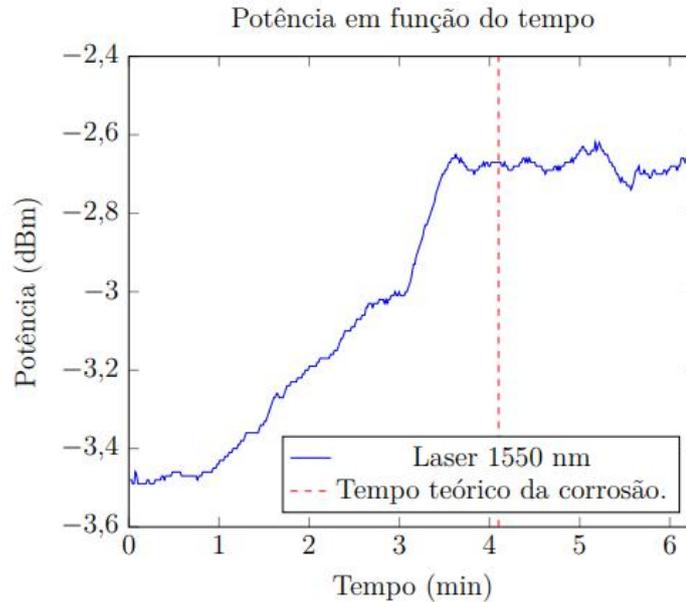
Resultados

A Figura 5.1 ilustra a potência óptica transmitida durante o experimento com sistema da Figura 4.8, composto por laser, fotodetector e Al-etcher para a corrosão da amostra H1. A duração total foi de 10 minutos, no entanto, após 6 minutos a potência estabiliza e fica praticamente constante. A linha tracejada em vermelho indica o tempo estimado para o fim da corrosão baseado na taxa de corrosão do ácido encontrada em (Martins-Filho et al., 2007). A Figura 5.2 mostra a potência óptica no intervalo de quatro minutos, a regressão linear para os dados do gráfico e uma tabela com o coeficiente de linearização e equação da reta em vermelho.

O comportamento da potência transmitida corrobora com a teoria, pois o material condutor absorve uma parte da luz que se propaga na casca da fibra monomodo (Fontana, 2023), de forma que, ao longo da corrosão, a camada de alumínio é gradualmente reduzida, resultando no aumento gradual da potência óptica que atinge o fotodetector. Com isso, ao considerar a corrosão uniforme e com taxa constante, a potência óptica irá crescer gradativamente até atingir a saturação do sensor, quando toda a camada metálica tiver sido corroída. Após esse instante, espera-se que a potência óptica permaneça constante, uma vez que não há alteração no meio em que a fibra está inserida.

A Figura 5.3 ilustra o resultado para uma montagem idêntica à anterior utilizando outra amostra, H3, com laser e fotodetector. No entanto, constata-se que existe alguma fonte de ruído ou interferência intensa o suficiente para impossibilitar a detecção da corrosão no metal. Após o fim da corrosão, espera-se que a potência fique estável, porém,

Figura 5.1: Potência do laser transmitida ao longo da corrosão do MSM por Al-etcher para a amostra H1.



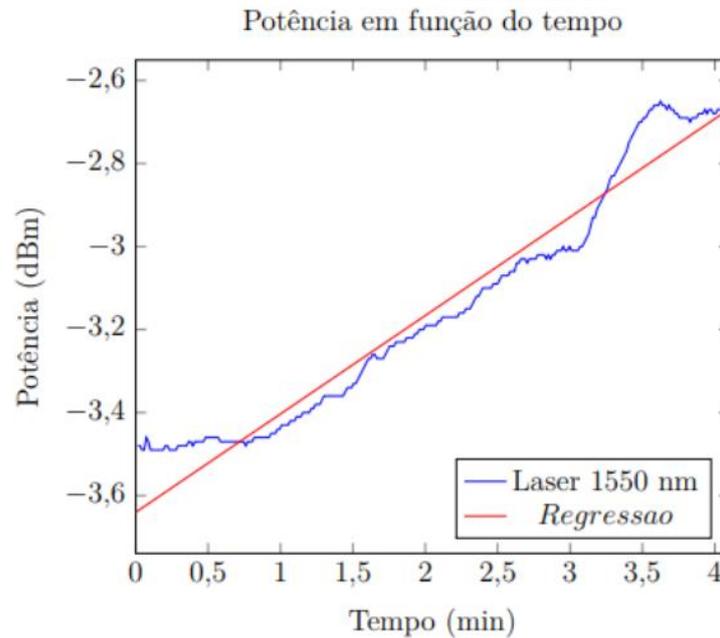
Fonte: O autor

observa-se a variação aleatória de cerca de 0,5 dBm. Com isso, desqualifica-se os dados obtidos nesse experimento, pois o ruído é da ordem da variação de potência ao longo da corrosão completa (cerca de 0,8 dBm no experimento da Figura 5.1).

O sistema de detecção baseado em fonte de luz banda larga, OSA e corrosão por Cr-Etcher tem seu resultado ilustrado na Figura 5.4, onde observa-se o espectro do MSM ao longo da corrosão com passos de 5 minutos. Para o sensor metalizado, nota-se que os espectros iniciais perdem sua forma bem definida de vales e picos, em consequência da absorção pela camada de alumínio. A partir de 45 minutos, não há diferença visível nos espectros obtidos, de forma que a curva de 50 minutos se sobrepõe à de 45 minutos.

De acordo com a Figura 5.4, observa-se que a região mais linear do espectro está centrada em torno de 1550 nm, conforme o objetivo na fabricação da estrutura Heteronúcleo. O gráfico da Figura 5.5 é obtido isolando-se os valores de potência dos espectros para o comprimento de onda de 1550 nm, representada pela curva azul. Vale ressaltar que na Figura 5.4 mostra-se apenas nove espectros dos setenta obtidos, enquanto para obter a Figura 5.5 todos os setenta valores de potência em 1550 nm foram utilizados. Além da

Figura 5.2: Regressão Linear da Potência em 1550 nm ao longo da corrosão do MSM H1 por Al-Etcher.



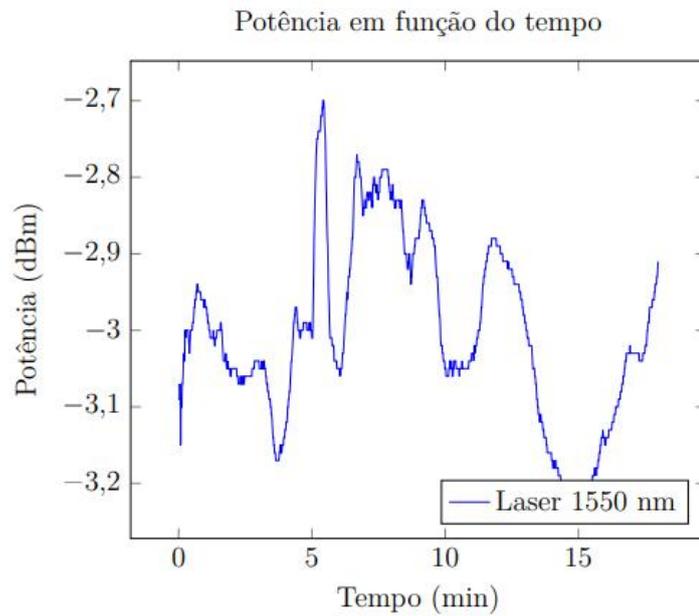
R^2	0,9588
$y(x)$	$0,23697x - 3,64016$

Fonte: O autor

curva azul, há a regressão linear para o tempo da corrosão (em vermelho) e abaixo uma tabela com o coeficiente de linearização e a equação da reta. Note que, diferente da Figura 5.2, cujo sistema de medição utiliza o laser, a Figura 5.5 é obtida para o sistema que utiliza o OSA e fonte banda larga, porém o comportamento dos dois sensores é similar, conforme esperado.

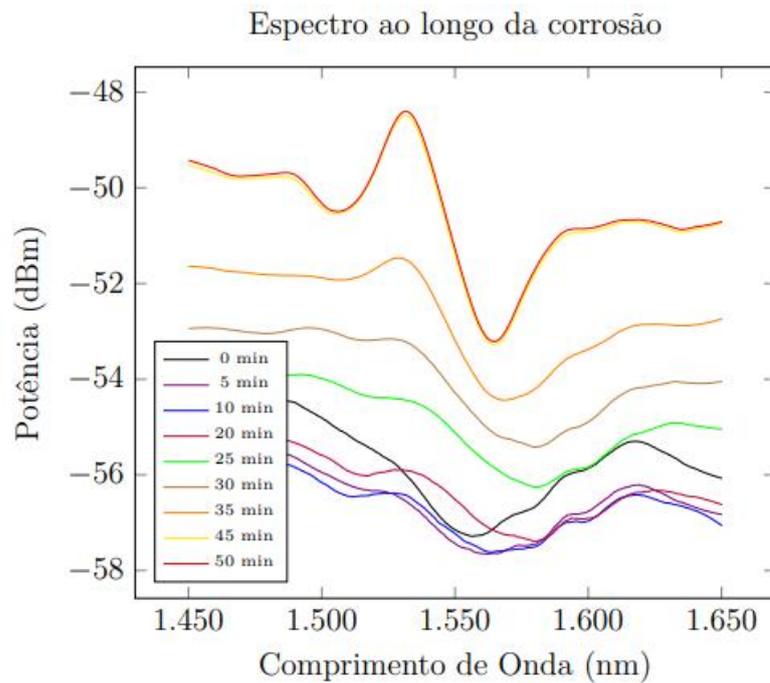
A partir da regressão linear para os dados das Figuras 5.2 e 5.5 e das taxas de corrosão dos ácidos utilizados em cada experimento, é possível obter a sensibilidade dos dispositivos. De acordo com (Fraden, 2010), a sensibilidade é a derivada da potência óptica em função da espessura da camada de alumínio, no entanto, usando a aproximação linear para a variação de potência em relação ao tempo e considerando a taxa de corrosão constante, descreve-se a sensibilidade do sensor como:

Figura 5.3: Potência do laser transmitida ao longo da corrosão por Al-etcher para a amostra H3.



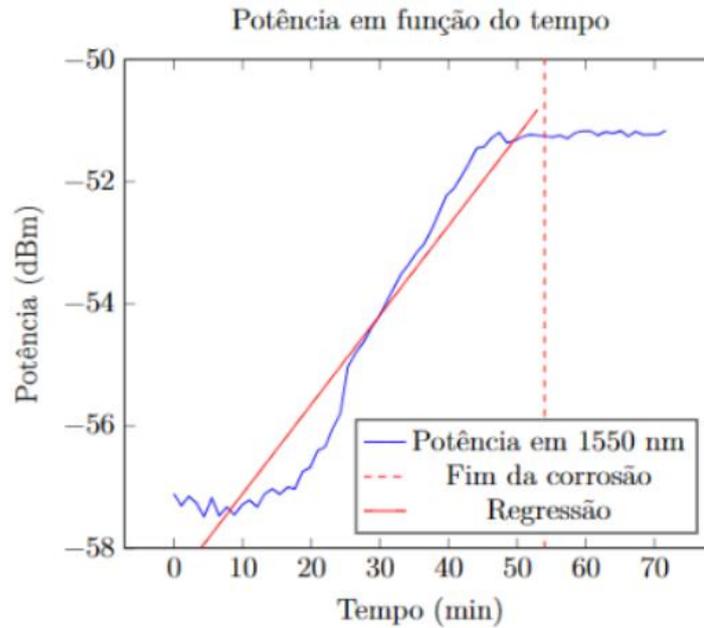
Fonte: O autor

Figura 5.4: Espectro transmitido para diferentes tempos durante a corrosão por Cr-etcher da amostra H2.



Fonte: O autor

Figura 5.5: Potência em 1550 nm ao longo da corrosão por Cr-etcher para amostra H2 e regressão linear.



R^2	0,9390
$y(x)$	$0,1463x - 58,5751$

Fonte: O autor

$$S = \frac{\Delta P_{op}}{\Delta d_{al}} \quad (5.1)$$

em que S é a sensibilidade, P_{op} é a potência óptica e d_{al} é a espessura da camada metálica.

Note que a taxa de variação da potência óptica em função do tempo foi obtida experimentalmente e a taxa de corrosão em função do tempo é conhecida, considera-se ambas constantes para encontrar a sensibilidade a partir da equação 5.1. Utilizando os valores da taxa de corrosão obtidos da literatura (Martins-Filho et al., 2007; Williams, Gupta e Wasilik, 2003) e as inclinações das retas de regressão linear, denotadas por (cr) e (A) , respectivamente, é possível obter a sensibilidade em termos da espessura do metal, expressa na equação 5.2.

$$S = \frac{\Delta P_{op}}{\Delta t} \times \left(\frac{\Delta d_{al}}{\Delta t}\right)^{-1} = \frac{A}{cr} \quad (5.2)$$

A Tabela 5.1 apresenta os valores de sensibilidade e resolução obtidos para cada experimento. A resolução é definida como o incremento correspondente à menor variação da grandeza de interesse que pode ser medida (Fraden, 2010), e é possível estimá-la dividindo a resolução dos dispositivos usados para medir a potência óptica pela sensibilidade dos sensores. Assumindo a resolução de 0,1 dBm, tanto para o fotodetector quanto para o OSA, encontra-se os valores da Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Figuras de mérito dos sensores

	A [dBm/min]	cr [nm/min]	Sensibilidade [dBm/nm]	Resolução [nm]
H1	0,237	50,000	0,005	21,099
H2	0,146	3,800	0,038	2,597

Ressalta-se que apesar de o sensor H2 ter sensibilidade cerca de sete vezes maior que o sensor H1, o sistema de detecção baseado no OSA é consideravelmente mais caro que o sistema que utiliza o fotodetector. Além disso, os valores de resolução da tabela 5.1 são meramente comparativos, uma vez que não se sabe a resolução real dos equipamentos de detecção utilizados.

Para ambos os sensores H1 e H2 observa-se um intervalo de tempo no qual não há variação significativa da potência óptica transmitida, vide Figuras 5.2 e 5.5. Para a amostra H1, que tem a corrosão representada na Figura 5.2, leva cerca de um minuto até que a potência comece a crescer com a corrosão. Em termos de espessura de alumínio, para a taxa de corrosão de 50 nm/min do Al-etcher, isso equivale à 50 nm do metal. Já para a amostra H2, observando-se a Figura 5.5, o tempo até iniciar o crescimento da potência transmitida é de aproximadamente 13 minutos. O intervalo de 13 minutos equivale à corrosão de 49,4 nm de alumínio a uma taxa de 3,8 nm/min, do ácido Cr-etcher. Dessa forma, pode-se concluir que o sensor está saturado quando a camada de alumínio tem espessura superior a 150 nm, por isso entre 200 nm e 150 nm não há detecção da corrosão.

A ampla faixa de detecção de corrosão obtida supera outros sensores de corrosão

baseados em fibra óptica que utilizam o mesmo material metálico, pois, na literatura o limite de detecção é inferior à 100 nm de espessura de alumínio (Hu et al., 2017; Martins-Filho et al., 2007). Uma possível explicação para faixa de detecção obtida pelo sensor é justamente a geometria da estrutura, que possibilita a redução da camada metálica tanto em espessura quanto em ângulo, ao longo do processo corrosivo.

Figura 5.6: Representação da corrosão do sensor.



Fonte: O autor

Na Figura 5.6 ilustra-se a variação da camada de alumínio ao longo da corrosão, em que os seguimentos de reta em verde destacam o ângulo que a interface entre a casca da fibra e o alumínio faz com o ponto de maior espessura do alumínio. Ao longo do processo corrosivo espera-se que a camada metálica seja reduzida através de dois mecanismos: o ângulo denotado por θ , na Figura 5.6, deve decrescer simultaneamente ao processo de redução de espessura no topo da fibra, conforme ilustrado na Figura 5.6.

Capítulo 6

Considerações Finais

Este trabalho apresentou a fundamentação teórica dos principais fenômenos relevantes para o sensor proposto, revisão bibliográfica acerca dos sensores de corrosão baseados em fibra óptica, fabricação e caracterização de dois sensores heteronúcleo MSM metalizados com alumínio bem como o experimento de corrosão de ambos, utilizando dois equipamentos de detecção diferentes (analisador de espectro óptico e fotodetector).

6.1 Conclusão

Foram obtidas a sensibilidade de cada estrutura, que é representada pela inclinação da curva das Figuras 5.2 e 5.5, e a resolução. Observa-se na Tabela 5.1 que o sensor H2, cujo experimento foi realizado com o ácido Cr-etcher e o OSA para monitoramento, atingiu maior sensibilidade (0,038 dBm/nm), no entanto, a faixa de medição desse sistema está em -50 dBm. Já o dispositivo H1, obteve sensibilidade de 0,005 dBm/nm e faixa de medição em torno de -3 dBm. Nota-se que, apesar da espessura de alumínio ser igual para ambos, a potência fornecida pela fonte é um parâmetro importante para determinar a variação total de potência óptica durante a corrosão, tal que a escolha da fonte luminosa e do equipamento de detecção é relevante para a sensibilidade e resolução do sensor. Além disso, a resolução apresentada na Tabela 5.1 é uma estimativa que não se baseia na resolução do instrumento de detecção (OSA ou fotodetector) utilizado, por isso, é possível obter valores melhores (menor resolução) que os da tabela, a depender da resolução do

aparelho de detecção empregado.

6.2 Trabalhos Futuros

Alguns possíveis trabalhos contemplando o aperfeiçoamento do sensor e investigação de seu comportamento em condições mais próximas da aplicação para comprovar o seu funcionamento e aplicabilidade são elencados:

- Estudar a deposição de diferentes tipos de metais com o intuito de alcançar maior sensibilidade.
- Estudar diferentes fontes luminosas (com diferentes potências) para encontrar o ponto de operação ótimo.
- Simular diferentes geometrias para a camada metálica, a fim de aumentar a vida útil do sensor.
- Corroer o sensor em ambiente que simule o interior de um *pipeline* de petróleo.
- Estudar a possibilidade de fabricar um sensor multiponto com estruturas heteronúcleo em cascata.

Referências

AGRAWAL, G. *Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2014. Google-Books-ID: G5OoBQAAQBAJ. ISBN 978-85-352-6466-1.

ALVES, H. P.; NASCIMENTO, J. F.; FONTANA, E.; COELHO, I. J. S.; MARTINS-FILHO, J. F. Transition layer and surface roughness effects on the response of metal-based fiber-optic corrosion sensors. *Journal of Lightwave Technology*, v. 36, n. 13, p. 2597–2605, 2018.

ASHRY, I.; MAO, Y.; WANG, B.; HVEDING, F.; BUKHAMSEEN, A.; NG, T. K.; OOI, B. A Review of Distributed Fiber–Optic Sensing in the Oil and Gas Industry. *Journal of Lightwave Technology*, PP, p. 1–1, dez. 2021.

BALDWIN, C. 8 - Fiber Optic Sensors in the Oil and Gas Industry: Current and Future Applications. In: ALEMOHAMMAD, H. (Ed.). *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors*. Butterworth-Heinemann, 2018. p. 211–236. ISBN 978-0-12-803131-5. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128031315000088>).

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*, v. 68, n. 11, p. 4559–4565, nov. 2019. ISSN 0018-9456, 1557-9662. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8611284/>).

FONTANA, E. *Tratado de eletromagnetismo*. Editora da Unicamp, 2023. ISBN 9788526815278. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Mrka0AEACAAJ>).

FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer New York, 2010. ISBN 9781441964663. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=W0Emv9dAJ1kC>).

GONG, T.; LIU, X.; WANG, Z.; LIU, Y. Ultrasensitivity Steel Surface Corrosion Noncontacted Monitoring Based on a Mismatching Fused Mach–Zehnder Interferometric Fiber Sensor. *IEEE Sensors Journal*, v. 20, n. 21, p. 12732–12738, nov. 2020. ISSN 1530-437X, 1558-1748, 2379-9153. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9119475/>).

GUO, C.; FAN, L.; CHEN, G. Corrosion-Induced Mass Loss Measurement under Strain Conditions through Gr/AgNW-Based, Fe-C Coated LPFG Sensors. *Sensors*, v. 20, n. 6, p. 1598, jan. 2020. ISSN 1424-8220. Number: 6 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/6/1598>.

HU, W.; DING, L.; ZHU, C.; GUO, D.; YUAN, Y.; MA, N.; CHEN, W. Optical Fiber Polarizer With Fe-C Film for Corrosion Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, v. 17, n. 21, p. 6904–6910, nov. 2017. ISSN 1558-1748. Conference Name: IEEE Sensors Journal. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8015128>.

JIANG, T.; REN, L.; JIA, Z.-g.; LI, D.-s.; LI, H.-n. Pipeline internal corrosion monitoring based on distributed strain measurement technique. *Structural Control and Health Monitoring*, Wiley Online Library, v. 24, n. 11, p. e2016, 2017.

LIN, S.; TANG, F.; DANG, J.; LI, X. Automatic detection of steel rebar corrosion based on machine learning and light spectrum of fiber optic corrosion sensors. *Optical Fiber Technology*, v. 79, p. 103379, set. 2023. ISSN 1068-5200. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520023001591>.

LUO, D.; LI, Y.; LU, T.; LIM, K.-S.; AHMAD, H. Tapered Polymer Optical Fiber Sensors for Monitoring the Steel Bar Corrosion. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 70, p. 1–9, 2021. ISSN 0018-9456, 1557-9662. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9486882/>.

MARTINS-FILHO, J.; FONTANA, E.; GUIMARAES, J.; PIZZATO, D.; COÊLHO, I. Fiber-optic-based Corrosion Sensor using OTDR. dez. 2007. Journal Abbreviation: Proceedings of IEEE Sensors Pages: 1174 Publication Title: Proceedings of IEEE Sensors.

OLIVEIRA, C. H. J. d. *Sensor à fibra óptica heteronúcleo MSM para monitoramento da densidade de eletrólito de baterias de chumbo-ácido*. 2022.

OLIVEIRA, H. J. B. d. *Sensores à fibra óptica com dupla camada metálica na faceta e com estrutura heteronúcleo*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2022.

OLIVEIRA, H. J. B. d.; JR, E. A. S.; ALVES, H. P.; NASCIMENTO, J. F. d.; VILELA-LEÃO, L. H.; GONÇALVES, C. S.; FILHO, J. F. M. Corrosion Sensor Using Metallic Double Layer in Optical Fiber. *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, v. 20, p. 513–525, set. 2021. ISSN 2179-1074. Publisher: Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica e Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jmoea/a/hF8Dh5KgsQkRg4KBqCSDBDS/?lang=en>.

POPOOLA, L. T.; GREMA, A. S.; LATINWO, G. K.; GUTTI, B.; BALOGUN, A. S. Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation. *Int J Ind Chem*, v. 4, n. 1, p. 35, set. 2013. ISSN 2228-5547. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-35>).

SACHS, I. A revolução energética do século XXI. *Estud. av.*, v. 21, p. 21–38, abr. 2007. ISSN 0103-4014, 1806-9592. Publisher: Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/r58837Jrf8wBvdbfg5KRfRf/?lang=pt&format=html>).

SOUSA, I.; PEREIRA, L.; MESQUITA, E.; SOUZA, V. L.; ARAÚJO, W. S.; CABRAL, A.; ALBERTO, N.; VARUM, H.; ANTUNES, P. Sensing system based on fbg for corrosion monitoring in metallic structures. *Sensors*, v. 22, n. 16, p. 5947, 2022. ISSN 1424-8220. Number: 16 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/16/5947>).

SWEENEY, D. C.; SCHRELL, A. M.; PETRIE, C. M. Pressure-Driven Fiber-Optic Sensor for Online Corrosion Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 70, p. 1–10, 2021. ISSN 0018-9456, 1557-9662. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9454553/>).

TANG, F.; BAI, J.; LI, G.; ZHIBIN, L.; LI, H.-N. Monitoring under-coating corrosion of painted structural steel with no-core fiber optic sensors. *Measurement*, v. 225, p. 114075, fev. 2024. ISSN 0263-2241. Publisher: Elsevier. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez16.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0263224123016391>).

TANG, F.; ZHOU, G.; LI, T.; DANG, J.; LI, H.-N. Fe-C-Coated Single-Mode–Multimode–Single-Mode Optical Fiber Sensor for Steel Corrosion Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, v. 22, n. 19, p. 18508–18516, out. 2022. ISSN 1530-437X, 1558-1748, 2379-9153. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9869418/>).

VAHDATI, N.; SHIRYAYEV, O.; PARAPURATH, S. M.; YAP, F. F.; BUTT, H. Cost-Effective Corrosion Detection Sensor for Above-Ground Oil and Gas Flowlines. *Sensors*, v. 22, n. 21, p. 8489, jan. 2022. ISSN 1424-8220. Number: 21 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/21/8489>).

WANG, K.; DONG, X.; KÖHLER, M. H.; KIENLE, P.; BIAN, Q.; JAKOBI, M.; KOCH, A. W. Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (MMI): A review. v. 21, n. 1, p. 132–142, 2021. ISSN 1558-1748. Conference Name: IEEE Sensors Journal. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9162065>).

WILLIAMS, K.; GUPTA, K.; WASILIK, M. Etch rates for micromachining processing-part ii. *Journal of Microelectromechanical Systems*, v. 12, n. 6, p. 761–778, 2003.

WORLD energy consumption by energy source 2050. 2019. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/222066/projected-global-energy-consumption-by-source/>.

ZHANG, C.; ZHANG, X.; LIU, C.; CHEN, H.; HUANG, Z.; FU, G. Corrosion sensor based on surface plasmon resonance effect of core-offset splicing fiber. *Optical Fiber Technology*, v. 80, p. 103412, out. 2023. ISSN 1068-5200. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S106852002300192X>.

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*, v. 15, n. 6, p. 3551–3556, jun. 2015. ISSN 1558-1748. Conference Name: IEEE Sensors Journal. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7012007>.

ZHOU, G.; TANG, F.; LI, G.; LIN, Z.; LI, H.-N. Long-Period Grating Fiber Optic Sensors Coated With Gold Film and Pulse-Electroplated Iron–Carbon Layer for Reinforcing Steel Corrosion Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 72, p. 1–11, 2023. ISSN 0018-9456, 1557-9662. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10147879/>.