



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ISRAEL NILTON LOPES SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA SENSORIAL ÓTICO PARA O
MONITORAMENTO CONTÍNUO DA INTEGRIDADE DE ESTRUTURAS**

RUSSAS
2021

ISRAEL NILTON LOPES SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA SENSORIAL ÓTICO PARA O MONITORAMENTO
CONTÍNUO DA INTEGRIDADE DE ESTRUTURAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará, Campus
Russas, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes
Teixeira Mesquita.

RUSSAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S696d Sousa, Israel Nilton Lopes.
Desenvolvimento de um sistema sensorial ótico para o monitoramento contínuo da integridade de estruturas / Israel Nilton Lopes Sousa. – 2021.
51 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.
1. Sensores óticos com base em redes de Bragg. 2. Monitoramento. 3. Corrosão. I. Título.

CDD 620

ISRAEL NILTON LOPES SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA SENSORIAL ÓTICO PARA O MONITORAMENTO
CONTÍNUO DA INTEGRIDADE DE ESTRUTURAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará, Campus
Russas, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Nélia Jordão Alberto
Instituto de Telecomunicações - Universidade de Aveiro (UA)

Dedico este trabalho à minha família,
especialmente para meus pais e irmãs.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e acolhimento ao longo de toda minha vida.

À FUNCAP e à CEGÁS, pelo apoio financeiro com o financiamento do projeto de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita, pela orientação e amizade, que foram essenciais para este trabalho e para a minha formação acadêmica.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC), principalmente ao Professor Walney Silva Araújo e à Vitória Lima de Souza, pelas valiosas contribuições e sugestões.

À Universidade de Aveiro, pelo intercâmbio que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções (LAREB), e aos colegas de laboratório, que auxiliaram com amizade e companheirismo na realização de muitos trabalhos, ao longo dos anos de graduação.

Ao Professor Paulo Fernando da Costa Antunes e ao Luis Miguel Antunes Pereira, por ter recebido na Universidade de Aveiro e colaborado diretamente na realização deste trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora Antônio Eduardo Bezerra Cabral e Nélia Jordão Alberto pelo tempo e pelas valiosas colaborações.

Aos meus amigos, pelo auxílio e compromisso.

Aos colegas de turma, pela amizade, paciência e pelos momentos de compreensão.

Aos meus professores, que tanto contribuíram na minha formação e no meu aprendizado.

“O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são.”

(Aristóteles)

RESUMO

Nos últimos anos, têm-se desenvolvido uma forte tendência à utilização de sensores óticos com base em redes de Bragg para o monitoramento de diversos parâmetros, graças às vantagens em relação aos demais sensores. Dentre essas vantagens, destacam-se o aumento da relação sinal-ruído, rapidez e eficiência na coleta de dados, possibilidade de utilização em ambientes agressivos, imunidade à interferência eletromagnética, isolamento elétrico, peso e tamanho reduzidos, maior vida útil, entre outros. Já é bem difundido na técnica e na literatura, métodos de monitoramento para parâmetros como temperatura, deformação, tensão, índice de refração, aceleração e umidade relativa. Diante disso, destaca-se o atual cenário de aplicações desses sensores no Brasil, onde há trabalhos voltados para o monitoramento de obras de arte de engenharia (como pontes e viadutos) e estruturas similares, no entanto, a aplicação ainda é escassa em setores da infraestrutura, como estações portuárias e dutos de transporte de inflamáveis. Portanto, através deste trabalho, é proposto o desenvolvimento de um sistema sensorial ótico com base em redes de Bragg para realizar o monitoramento da perda de espessura de uma placa metálica de aço carbono 1020 submetida à corrosão controlada, mediante coleta de dados da variação da frequência natural da placa em função do tempo. Para validar os resultados obtidos experimentalmente, foram realizados também ensaios eletroquímicos submetida a condições semelhantes, assim como foi ajustado um modelo numérico representativo da situação observada experimentalmente. Através dos testes realizados, foi possível observar que os resultados encontrados experimentalmente apresentavam uma adequada fiabilidade, indicando a adequada funcionalidade dos sensores para o monitoramento da perda de espessura ocasionadas por meio de corrosão em estruturas metálicas.

Palavras-chave: Sensores óticos com base em redes de Bragg. Monitoramento. Corrosão.

ABSTRACT

In recent years, there has been a strong trend towards the use of optical sensors based on Bragg gratings to monitor various parameters, thanks to the advantages over other sensors. Among these advantages, there is an increase in the signal-to-noise ratio, speed and efficiency in data collection, possibility of use in aggressive environments, immunity to electromagnetic interference, electrical insulation, reduced weight and size, longer useful life, among others. Monitoring methods for parameters such as temperature, deformation, stress, refractive index, acceleration and relative humidity are already widespread in the technique and literature. Given this, the current scenario of applications of these sensors in Brazil stands out, where there are works aimed at monitoring engineering works of art (such as bridges and viaducts) and similar structures, however, the application is still scarce in sectors of the infrastructure, such as port stations and flammable transport pipelines. Therefore, through this work, it is proposed to develop an optical sensory system based on Bragg gratings to monitor the thickness loss of a 1020 carbon steel metal plate subjected to controlled corrosion, by collecting frequency variation data of the plate as a function of time. To validate the results obtained experimentally, electrochemical tests were also performed under similar conditions, as well as a numerical model representative of the situation observed experimentally was adjusted. Through the tests carried out, it was possible to observe that the results found experimentally presented an adequate reliability, indicating the adequate functionality of the sensors for monitoring the loss of thickness caused by corrosion in metallic structures.

Keywords: Optical sensors based on Bragg gratings. Monitoring. Corrosion.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Princípio de funcionamento de uma FBG..... | 18 |
| Figura 2 - Gravação de redes de Bragg em fibra ótica por meio de máscara de fase..... | 20 |
| Figura 3 - Posicionamento dos sensores na placa metálica..... | 22 |
| Figura 4 - Esquema de posicionamento dos sensores baseados em FBG's..... | 23 |
| Figura 5 - Montagem experimental da célula eletroquímica..... | 24 |
| Figura 6 - Solução de NaCl 1M e produtos de corrosão da placa em diferentes períodos..... | 34 |
| Figura 7 - Modelo numérico ajustado da placa sob ação de corrosão..... | 44 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Variação da espessura em função do tempo de ação da corrosão | 25 |
| Gráfico 2 - Resposta do sensor 1 à aplicação e remoção súbita de uma carga, 48 horas após a aplicação da solução de NaCl 1M | 26 |
| Gráfico 3 - Espectro de frequência dos dados representados no gráfico 2..... | 27 |
| Gráfico 4 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 1 | 27 |
| Gráfico 5 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 2..... | 28 |
| Gráfico 6 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 3..... | 29 |
| Gráfico 7 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 4..... | 29 |
| Gráfico 8 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 5..... | 30 |
| Gráfico 9 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 6..... | 31 |
| Gráfico 10 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 7 ... | 31 |
| Gráfico 11 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 8 ... | 32 |
| Gráfico 12 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 9 ... | 32 |
| Gráfico 13 - Superposição dos dados encontrados pelos nove sensores | 33 |
| Gráfico 14 - Curva definida em função da razão q e do tempo de ação da corrosão | 36 |
| Gráfico 15 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 1 | 37 |
| Gráfico 16 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 2 | 37 |
| Gráfico 17 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 3 | 38 |
| Gráfico 18 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 4 | 38 |
| Gráfico 19 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 5 | 39 |
| Gráfico 20 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 6 | 39 |

| | |
|---|----|
| Gráfico 21 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 7 | 40 |
| Gráfico 22 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 8 | 40 |
| Gráfico 23 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 9 | 41 |
| Gráfico 24 - Curvas de potencial de circuito aberto para as amostras 1, 2 e 3 de aço carbono 1020 em uma solução de NaCl 0,1M | 42 |
| Gráfico 25 - Diagrama de Nyquist para a amostra 01 de aço carbono 1020 imerso em solução de NaCl 0,1M | 42 |
| Gráfico 26 - Diagrama de Nyquist para a amostra 02 de aço carbono 1020 imerso em solução de NaCl 0,1M | 43 |
| Gráfico 27 - Diagrama de Nyquist para a amostra 03 de aço carbono 1020 imerso em solução de NaCl 0,1M | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Determinação da massa perdida calculada | 26 |
| Tabela 2 - Determinação do fator q , razão entre a massa perdida calculada e a área da região de aplicação da solução | 35 |
| Tabela 3 - Comparação das frequências observadas pelos nove sensores e pelo modelo numérico, antes do início da corrosão | 45 |
| Tabela 4 - Comparação das frequências observadas pelo sensor 1 e pelo modelo numérico, ao longo do processo corrosivo | 46 |
| Tabela 5 - Comparação das frequências observadas pelo sensor 8 e pelo modelo numérico ao longo do processo corrosivo | 47 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----|-------------------------------------|
| FBG | <i>Fibre Bragg Gratings</i> |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| SHM | <i>Structural Health Monitoring</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|---|
| λ_B | Comprimento de onda de Bragg |
| Λ | Período de perturbação do índice de refração |
| n_{eff} | Índice de refração efetivo do núcleo da fibra |
| ξ | Visibilidade das franjas gravadas |
| $\phi(z)$ | Variação do período ao longo da rede |
| Λ_{MF} | Período da mascara de fase |
| fn | Frequência natural |
| n | Número de modos de vibrações |
| E | Módulo de Young |
| m | Massa |
| I | Momento de inércia da área |
| L | Comprimento do vão |
| q | Razão entre a massa perdida calculada e a área submetida à corrosão |
| V | Volume |
| d | Densidade |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | Objetivos | 15 |
| <i>1.1.1</i> | <i>Objetivos gerais</i> | 15 |
| <i>1.1.2</i> | <i>Objetivos específicos</i> | 15 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1 | Gravação de redes de Bragg em fibra ótica | 17 |
| 2.2 | Sensibilidade das redes de Bragg às perturbações | 19 |
| 2.3 | Procedimentos de gravações de redes de Bragg | 19 |
| 3 | METODOLOGIA | 21 |
| 3.1 | Variação da espessura | 21 |
| 3.2 | Sensores óticos | 21 |
| 3.3 | Ensaio eletroquímico | 23 |
| 3.4 | Modelagem numérica | 24 |
| 4 | RESULTADOS | 25 |
| 4.1 | Variação da espessura | 25 |
| 4.2 | Variação da frequência natural em função do tempo | 26 |
| 4.3 | Correlação entre a frequência natural e a massa perdida calculada | 35 |
| 4.4 | Ensaio eletroquímico | 42 |
| 4.5 | Ajuste do modelo numérico da placa | 44 |
| 5 | CONCLUSÃO | 48 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 50 |

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um dos principais danos a atuar sobre estruturas, sendo caracterizada como a deterioração do material causada por uma interação química do material com o ambiente (LEE; YUN; YOON, 2009). O efeito da corrosão pode causar sérios danos em grandes estruturas, resultando em perdas econômicas, ambientais e na pior das hipóteses, a perda de vidas. Dessa forma, existe uma variedade de métodos para o monitoramento e avaliação desse parâmetro em estruturas (LI et al., 2007; POPOV; ZHENG; WHITE, 1994).

O desenvolvimento de novas técnicas não destrutivas tem surgido nos últimos anos, como uma alternativa na caracterização de estruturas e de materiais, causando o menor dano possível a eles. Dessa forma, o desenvolvimento dessas práticas tem ganhado espaço como alternativa para essas avaliações. A implementação de sensores tem se tornado objeto de estudo ao redor do mundo, pelas inúmeras possibilidades de aplicações nos mais diferentes campos da engenharia, em função disso, surgiram os sensores eletrônicos e posteriormente, os sensores óticos.

Os sensores óticos baseados em redes de Bragg possibilitam uma série de melhorias em função dos demais sensores. Essencialmente quanto ao uso dos sensores óticos em função dos sensores eletrônicos, é possível identificar um peso reduzido, imunidade à interferência eletromagnética, baixa perda de transmissão bem como um alto isolamento elétrico. Já relacionado ao uso das redes de Bragg, evidencia-se uma alta relação sinal/ ruído, bem como a possibilidade da multiplexagem de sensores, permitindo a gravação de várias redes de Bragg em uma única fibra ótica (ANTUNES, 2011).

Os sensores óticos têm a capacidade de realizar medições de diferentes parâmetros físico-mecânicos, químicos e ambientais das estruturas em análise, destacando-se quanto às propriedades físico-mecânicas a capacidade de medição da tensão, deformação, aceleração e temperatura. Se tratando das propriedades químicas destacam-se a capacidade de aferição da umidade relativa e do pH. Já para as propriedades ambientais, destacam-se as medições de direção e velocidade do vento, bem como a temperatura do ar e a irradiação.

Em termos da aplicação dos sensores óticos baseados em redes de Bragg na Engenharia Civil, menciona-se na literatura que esta tecnologia já foi empregada no monitoramento de algumas propriedades estruturais, os quais citam-se como exemplos os trabalhos desenvolvidos por (ANTUNES et al., 2012), onde foi proposto um acelerômetro ótico biaxial e um inclinômetro; (REBELO et al., 2010), onde foram aplicados sistemas de monitoramento ótico em cabos tensionados para avaliação da perda de carga. Mais

recentemente, (MESQUITA et al., 2016) desenvolveu um sensor para monitoramento do nível de líquidos e ainda um sensor para monitoramento da aderência aço-concreto em elementos de concreto armado (MESQUITA et al., 2018). O mesmo autor também empregou sensores óticos para monitoramento contínuo e tempo real em estruturas reais de engenharia (MESQUITA, 2017).

Dessa forma, o método proposto neste Trabalho de Conclusão de Curso consiste no desenvolvimento de sensores óticos com base em redes de Bragg para a detecção das variações de frequências naturais de elementos estruturais metálicos, dada a ação da corrosão durante um período pré-determinado, permitindo, dessa forma, um monitoramento contínuo e adequado. Também foram realizados outros procedimentos experimentais, como os ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica e modelagem numérica para a validação dos resultados experimentais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Desenvolver sensores óticos para o monitoramento contínuo da integridade de estruturas metálicas, como tubulações de transporte de inflamáveis, estruturas metálicas componentes de unidades portuárias, elementos estruturais metálicos típicos de construção civil e obras de arte de engenharia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver os sensores óticos baseados em redes de Bragg para monitorar a evolução de corrosão em estruturas metálicas.
- Estudar o efeito da variação da frequência natural de estruturas em função da ação da corrosão.
- Validar os resultados obtidos pelos sensores óticos por meio de outras técnicas de monitoramento de corrosão.
- Ajustar um modelo numérico referente ao procedimento experimental e simular as condições impostas para validar os resultados obtidos pelos sensores.
- Contribuir para o avanço do estudo de sensores óticos no Brasil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os sensores óticos têm ganhado destaque também pela possibilidade de aplicação em diversas áreas. Dentre as áreas de destaque tem-se o Structural Health Monitoring (SHM), consistindo na utilização de uma abordagem técnica visando a caracterização estrutural de construções de engenharia. Essencialmente a abordagem configura-se em quatro etapas básicas, nomeadamente definidas: i) Aquisição operacional, ii) Aquisição, fusão e limpeza de dados, iii) Extração e condensação de informações e iv) Desenvolvimento de um modelo de discriminação de dados (SOHN et al., 2001).

Para a realização dessa abordagem técnica, é comum a utilização de sensores de monitoramento ótico baseados em redes de Bragg, principalmente na caracterização de construções históricas, uma vez que não causam danos às estruturas analisadas. As dimensões desses sensores também torna-se ponto chave para a sua utilização em construções históricas, como em (LIMA et al., 2008), em que as dimensões reduzidas permitiram sua utilização na igreja da Santa Casa da Misericórdia em Aveiro, uma vez que por se tratar de um ponto histórico da cidade, as dimensões reduzidas causaram pouca influência na arquitetura da construção. Dessa forma, os sensores utilizados permitiram obter respostas referentes às deformações nos planos horizontais e verticais, de regiões fissuradas, bem como as variações da temperatura no período de um ano, o que possibilitou a compreensão dos mecanismos de formação dessas fissuras, relacionando-os às movimentações térmicas ou às movimentações físico-mecânicas, comprometendo a estabilidade estrutural da construção.

As diferentes possibilidades de aplicações dos sensores óticos baseados em redes de Bragg é evidenciada também na sua utilização em aeronaves, como em (CUI et al., 2017), em que graças a esses sensores, foi possível determinar um novo método na detecção da deformação das asas de aviões. Inicialmente foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF) na asa para possibilitar a definição dos pontos de maiores tensões, permitindo identificar as posições em que os sensores seriam acoplados, para posteriormente identificar as possíveis deformações originadas.

Os sensores óticos baseados em redes de Bragg podem ainda aliar sua utilização na medição de propriedades de fluídos como a pressão hidrostática, apresentado por (DOMINGUES et al., 2015), permitindo a utilização para o monitoramento de diferentes situações, como a aferição do nível da água em barragens. Também devido a sua possibilidade de utilização em ambientes agressivos, torna-se possível a utilização em perfurações petrolíferas, também torna evidente, como exposto pela patente WO02063248A2, em que foi

implementado um acelerômetro ótico de alta sensibilidade para atender as condições de perfurações em poços petrolíferos, evitando danos aliados ao ambiente hostil (ANTUNES, 2011).

Existem algumas técnicas de monitoramento de corrosão, como a de resistência elétrica, apresentada por (HILBERT, 2006), em que consiste na medição da redução da espessura, apresentando uma adequada taxa de corrosão geral, no entanto limitando-se à dificuldade de medição de corrosão localizada. Outras técnicas para avaliação de corrosão também são objeto de estudo pelo mundo, como a proposta por (CORREIA, 2006), que consiste na utilização de sensores de imagem para monitorar a corrosão de elementos de aço. O uso dessas técnicas, no entanto, limita-se em aplicações também pela utilização de aparelhos eletrônicos, o que pode aumentar riscos em ambientes agressivos.

A partir desse campo de estudo, surge então o desenvolvimento de métodos para o monitoramento de tubulações de transporte de gás natural, como os apresentados por (EDALATI et al., 2006), consistindo na utilização de técnicas de radiografia para detectar corrosão em gasodutos, assim como os propostos por (RAHIM et al., 2015), responsável por propor um método de detecção de corrosão a partir do ensaio ultrassônico. Essas técnicas, no entanto, apresentam limitações, em que a principal delas consiste na realização de medições pontuais, não sendo possível a realização de um monitoramento contínuo.

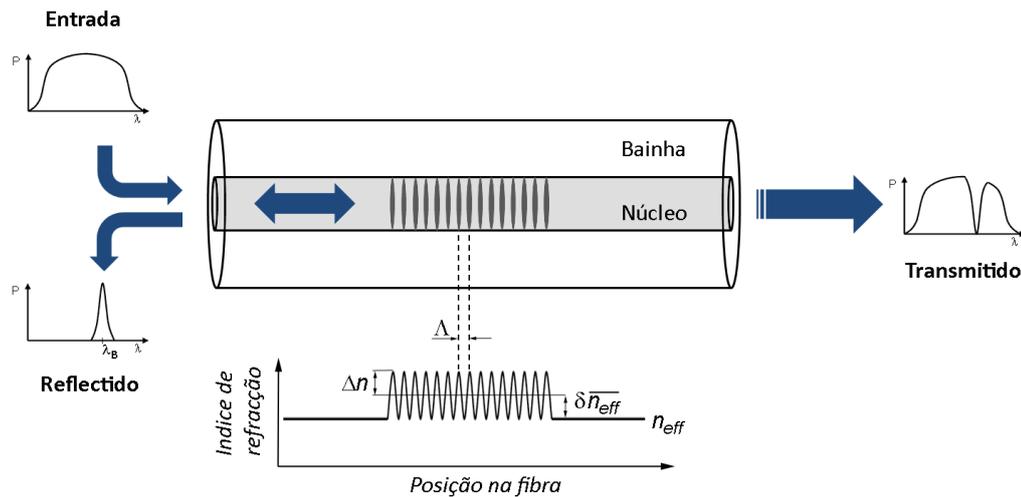
Se tratando do uso de sensores de fibra ótica baseados em redes de Bragg para a detecção de corrosão nesses gasodutos, (REN et al., 2014) propôs uma técnica de monitoramento baseada na tensão circunferencial e sua relação com as variações de pressão e espessura, permitindo, dessa forma obter respostas adequadas, no entanto, apresentando limitações como a dificuldade de aplicação do método em situações onde a tubulação apresenta diâmetros elevados. (LI; CHEN; QIANQIAN, 2015) também propuseram sensores de fibra ótica baseados em tensões circunferências, no entanto, os resultados obtidos não conduziram a uma análise quantitativa da corrosão, não definindo o dano ocorrido ao gasoduto.

2.1 Gravação de redes de Bragg em fibra ótica

As redes de Bragg, também chamadas de FBG (Fibre Bragg Grating), nada mais são do que estruturas criadas no núcleo de uma fibra ótica, através da incidência de um padrão ótico de interferência ultravioleta. Essa incidência cria modulações periódicas do índice de refração no núcleo da fibra, que quando iluminada por um sinal suficientemente largo, irá refletir uma parte do espectro centrada no comprimento de onda de Bragg (que satisfaz a

condição de Bragg de primeira ordem) e transmitirá a outra parte. A variação desse comprimento de onda da parte refletida é que permitirá a aplicação da fibra como um sensor com base em FBG, já que sua variação ocorrerá em função da variação dos parâmetros sensíveis pelo sensor. O princípio de funcionamento pode ser observado na figura 1.

Figura 1 - Princípio de funcionamento de uma FBG



Fonte: Antunes (2011, p.21)

Portanto, a condição de Bragg define que a região do espectro refletido esteja centrada no comprimento de onda de Bragg, λ_B , como apresentado pela equação (1).

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (1)$$

Em que Λ é o período de perturbação do índice de refração e n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra ótica.

O comprimento físico de uma rede de Bragg pode variar de milímetros até muitos centímetros, normalmente, esse aumento de comprimento implica na diminuição da largura espectral e promove um aumento de reflectividade (ANTUNES, 2011).

A perturbação induzida em n_{eff} , ao longo do eixo de propagação z , é dada por (2):

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + \xi(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (2)$$

Em que $\overline{\delta n_{eff}}$ representa a variação do valor médio do índice de refração, ξ representa a visibilidade das franjas gravadas (assumindo valores entre 0 e 1), Λ é o período de

perturbação induzida no índice de refração e $\phi(z)$ representa a variação do período ao longo da rede.

2.2 Sensibilidade das redes às perturbações

Variações no comprimento de onda do espectro refletido pela rede de Bragg, possibilitam, quando sujeitos às perturbações externas, a utilização desses dispositivos como sensores. Como mostrado na equação (1), o comprimento de onda refletido depende primariamente do período de perturbação do índice de refração e do índice de refração efetivo da fibra ótica, desse modo, quando algum parâmetro externo provoca alterações em algum deles, ocorre a alteração do comprimento de onda de Bragg e conseqüentemente, torna-se possível determinar o fator que promoveu essa alteração.

Através disso, é possível observar na equação (3), a variação do comprimento de onda ocasionada por uma alteração de tensão ou de temperatura, que promove diretamente, uma alteração do índice de refração e do seu período de perturbação.

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l \quad (3)$$

O primeiro termo da equação representa a influência da temperatura na variação do comprimento de onda de Bragg e a segunda parte da equação representa os efeitos das deformações no comprimento de onda de Bragg.

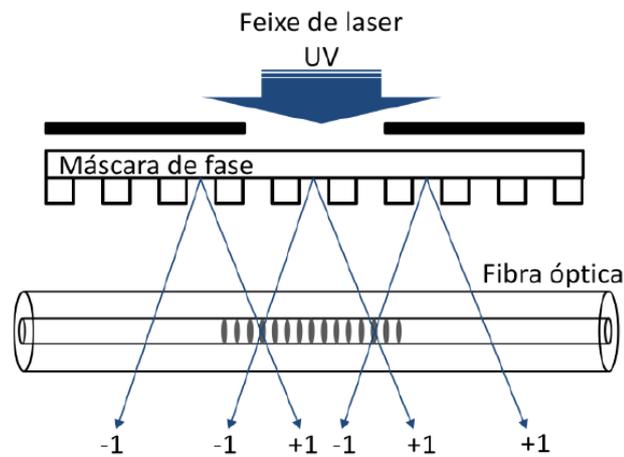
2.3 Procedimentos de gravações de redes de Bragg

Muitos são os processos de gravação de redes de Bragg em fibra ótica, no entanto, no âmbito deste trabalho, será explanada apenas a gravação por meio de máscara de fase, uma vez que foi o método utilizado na gravação das redes de Bragg aqui utilizadas.

A máscara de fase é um elemento ótico com a função de transmissão, apresentando uma seqüência de perturbações na superfície de um substrato de sílica. Essas perturbações podem ser criadas através de processos holográficos ou litográficos, com o varrimento de um feixe de elétrons. A gravação ocorre por meio da sobreposição das duas ordens de difração do sinal produzidas pela máscara de fase no núcleo da fibra, promovendo um padrão de interferência, normalmente maximizando as ordens de difração -1 e +1 e minimizando a ordem

0. A fibra é colocada nas proximidades da máscara de fase, com o objetivo de que a região do núcleo onde ocorrerá a gravação da rede de Bragg esteja sujeita à sobreposição das ordens de difração. A sobreposição desses sinais gera as franjas de interferência na fibra, que irão formar as redes de Bragg, com um período de $\Lambda = \frac{\Lambda_{MF}}{2}$, em que Λ_{MF} é o período da máscara de fase. A representação esquemática dessa técnica de gravação de redes de Bragg pode ser observada na figura 2.

Figura 2 - Gravação de redes de Bragg em fibra óptica por meio de máscara de fase



Fonte: Antunes (2011, p. 24)

3 METODOLOGIA

Para a realização do procedimento experimental do trabalho, foram divididas quatro etapas principais. A primeira etapa consistiu na medição da variação de espessura de uma placa de aço carbono 1020, submetida a uma corrosão controlada, através da aplicação de uma solução de NaCl 1M. Na segunda etapa ocorreu o desenvolvimento dos sensores óticos com base em Redes de Bragg, para monitorar a variação da frequência natural da placa submetida a uma corrosão também controlada por aplicação de uma solução de NaCl 1M. A terceira etapa do programa experimental consistiu na realização de ensaios eletroquímicos para auxiliar na validação dos resultados obtidos pelos sensores. Por fim, a quarta etapa consistiu no ajuste de um modelo numérico para satisfazer as condições a qual a placa de aço carbono 1020 foi submetida, buscando ajustar os resultados obtidos numericamente aos resultados experimentais.

3.1 Variação da espessura

Inicialmente, foram verificadas as alterações de espessura provocadas pela corrosão controlada em uma placa de Aço carbono 1020, com 3 mm de espessura e uma área imersa por uma solução de NaCl 1M de 18,09 cm², para isso foi utilizado um medidor de espessura por ultrassom. A variação de espessura foi verificada antes da aplicação da solução e posteriormente, nos instantes pré-determinados de 1, 3, 6, 24, 168, 336, 504, 744, 840, 1248 e 1344 horas após a aplicação da solução.

3.2 Sensores óticos

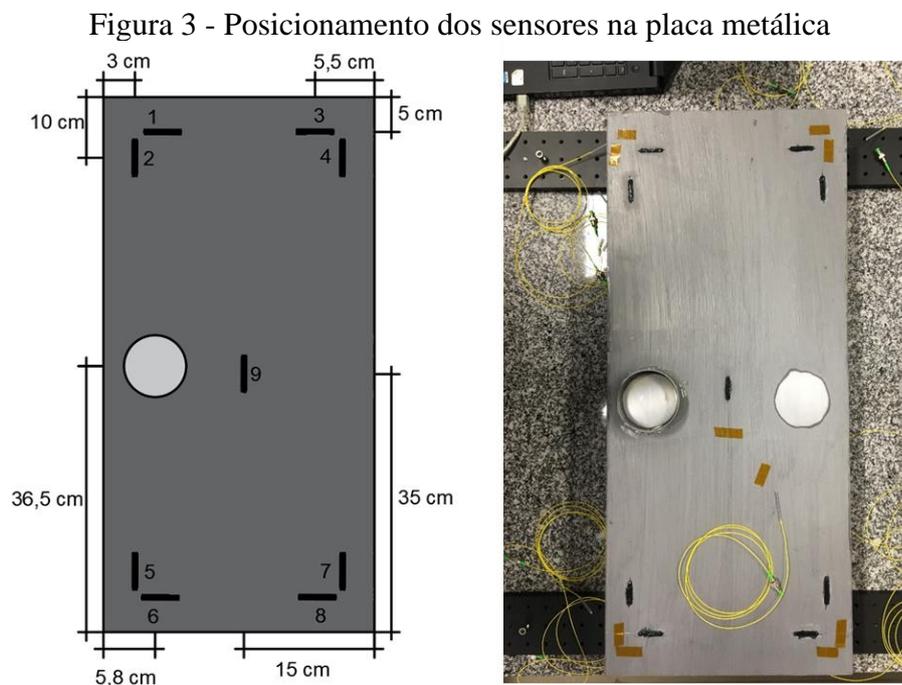
Os sensores implementados para a segunda etapa do programa experimental, aqui definidos com as numerações de 1 a 9, foram produzidos em fibra ótica de sílica. A porção sensível foi aplicada no fim da fibra, na região onde as redes de Bragg são gravadas, com cerca de 1 cm de comprimento. A extremidade oposta da fibra foi conectada ao sistema de aquisição de dados e a gravação das redes de Bragg foi realizada com um laser de excimeros de 248 nm.

O princípio aplicado nesse trabalho experimental se baseia no fato que o avanço da corrosão induz a uma redução da massa do material corroído, e a uma alteração na rigidez, o que provoca uma alteração na frequência natural da estrutura. A equação (4) mostra a relação desses parâmetros (RAZAK; CHOI, 2001).

$$fn = \frac{n^2\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (4)$$

Em que fn é a frequência natural, n é o número de modos, E é o módulo de Young, I é o momento de inércia da área, m é a massa e L é o comprimento do vão.

Foram gravadas FBGs para verificar a alteração da frequência natural de uma placa metálica, mediante ação controlada de corrosão. O material da placa foi o aço carbono 1020, com dimensões de 300 mm x 700 mm, com espessura de 4 mm e a corrosão foi induzida numa região com área de 40,715 cm², através da sua imersão com a solução de NaCl 1M. Os nove sensores foram colados ao longo da placa metálica, como mostra a figura 3.

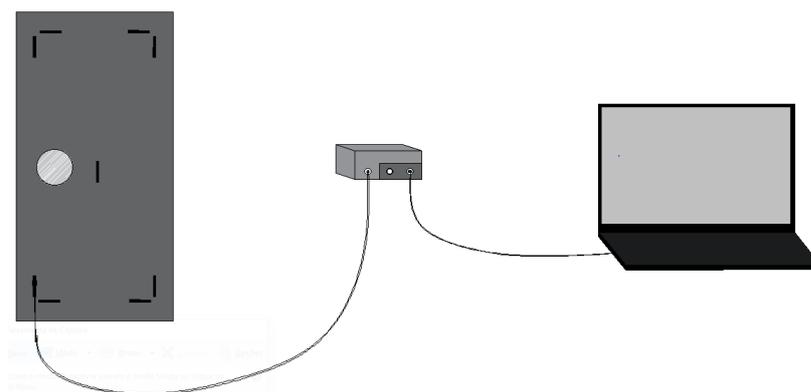


Fonte: Elaborado pelo autor

Foi realizado o lixamento da região onde a solução seria aplicada, para que pudesse entrar em contato direto com o material da placa. Quando finalizada a montagem do sistema, foi iniciada a coleta de dados da frequência natural da placa, inicialmente sem a indução da corrosão controlada. Com a utilização da solução de NaCl 1M, foi necessário colar uma seção de um cano PVC para suporte da aplicação do fluido, sem que ocorresse vazamento ao longo da placa, comprometendo a realização do procedimento experimental. Os dados foram então coletados em períodos específicos do tempo, ao longo de um intervalo de 3744 horas em que a solução atuou sobre o metal.

Para a montagem do sistema de aquisição, foi utilizado um computador e um interrogador Ibsen I-MON USB 512 (3kHz), conectados aos sensores e a placa, como mostra a figura 4. Através desse sistema, foi possível coletar dados relativos à variação do comprimento de onda da placa monitorada e posteriormente os valores de sua frequência natural da placa quando submetida à corrosão.

Figura 4 - Esquema de posicionamento dos sensores baseados em FBG's.



Fonte: Elaborado pelo autor

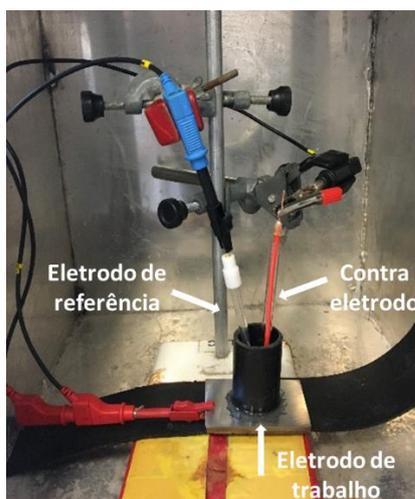
3.3 Ensaios eletroquímicos

A terceira etapa do programa experimental foi dedicada à realização de ensaios eletroquímicos em uma placa de aço carbono 1020, para auxiliar na avaliação do avanço ou retardo da corrosão no material.

Os ensaios foram realizados a partir de 3 amostras de uma chapa de aço carbono 1020 embutidas em um cano de PVC de 2,65 cm de diâmetro, sendo a área da superfície metálica em contato com a solução de NaCl 0,1 M equivalente a 5,51 cm².

Para a realização dos ensaios eletroquímicos, foi utilizada uma célula eletroquímica composta por 3 eletrodos: eletrodo de trabalho (aço carbono 1020), contra eletrodo de platina e eletrodo de referência Ag(s)/AgCl(s)/Cl⁻(aq) (KCl saturado). Foi utilizada uma solução de NaCl de concentração 0,1 M como meio corrosivo. As medidas eletroquímicas foram feitas em um Potenciostato/Galvanostato. A figura 5 apresenta a montagem da célula eletroquímica.

Figura 5 - Montagem experimental da célula eletroquímica



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao potencial de circuito aberto (OCP), a medição consistiu em acompanhar o potencial da amostra em função do tempo de circuito aberto, sem aplicação de potencial ou corrente de fontes exteriores. Para esse procedimento foram utilizados 30 minutos na estabilização do potencial.

Pela espectroscopia de impedância eletroquímica, sabe-se que a impedância é a resistência que o eletrólito (solução) em contato com a superfície metálica impõe à transferência de corrente elétrica.

A espectroscopia de impedância eletroquímica foi então realizada para que se obtivesse uma análise precisa do material. Assim, a chapa de aço carbono 1020 foi imersa em solução de NaCl 0,1 M durante 24h para análise, e medidas de impedância eletroquímica foram feitas após 30 min, 2h, 4h, 6h, 8h e 24h de imersão. Dessa forma, foi utilizada uma faixa de frequência para o ensaio de 40 kHz até 6 mHz, com um sinal de 10 mV de amplitude de perturbação.

3.4 Modelagem numérica

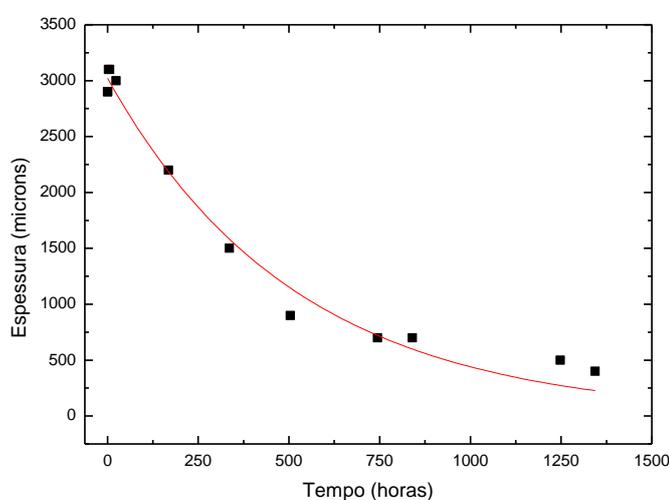
Por fim, através do método dos elementos finitos, foi ajustado o modelo numérico da placa metálica utilizada na segunda etapa do procedimento experimental, consistindo na alteração dos parâmetros afetados ao longo do processo corrosivo, a saber: a redução da espessura e a alteração do módulo de Young. Essa alteração de parâmetros permitiu, de forma simplificada, observar o comportamento da variação da frequência natural da placa.

4 RESULTADOS

4.1 Variação da espessura

A determinação da redução de espessura, devido a corrosão, foi realizada com um ultrassom, e a variação desse parâmetro em função do tempo em que a corrosão esteve atuando na placa metálica, pode ser observado no gráfico 1.

Gráfico 1 - Variação da espessura em função do tempo de ação da corrosão



Fonte: Elaborado pelo autor

Através dos resultados coletados, foi determinada a curva relativa à variação da espessura em função do tempo, com um coeficiente de ajuste não linear equivalente a 98,3%.

Para a placa utilizada nesse procedimento experimental, foram determinadas as massas perdidas calculadas. Para isso, foi utilizada a expressão (5):

$$d = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Em que d é a densidade estimada em 7870 kg/m^3 , m é a massa da região onde a solução de NaCl 1M foi aplicada e V é o volume dessa região. O volume foi estimado em função da espessura e da área da seção, equivalente a $18,09 \text{ cm}^2$. A massa perdida calculada foi então determinada pela subtração da massa da região antes da corrosão com a massa da região já reduzida em função do processo corrosivo.

A tabela 1 apresenta os resultados encontrados para a massa perdida calculada.

Tabela 1 - Determinação da massa perdida calculada

| Tempo (h) | Espessura (μm) | Massa (g) | Massa perdida calculada (g) |
|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|
| 0 | 2900 | 41,286 | 0 |
| 1 | 2900 | 41,286 | 0 |
| 3 | 3100 | 44,134 | -2,847 |
| 6 | 3100 | 44,134 | -2,847 |
| 24 | 3000 | 42,710 | -1,423 |
| 168 | 2200 | 31,321 | 9,965 |
| 336 | 1500 | 21,355 | 19,931 |
| 504 | 900 | 12,813 | 28,473 |
| 744 | 700 | 9,965 | 31,321 |
| 840 | 700 | 9,965 | 31,321 |
| 1248 | 500 | 7,118 | 34,168 |
| 1344 | 400 | 5,694 | 35,592 |

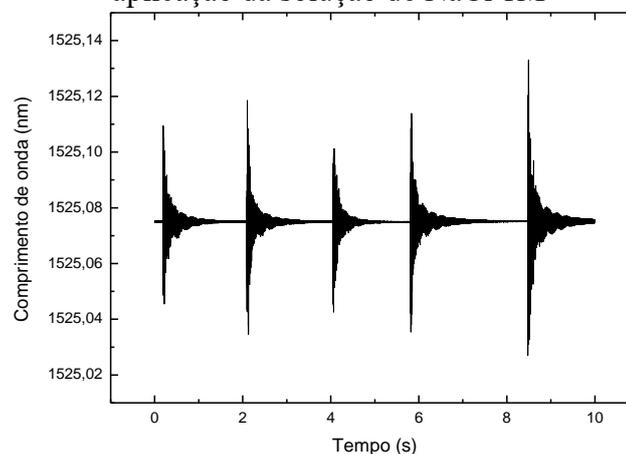
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Variação da frequência natural em função do tempo

A segunda parte do programa experimental foi dedicada a estimar a variação da frequência natural em função do tempo, de uma placa de aço carbono 1020 mediante a ação de uma solução de NaCl 1M. Para a realização dessa etapa, foram utilizados nove sensores óticos com base em redes de Bragg, distribuídos ao longo da placa metálica.

Aplicando uma carga vertical sobre a placa metálica e removendo-a subitamente, a placa oscila com a sua frequência natural. No gráfico 2 é possível observar a resposta do sensor 1 após a aplicação e remoção súbita de uma carga vertical, cinco vezes, durante 10 segundos, 48 horas após a aplicação da solução de NaCl 1M.

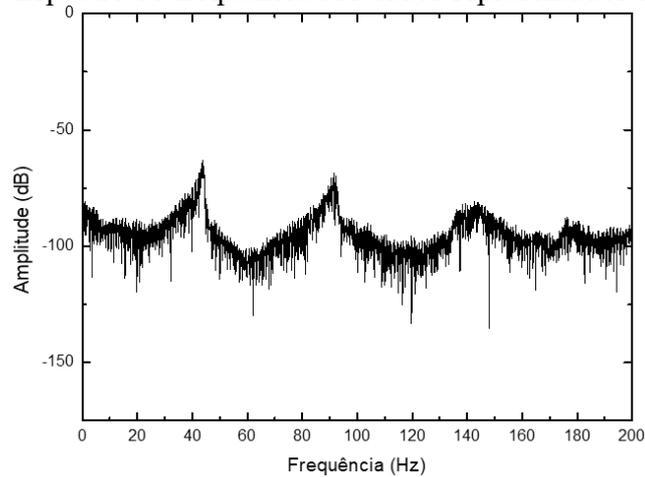
Gráfico 2 - Resposta do sensor 1 à aplicação e remoção súbita de uma carga, 48 horas após a aplicação da solução de NaCl 1M



Fonte: Elaborado pelo autor

Esse processo foi repetido em cada um dos instantes em que foram coletadas respostas dos nove sensores na placa submetida à corrosão. Através da transformada de Fourier, foi possível determinar a frequência natural em cada um dos instantes em que a resposta foi coletada, como exemplificado no gráfico 3.

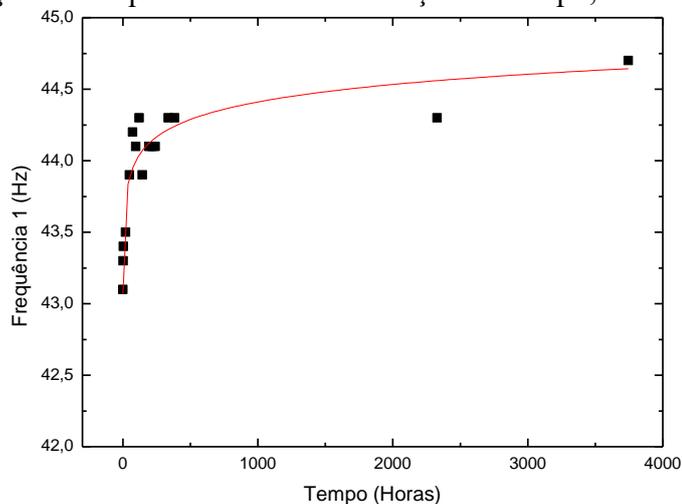
Gráfico 3 - Espectro de frequência dos dados representados no gráfico 2



Fonte: Elaborada pelo autor

Portanto, como resposta dos nove sensores, foram obtidas as frequências naturais da placa, em diferentes instantes de ação da corrosão. Os resultados experimentais da variação da frequência em função do tempo de ação da corrosão para os nove sensores podem ser observados nos gráficos 4 a 12, em que a linha de tendência que determina o comportamento da curva é definida por uma função logarítmica.

Gráfico 4 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 1

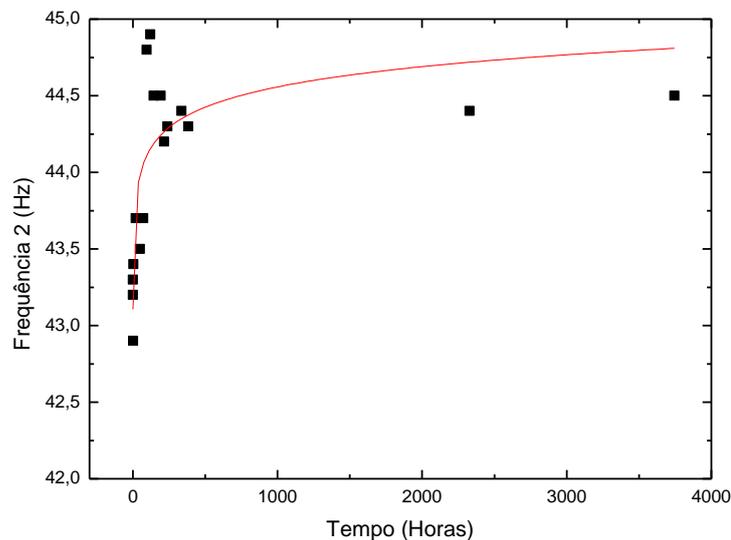


Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, foi possível constatar no gráfico uma evolução nas primeiras horas dos valores de frequência natural. No intervalo de 20 horas a 48 horas de atuação da solução, foi possível observar um aumento de 0,4 Hz na frequência natural da placa, essa alteração na frequência natural também foi observada no intervalo de 120 horas a 144 horas e no intervalo de 2328 horas até 3744 horas. A curva de ajuste não linear apresenta coeficiente de correlação equivalente à 91,1%, permitindo definir o ajuste não linear utilizado como adequado para a situação.

Com respeito ao sensor 2, para a placa sem a solução, foi observada uma frequência natural de 43,8 Hz, com decréscimo para 43,4 Hz após a aplicação da solução. A variação da frequência em função do tempo pode ser observada no gráfico 5.

Gráfico 5 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

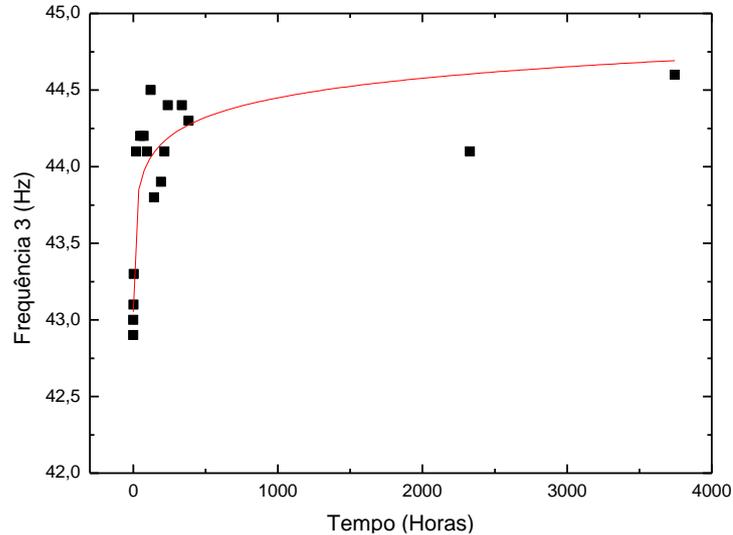
A maior variação observada correspondeu ao intervalo de medição realizada entre 72 horas e 96 horas, correspondendo a uma variação de 1,1 Hz da frequência natural da placa medida. Para o sensor 2, a curva de ajuste não linear foi equivalente a 65,19%.

Com respeito ao sensor 3, foi possível observar maiores variações dos valores de frequência natural da placa, para o intervalo de 3 horas a 20 horas de medição, correspondendo a 0,8 Hz. O comportamento do gráfico relacionando as variações de frequência e tempo pode ser observada na figura 12.

Através do gráfico é possível observar que a curva de ajuste não linear apresenta um coeficiente de determinação equivalente a 76,28%, indicando uma boa correlação dos parâmetros apresentados, justificando o comportamento do gráfico definido por uma função

logarítmica.

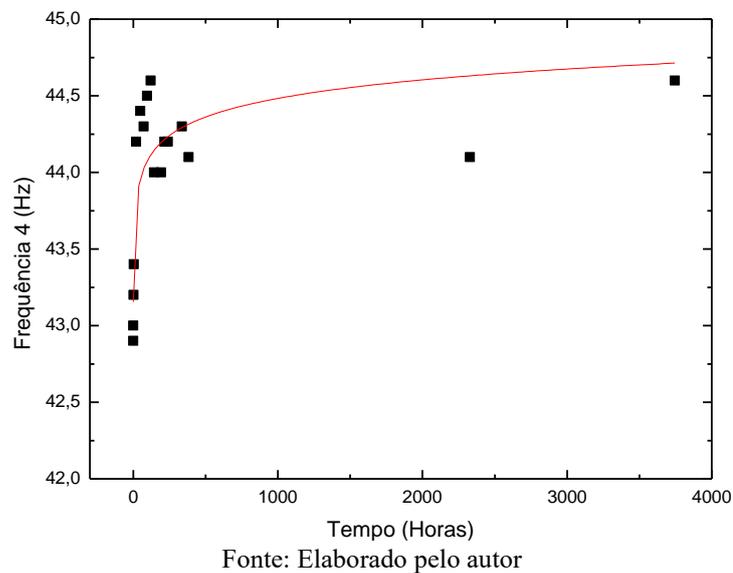
Gráfico 6 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 3



Se tratando do sensor 4, a evolução gradual dos valores de frequência natural é observada principalmente nas primeiras horas após o uso da solução, nomeadamente as três primeiras horas.

Dessa forma, foi possível observar as maiores variações de frequência natural no intervalo de 3 horas a 20 horas após a aplicação da solução, com uma alteração de 0,8 Hz. O gráfico 7 ilustra a curva de ajuste não linear obtida a partir dos dados.

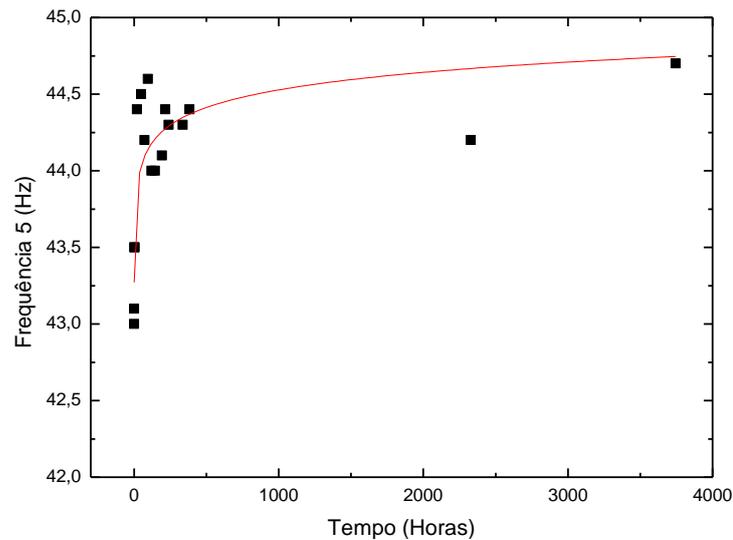
Gráfico 7 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 4



O comportamento do gráfico, relativizado à curva de ajuste não linear, também apresenta um bom coeficiente de determinação, equivalente a 68,52%.

Para o sensor 5, foi obtido uma curva de ajuste não linear equivalente à 70,19%, indicando também uma boa correlação entre os parâmetros, como pode ser observado no gráfico 8.

Gráfico 8 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 5

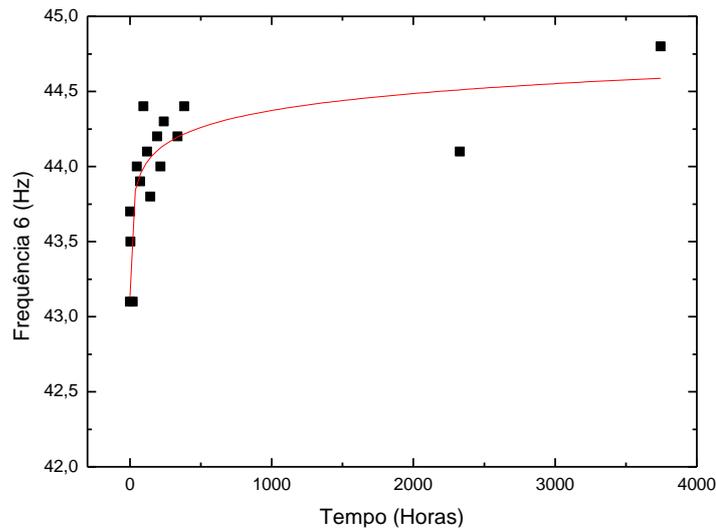


Fonte: Elaborado pelo autor

A maior variação da frequência natural ocorreu no intervalo de 3 horas a 20 horas, com uma variação de 0,9 Hz, como pode ser observado no gráfico 8.

O sensor 6, por sua vez, apresentou uma maior variação no último intervalo de tempo definido para as realizações das medições, entre 2328 horas e 3744 horas após a aplicação da solução, com uma variação de 0,7 Hz, demonstrando o comportamento do gráfico que pode ser observado no gráfico 9.

Gráfico 9 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 6

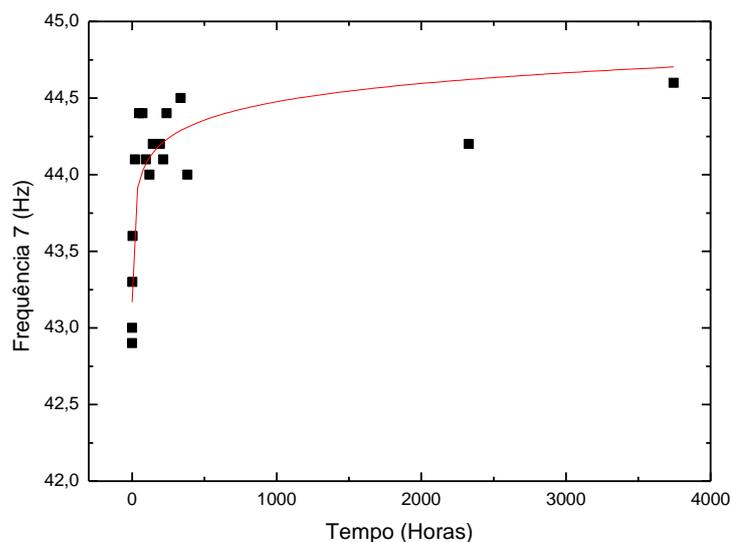


Fonte: Elaborado pelo autor

Para os valores encontrados pelo sensor 6, a curva de ajuste não linear também apresentou um valor adequado equivalente a 71,58%, indicando a boa correlação entre os parâmetros obtidos pelo sensor 6.

Para o sensor 7, também é possível observar um crescimento gradual nas primeiras horas, já a maior variação encontrada, correspondeu também ao período de 3 horas a 20 horas e ao período de 336 horas a 384 horas após a utilização da solução, com variação equivalente à 0,5 Hz, como pode ser observado no gráfico 10.

Gráfico 10 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 7



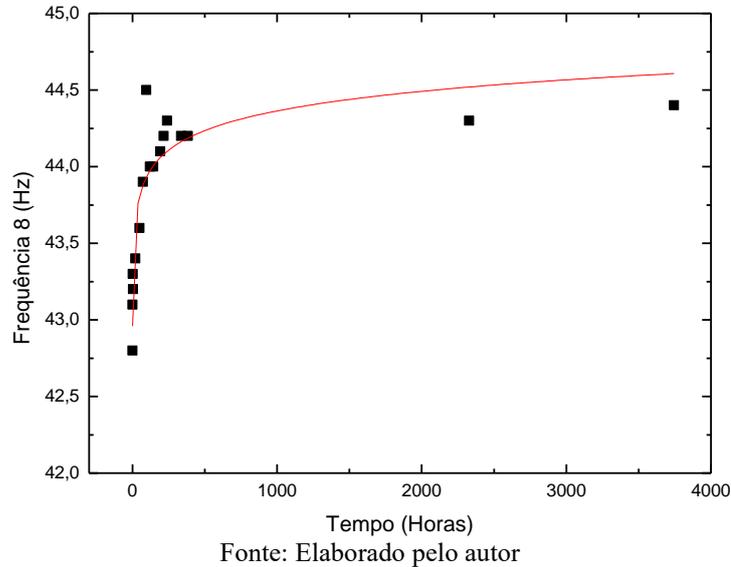
Fonte: Elaborado pelo autor

A curva de ajuste não linear encontrada para o sensor 7 foi equivalente à 75,65%,

indicando a adequada correlação entre os parâmetros analisados, através do ajuste não linear.

O sensor 8 apresentou uma maior variação de frequência no período entre 72 horas e 96 horas, com variação equivalente a 0,6 Hz, como pode ser observado no gráfico 11.

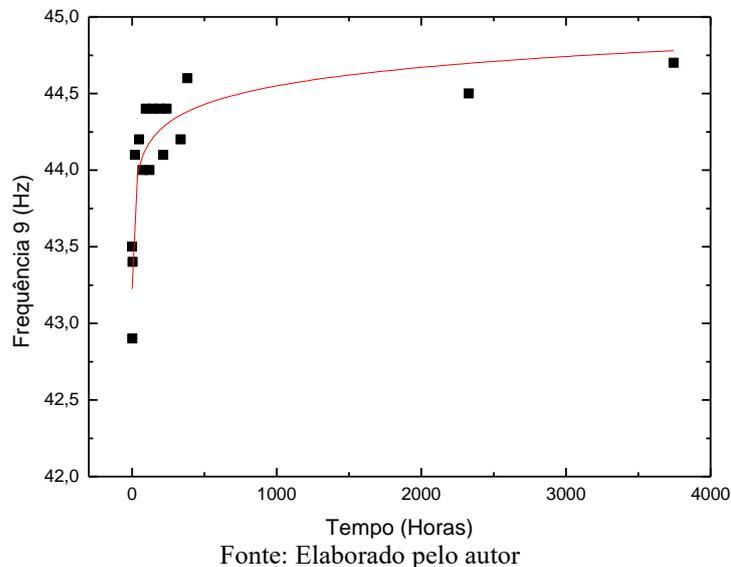
Gráfico 11 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 8



A curva de ajuste não linear obtido através dos dados do sensor 8 foi equivalente a 83,78%, indicando a adequada correlação também entre os parâmetros obtidos por esse sensor.

O sensor 9, por sua vez, apresentou adequada correlação entre os parâmetros, com uma curva de ajuste não linear igual a 76,15%, como pode ser observado no gráfico 12.

Gráfico 12 - Variação da frequência natural em função do tempo, observada pelo sensor 9



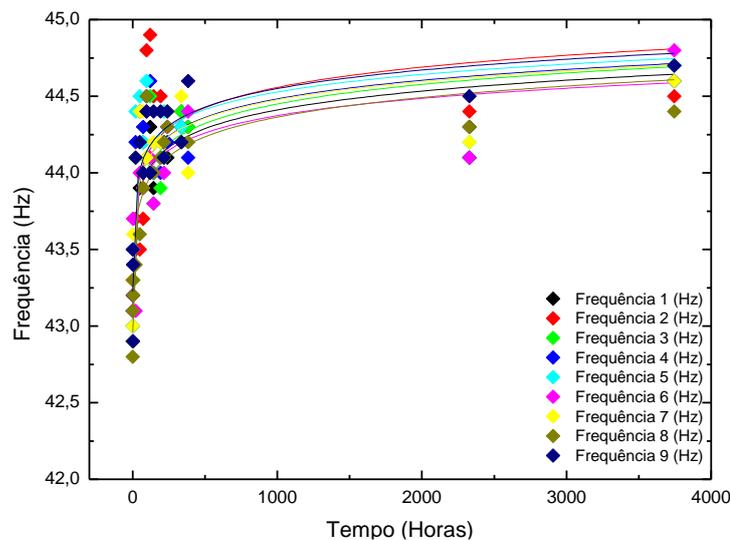
Por falha técnica, não foi possível realizar a medição em 1 hora após a solução, dessa forma, a maior variação de frequência observada ocorreu no período entre 3 horas e 20 horas após a aplicação da solução de NaCl 1M, com uma variação equivalente a 0,7 Hz.

Com exceção dos sensores 7 e 9, os maiores valores de frequência natural da placa foram determinados no período de 96 horas e 120 horas após a aplicação da solução.

O gráfico 13 mostra a superposição dos gráficos das variações de frequência em função do tempo dos nove sensores, a partir dela é possível identificar um comportamento semelhante na evolução das frequências de todos os sensores. Inicialmente, percebe-se uma pequena variação nas primeiras horas em que a solução de NaCl 1M encontra-se agindo.

Mediante o exposto nos gráficos anteriores, percebem-se maiores variações no intervalo de 96h a 120h, estando possível identificar também que os maiores valores de frequência se encontram nesse intervalo.

Gráfico 13 - Superposição dos dados encontrados pelos nove sensores



Fonte: Elaborado pelo autor

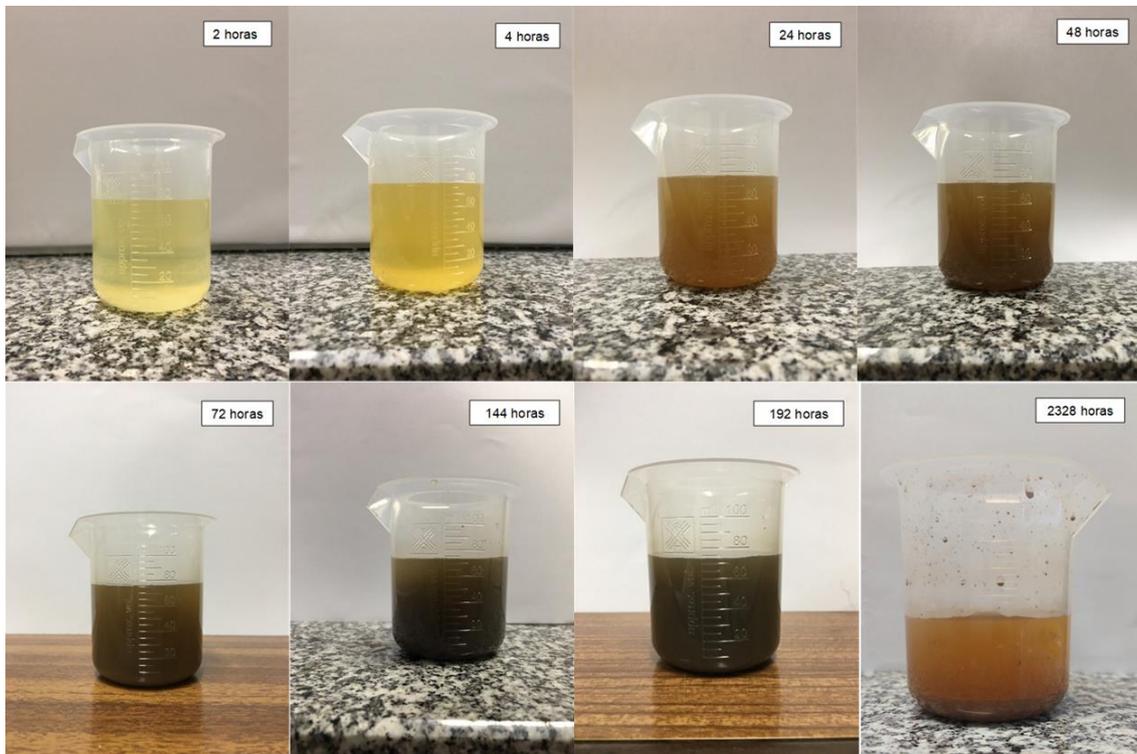
Como esperado, foi possível observar que o efeito da corrosão, provocada pela aplicação controlada da solução de NaCl 1M, gerou na sua região de aplicação, uma redução na espessura da placa metálica. Isso, por sua vez, causou alterações na rigidez do material, e por consequência, um aumento da frequência natural ao longo do tempo. Esse efeito pode ser observado principalmente nos intervalos nos primeiros instantes após aplicação da solução de NaCl 1M. Através dos resultados obtidos pelos sensores, é observada também uma tendência à atenuação do crescimento da frequência natural em função do tempo no intervalo entre 144 e 384 horas após a aplicação da solução. Esse efeito ocorre devido a redução da velocidade de

corrosão e devido ao aumento da quantidade de produtos da própria corrosão, como os óxidos de Ferro, nas 144 horas iniciais.

Entre 2328 e 3744 horas após a aplicação da solução, observasse uma tendência a um crescimento lento da frequência natural da placa metálica, resultado da maior quantidade de produtos gerados na região onde a corrosão foi induzida.

Através da figura 6 é possível observar a tendência ao aumento da concentração dos produtos de corrosão nos instantes iniciais à aplicação da solução de NaCl 1M. Esse escurecimento da solução é um fator típico da presença de óxido de Ferro, produto da corrosão, nas amostras coletadas.

Figura 6 - Solução de NaCl 1M e produtos de corrosão da placa em diferentes períodos



Fonte: Elaborada pelo autor

Foi observado também que 2328 horas após a aplicação da solução, o líquido corrosivo apresentou uma alteração na coloração, fato justificado pela deposição das partículas oriundas do processo de corrosão no fundo do recipiente. Nos demais instantes essas partículas estavam dispersas, tornando a solução homogênea. Foi observada também uma maior precipitação da solução em decorrência da sua evaporação que se deu ao longo do processo corrosivo.

4.3 Correlação entre a frequência natural e a massa perdida calculada

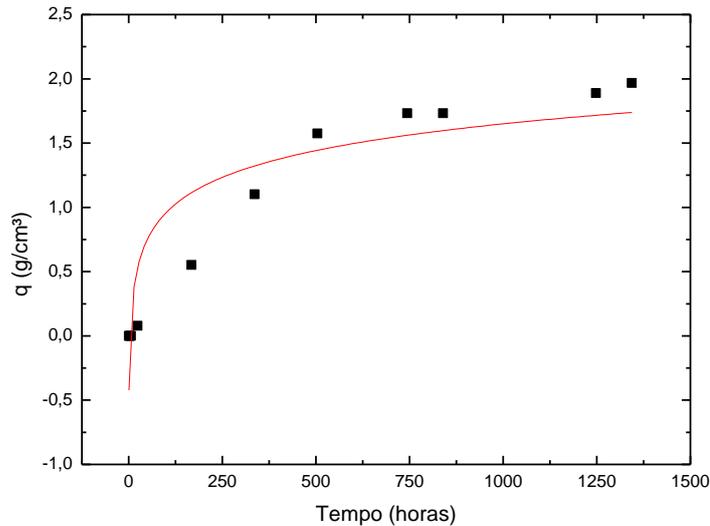
A partir da combinação de resultados, foi possível relacionar a perda de espessura da placa com a variação da frequência natural, para isso foi estimado um fator q , equivalente a razão entre a massa perdida calculada e a área da região sujeita a corrosão pela solução de NaCl 1M, equivalente a 18,09 cm², para cada um dos tempos determinados. Esses valores podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2 - Determinação do fator q , razão entre a massa perdida calculada e a área da região de aplicação da solução

| Tempo (h) | Espessura (μm) | Massa (g) | Massa perdida calculada (g) | q (g/cm ²) |
|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|--------------------------|
| 0 | 2900 | 41,286 | 0 | 0 |
| 1 | 2900 | 41,286 | 0 | 0 |
| 3 | 3100 | 44,134 | -2,847 | -0,1574 |
| 6 | 3100 | 44,134 | -2,847 | -0,1574 |
| 24 | 3000 | 42,710 | -1,423 | -0,0787 |
| 168 | 2200 | 31,321 | 9,965 | 0,5509 |
| 336 | 1500 | 21,355 | 19,931 | 1,1018 |
| 504 | 900 | 12,813 | 28,473 | 1,574 |
| 744 | 700 | 9,965 | 31,321 | 1,7314 |
| 840 | 700 | 9,965 | 31,321 | 1,7314 |
| 1248 | 500 | 7,118 | 34,168 | 1,8888 |
| 1344 | 400 | 5,694 | 35,592 | 1,9675 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Com objetivo de adequar os resultados experimentais à prática, os valores de q referentes aos tempos de 3 horas e 6 horas após a aplicação da solução, por serem suficientemente pequenos, foram adotados como nulos, já o valor relativo a período de 24 horas após a aplicação da corrosão, foi adotado em módulo. A relação entre a razão q e o tempo, pode ser observada no gráfico 14.

Gráfico 14 - Curva definida em função da razão q e do tempo de ação da corrosão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a curva definida no gráfico 14, o coeficiente de ajuste não linear encontrado foi equivalente a 85,8%. A partir da equação definida pela curva, foi também possível determinar a razão q equivalente para os períodos em que a solução esteve monitorada pelos sensores óticos com base em Redes de Bragg. A equação que define a relação é (6):

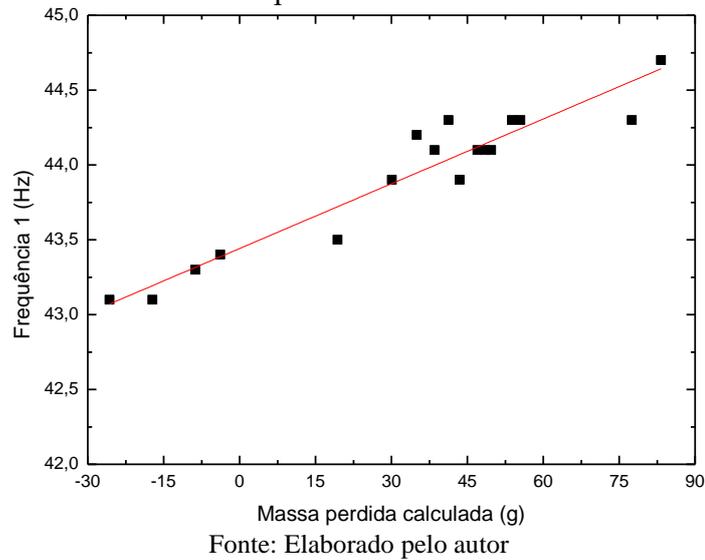
$$q = 0,30006 \ln t - 0,42288 \quad (6)$$

Em que q é o fator correspondente à razão entre a massa perdida calculada e a área onde a solução foi aplicada na placa, e t é o tempo em que a corrosão atuou na placa.

Determinado o valor q para cada um dos períodos em que os dados da frequência natural foram coletados, ocorreu a multiplicação de cada um dos fatores encontrados pela área da região submetida a corrosão na placa utilizada na segunda fase do procedimento experimental, equivalente a 40,715 cm².

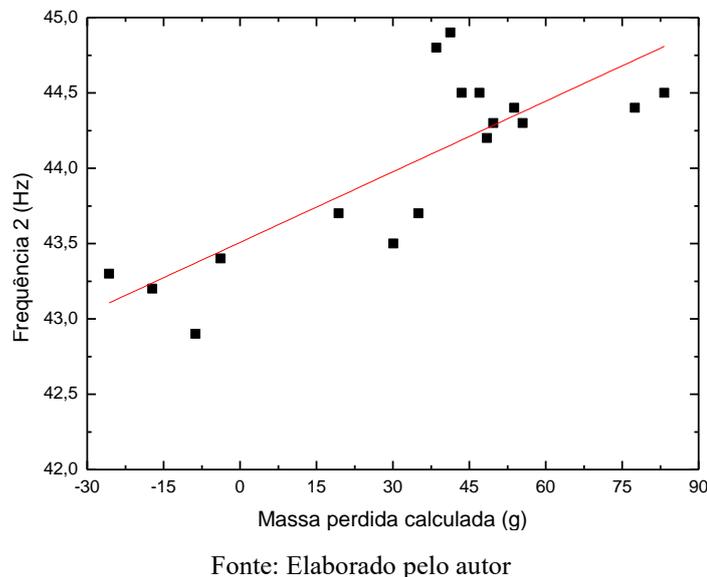
Segundo os gráficos 15 a 23, é possível observar o comportamento da variação da frequência em função da perda de massa, provocada pela corrosão. Através deles é possível identificar a maior variação da massa perdida calculada nos intervalos de 3 a 20 horas após a aplicação da solução. Os fatores de ajuste linear, para os nove sensores são equivalentes aos encontrados na relação entre frequência e tempo.

Gráfico 15 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 1



Para o sensor 1, foi observado uma maior massa perdida calculada para as frequências encontradas no intervalo 44,3 Hz a 44,7 Hz. Para o sensor 1, a maior frequência natural observada correspondeu à maior massa perdida calculada, nomeadamente com 44,7 Hz.

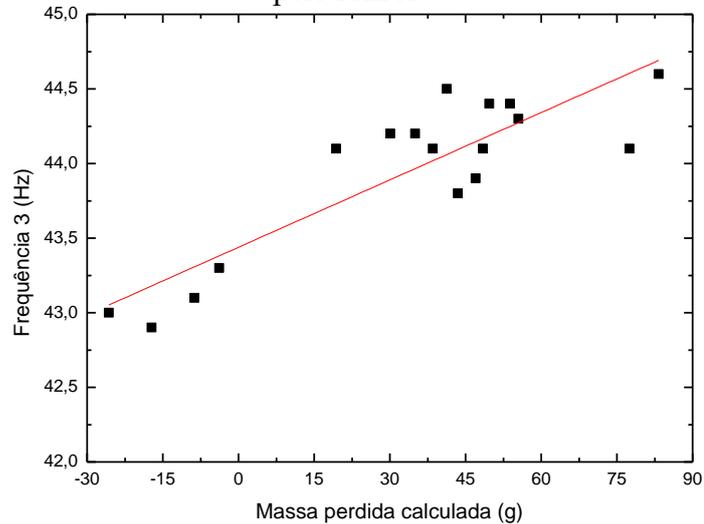
Gráfico 16 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 2



O sensor 2 obteve como respostas uma maior massa perdida calculada especialmente para o intervalo de 44,4 Hz a 44,5 Hz. Nesse sensor, também foi possível observar que os maiores valores de frequência natural da placa encontrados não corresponderam às maiores massas perdidas calculadas, nomeadamente, as frequências de 44,9 Hz e 44,8 Hz,

ao passo que as maiores massas perdidas calculadas foram encontradas para o as frequências de 44,4 Hz e 44,5 Hz, no intervalo de 2328 horas à 3744 horas.

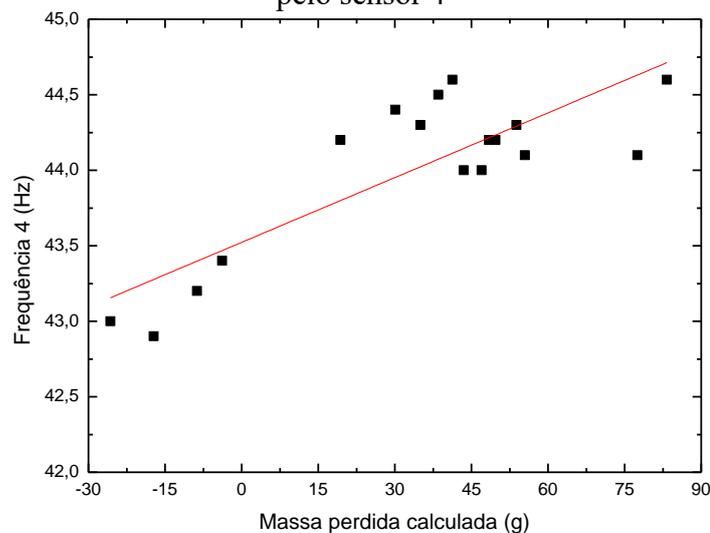
Gráfico 17 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 3



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o sensor 3, foi possível observar uma maior massa perdida calculada no intervalo de 44,1 Hz a 44,6 Hz. Também foi observado nesse sensor que o maior valor da frequência natural correspondeu ao maior valor de massa perdida calculada, com 44,6 Hz.

Gráfico 18 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 4

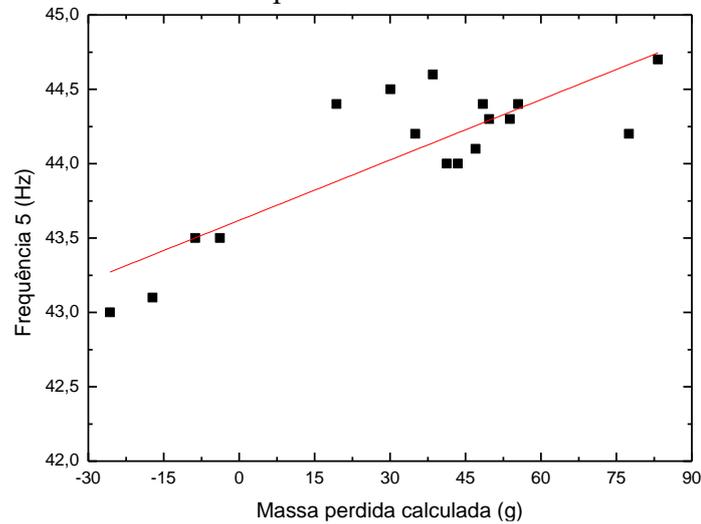


Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto ao sensor 4, foi observada uma maior massa perdida calculada também para

o intervalo de 44,1 Hz a 44,6 Hz. Nesse sensor o maior valor de frequência natural correspondeu a 44,6 Hz, indicando também o maior valor de massa perdida calculada.

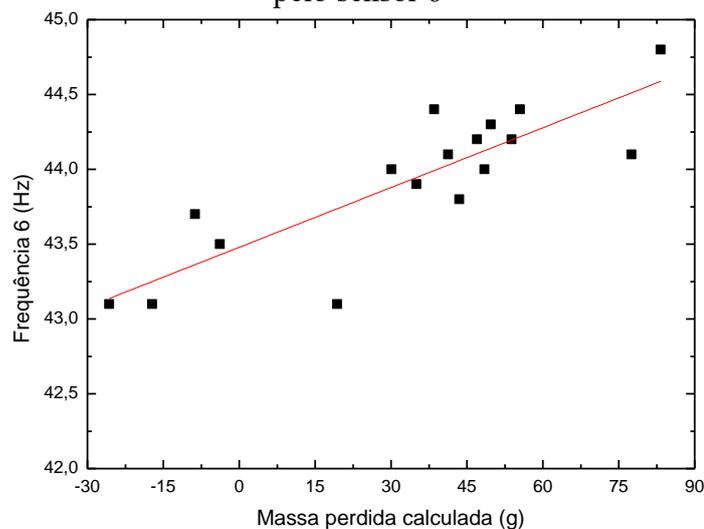
Gráfico 19 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 5



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o sensor 5, a maior massa perdida calculada foi observada para o intervalo de 44,2 Hz a 44,7 Hz. Foi observado também que o maior valor de massa perdida calculada correspondeu ao maior valor de frequência natural, com 44,7 Hz.

Gráfico 20 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 6

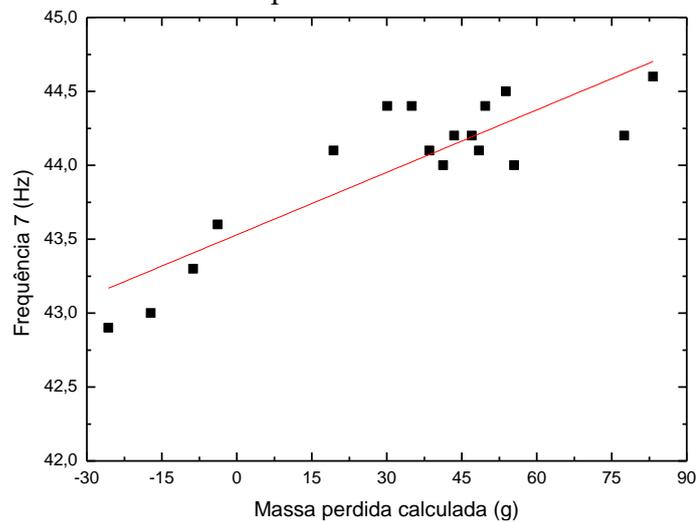


Fonte: Elaborado pelo autor

Como resposta, o sensor 6 apresentou a maior massa perdida calculada para o

intervalo entre 44,1 Hz a 44,8 Hz. Também foi possível identificar que o maior valor de frequência natural correspondeu à maior massa perdida calculada, com 44,8 Hz, 3744 horas após a aplicação da solução de NaCl 1M.

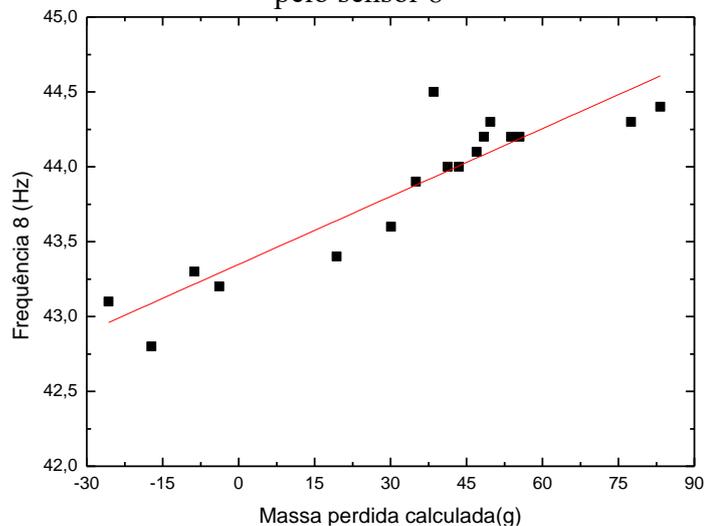
Gráfico 21 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 7



Fonte: Elaborado pelo autor

O sensor 7 também apresentou o maior valor de frequência natural correspondente ao maior valor de massa perdida calculada. Como resposta, foi possível identificar também que esse sensor apresentou a maior massa perdida calculada no intervalo entre 44,2 Hz a 44,6 Hz.

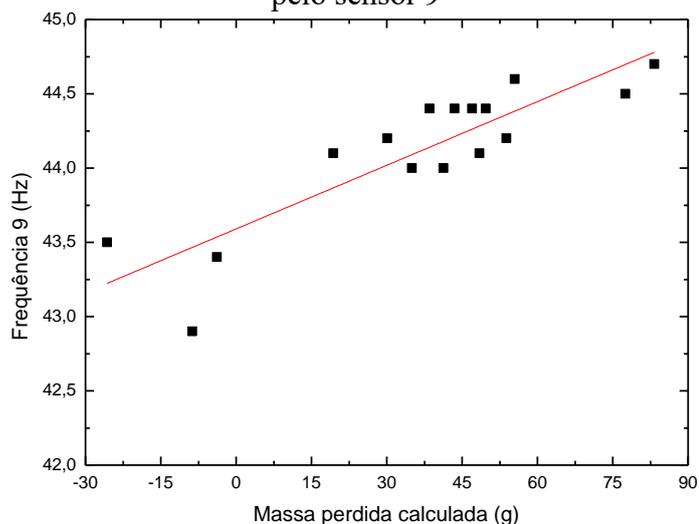
Gráfico 22 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 8



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o sensor 8, o maior valor de massa perdida calculada foi identificado para o intervalo de 44,3 Hz a 44,4 Hz. Nesse sensor, foi possível também identificar que o maior valor de perda de massa calculada não correspondeu ao maior valor de frequência natural, equivalente à 44,5 Hz, 96 horas após a aplicação da solução de NaCl 1M.

Gráfico 23 - Relação entre massa perdida calculada e frequência natural da placa observadas pelo sensor 9



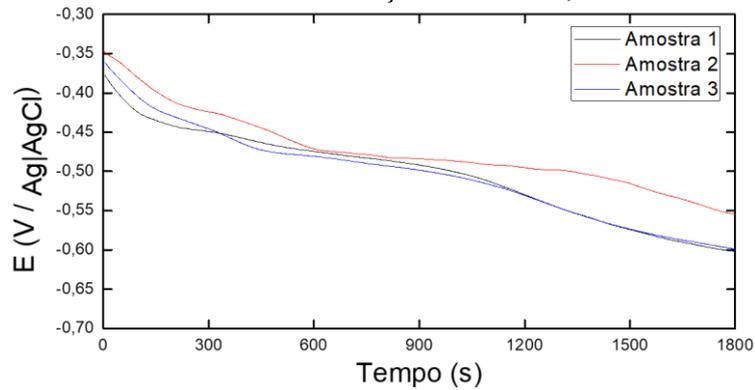
Fonte: Elaborado pelo autor

O sensor 9, no entanto, apresentou o maior valor de frequência natural correspondente à maior massa perdida calculada. Foi observada a maior perda de massa calculada correspondente ao intervalo de 44,5 Hz a 44,7 Hz.

4.4 Ensaios eletroquímicos

Para a terceira etapa do procedimento experimental, as medidas encontradas com o Potencial de Circuito Aberto, para as três amostras, podem ser observadas no gráfico 24.

Gráfico 24 - Curvas de potencial de circuito aberto para as amostras 1, 2 e 3 de aço carbono 1020 em uma solução de NaCl 0,1M

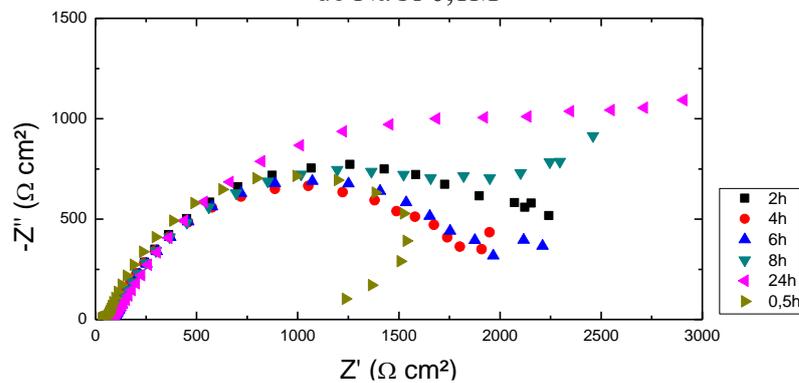


Fonte: Elaborado pelo autor

Através do gráfico 24, pode-se observar que a redução do potencial em função do tempo ocorre com as três amostras, indicando assim, a presença de um processo corrosivo.

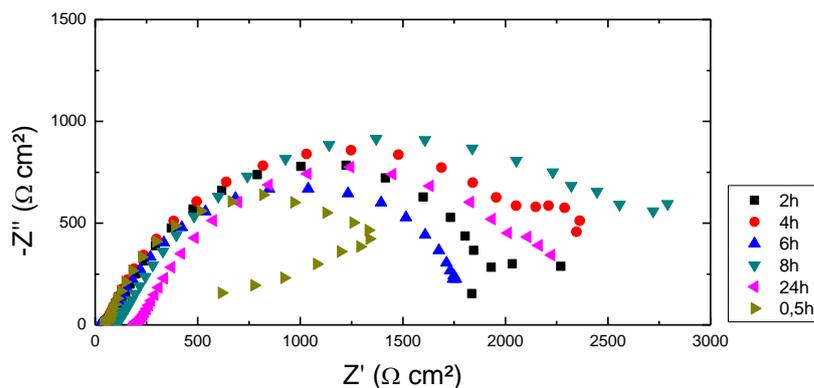
O procedimento experimental foi sucedido então com a realização da espectroscopia de impedância eletroquímica, buscando uma análise precisa do material. Os gráficos 25, 26 e 27 mostram os diagramas de Nysquist, usados para representar os resultados da impedância eletroquímica para as três amostras.

Gráfico 25 - Diagrama de Nyquist para a amostra 1 de aço carbono 1020 imerso em solução de NaCl 0,1M



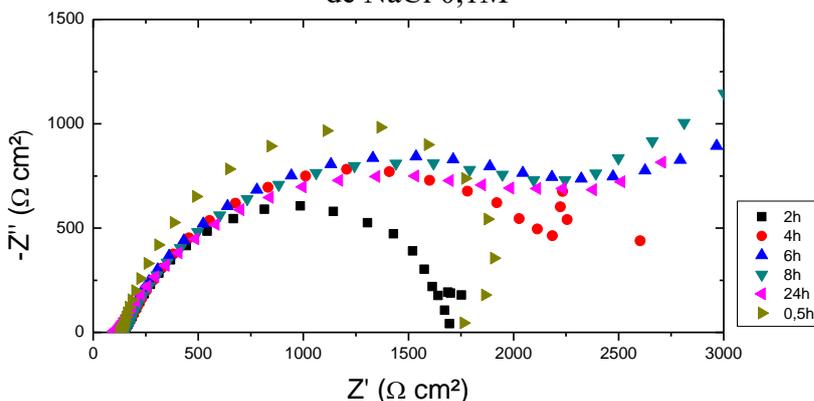
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 26 - Diagrama de Nyquist para a amostra 2 de aço carbono 1020 imerso em solução de NaCl 0,1M



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 27 - Diagrama de Nyquist para a amostra 3 de aço carbono 1020 imerso em solução de NaCl 0,1M



Fonte: Elaborado pelo autor

A reação eletroquímica da impedância pode ser adequada a um circuito elétrico equivalente. Sabendo que o eixo horizontal do diagrama de Nyquist representa a impedância real do circuito equivalente e o eixo vertical do diagrama representa a impedância imaginária (complexa), pode-se, pelo comportamento do semicírculo, inferir se o material está mais ou menos resistente à corrosão, analisando-se principalmente o eixo horizontal.

Assim, para a amostra 1 houve maior resistência com 24h de imersão, seguida por 8h, 2h, 6h, 4h, e 30 min. Em relação à amostra 2, a maior resistência foi obtida com 8h, seguida por 4h, 24h, 2h, 6h e 30 min. Para a amostra 3, o maior valor encontrado foi em 8h, seguida por 6h, 24h, 4h, 30 min e 2h.

Apesar de ser esperado que o material apresente menor resistência à corrosão ao longo do tempo, isso pode não necessariamente ocorrer, pois, durante as reações químicas do processo corrosivo, forma-se uma camada de óxido (neste caso, óxido de ferro) que pode

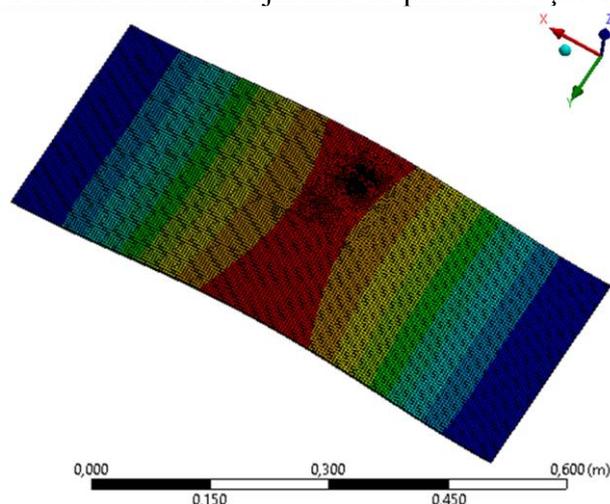
funcionar como uma barreira ao avanço do processo corrosivo; dessa forma, há um aumento da resistência naquele instante. Isso explica as diferenças nos valores de resistência obtidos a partir dos diagramas de Nyquist apresentados nos gráficos 25, 26 e 27.

4.5 Ajuste do modelo numérico da placa

Por fim, foi criado um modelo numérico para simular as condições da placa que foram observadas com o processo corrosivo, para isso, foi ajustado um modelo numérico da placa, com as mesmas dimensões da placa utilizada na segunda etapa do procedimento experimental.

O módulo de Young adotado para o aço carbono 1020, foi equivalente à 205 GPa, no entanto, para a região onde a corrosão foi induzida, os valores da espessura e do módulo de Young foram variados, de modo a melhor ajustar o modelo numérico e consequentemente, simular o comportamento real da placa sob ação de corrosão. A densidade utilizada foi equivalente a 7870 kg/m^3 . A figura 7 mostra o primeiro modo de vibração da placa sob ação de corrosão.

Figura 7 - Modelo numérico ajustado da placa sob ação de corrosão



Fonte: ANSYS, versão 17.1

Inicialmente, esse procedimento foi realizado para a placa antes do início do processo de corrosão, com o objetivo de identificar os valores obtidos inicialmente pelos nove sensores em comparação com os resultados obtidos numericamente.

O erro relativo em relação a esses dois valores pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3 - Comparação das frequências observadas pelos nove sensores e pelo modelo numérico, antes do início da corrosão

| | Sensor 1 | Sensor 2 | Sensor 3 | Sensor 4 | Sensor 5 | Sensor 6 | Sensor 7 | Sensor 8 | Sensor 9 |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Frequência experimental (Hz) | 44,1 | 43,8 | 43,8 | 43,8 | 44,3 | 44,2 | 44,3 | 43,5 | 44,1 |
| Frequência de modelagem (Hz) | 44,166 | 44,166 | 44,166 | 44,166 | 44,166 | 44,166 | 44,166 | 44,166 | 44,166 |
| Erro relativo (%) | 0,150 | 0,836 | 0,836 | 0,836 | 0,302 | 0,077 | 0,303 | 1,531 | 0,150 |

Fonte: Elaborado pelo autor

O maior valor encontrado com respeito ao erro relativo, para a frequência natural da placa sem a presença de corrosão, foi equivalente a 1,531%, para o sensor 8. Em relação ao menor valor de erro relativo observado, trata dos sensores 1 e 9, com erro relativo equivalente a 0,150%.

A partir disso, o modelo numérico foi então ajustado para os sensores 1 e 8, com a variação dos parâmetros alterados com a corrosão, essencialmente o módulo de Young e a espessura da região corroída.

As tabelas 4 e 5 apresentam os resultados da frequência natural obtida numericamente ao longo do processo de corrosão, bem como o erro relativo entre as frequências naturais experimentais e numéricas.

Tabela 4 - Comparação das frequências observadas pelo sensor 1 e pelo modelo numérico, ao longo do processo corrosivo

| Tempo (h) | Frequência experimental (Hz) | Frequência de modelagem (Hz) | Erro relativo (%) |
|----------------------|---|---|------------------------------|
| 0,5 | 43,1 | 43,134 | 0,079 |
| 1 | 43,1 | 43,134 | 0,079 |
| 2 | 43,3 | 43,356 | 0,129 |
| 3 | 43,4 | 43,440 | 0,092 |
| 20 | 43,5 | 43,573 | 0,168 |
| 48 | 43,9 | 43,921 | 0,048 |
| 72 | 44,2 | 44,189 | 0,025 |
| 96 | 44,1 | 44,094 | 0,014 |
| 120 | 44,3 | 44,304 | 0,009 |
| 144 | 43,9 | 43,979 | 0,180 |
| 192 | 44,1 | 44,162 | 0,141 |
| 216 | 44,1 | 44,161 | 0,138 |
| 240 | 44,1 | 44,161 | 0,138 |
| 336 | 44,3 | 44,320 | 0,045 |
| 384 | 44,3 | 44,319 | 0,043 |
| 2328 | 44,3 | 44,328 | 0,063 |
| 3744 | 44,7 | 44,711 | 0,025 |

Fonte: Elaborado pelo autor

O erro relativo dos valores das frequências naturais observadas para o sensor 1 apresentaram-se satisfatórios, o maior valor foi observado às 144 horas após a aplicação de NaCl 1M, com 0,180%, enquanto que o menor valor foi observado 96 horas após a aplicação da solução de NaCl 1M, com 0,014%.

Tabela 5 - Comparação das frequências observadas pelo sensor 8 e pelo modelo numérico ao longo do processo corrosivo

| Tempo (h) | Frequência experimental (Hz) | Frequência de modelagem (Hz) | Erro relativo (%) |
|----------------------|---|---|------------------------------|
| 0,5 | 43,1 | 43,134 | 0,079 |
| 1 | 42,8 | 42,895 | 0,222 |
| 2 | 43,3 | 43,356 | 0,129 |
| 3 | 43,2 | 43,263 | 0,146 |
| 20 | 43,4 | 43,430 | 0,069 |
| 48 | 43,6 | 43,619 | 0,044 |
| 72 | 43,9 | 43,918 | 0,041 |
| 96 | 44,5 | 44,526 | 0,058 |
| 120 | 44,0 | 44,036 | 0,082 |
| 144 | 44,0 | 44,036 | 0,082 |
| 192 | 44,1 | 44,162 | 0,141 |
| 216 | 44,2 | 44,247 | 0,106 |
| 240 | 44,3 | 44,328 | 0,063 |
| 336 | 44,2 | 44,244 | 0,100 |
| 384 | 44,2 | 44,244 | 0,100 |
| 2328 | 44,3 | 44,328 | 0,063 |
| 3744 | 44,4 | 44,444 | 0,099 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O erro relativo observado pela comparação dos valores da frequência natural obtidos experimentalmente pelo sensor 8 e pelo modelo numérico ajustado apresentaram-se satisfatórios, uma vez que o maior valor foi observado 1 hora após a aplicação da solução de NaCl 1M, com 0,220%, enquanto que o menor valor encontrado, foi observado 72 horas após a aplicação da solução, com 0,041%.

5 CONCLUSÃO

O objetivo proposto por este trabalho, diz respeito ao desenvolvimento de um sistema sensorial ótico, capaz de realizar o monitoramento da integridade de elementos estruturais metálicos de forma contínua. Através da literatura, foi possível observar as principais metodologias de desenvolvimento de sensores para mensurar a corrosão em elementos estruturais, no entanto, neste trabalho, a abordagem metodológica utilizada consistiu na análise da variação das frequências naturais com o tempo, dos elementos submetidos a uma corrosão controlada, através de uma solução de NaCl 1M.

Nesse âmbito, trabalhos que realizam o monitoramento estrutural por meio de sensores óticos apresentam uma grande contribuição nos ambientes acadêmicos e técnicos, dada a sua vasta aplicabilidade no setor de infraestrutura. A utilização de sensores óticos com base em redes de Bragg, permite, portanto, realizar a coleta de dados acerca do comportamento estrutural, e assim, auxiliar na tomada de decisão, buscando preservar a segurança. Portanto, a utilização de sensores óticos tem se tornado objeto de estudo nos últimos anos, dada a fiabilidade dos dados coletados.

De forma geral, o trabalho focou no desenvolvimento dos sensores óticos e na realização de ensaios que buscassem validar os resultados obtidos experimentalmente através do sistema sensorial. Dessa forma, as respostas dos nove sensores se apresentaram adequadas para o objetivo proposto, já que em todas foi possível observar um padrão de comportamento da curva definida pela variação da frequência natural em função do tempo, nomeadamente, para os sensores 1 e 8, foram observados coeficiente de determinação equivalentes à 91,1% e 83,78%. Os sensores 3, 5, 6, 7 e 9 apresentaram coeficientes de determinação equivalentes à 76,28%, 70,19%, 71,58%, 75,65% e 76,15%. Os sensores 2 e 4 apresentaram um coeficiente de determinação inferior a 70%, com 65,19% e 68,22% respectivamente.

Para auxiliar na validação dos dados, foram realizados também, ensaios eletroquímicos. Através do potencial de circuito aberto em três amostras foi possível observar a ocorrência da corrosão, então, através da realização do ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica, foi possível inferir as variações da resistência à corrosão do material utilizado. Inicialmente, para a amostra 1, a maior resistência encontrada correspondeu a 24 horas após a aplicação da solução, enquanto que as amostras 2 e 3 apresentaram uma maior resistência ambas a 8 horas após a aplicação da solução.

Também foi ajustado um modelo numérico da placa submetida à corrosão controlada, com o objetivo de analisar o comportamento numérico em função do experimental,

dos dados encontrados. Inicialmente, foi ajustado o modelo numérico para a placa não submetida à corrosão, através disso, foi possível observar uma adequada relação em comparação com os valores encontrados experimentalmente, em que para todos os sensores, o erro relativo foi inferior a 1,6%. Sendo o maior valor encontrado equivalente a 1,531% para o sensor 8 e o menor equivalente à 0,077% para o sensor 6. Posteriormente, foram modeladas as situações observadas para os sensores 1 e 8, por possuírem os maiores valores de ajuste de curva não linear. Os resultados encontrados para ambos se apresentaram adequados, uma vez o erro relativo das frequências numéricas em relação às experimentais não superou 1%.

Portanto, os resultados obtidos permitiram confirmar a fiabilidade do sistema sensorial desenvolvido, possibilitando sua aplicação para auxiliar na tomada de decisões em ambientes industriais e demais setores da infraestrutura, bem como assegurando a garantia de segurança, pela sua possibilidade de aplicação em ambientes hostis.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, P. **Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas**. Tese de Doutoramento. Departamento de Física, Universidade de Aveiro. Aveiro, 2011.
- ANTUNES, P. F. C. et al. **Biaxial optical accelerometer and high-angle inclinometer with temperature and cross-axis insensitivity**. IEEE Sensors Journal, v. 12, n. 7, p. 2399–2406, 2012.
- CORREIA, M. J. **Sensor for oxygen evaluation in concrete**. Cement e concrete composites, v. 28, p. 226–232, 2006.
- CUI, P. et al. **Measurement of aircraft wing deformation using fiber bragg gratings**. ICOCN 2017 - 16th International Conference on Optical Communications and Networks, v. 2017-Janua, n. 1, p. 1–3, 2017.
- DOMINGUES, M. F. et al. **Liquid hydrostatic pressure optical sensor based on micro-cavity produced by the catastrophic fuse effect**. IEEE Sensors Journal, n. 1, p. 5654-5658, 2015.
- EDALATI, K. Ã. et al. **The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes**. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 83, p. 736–741, 2006.
- HILBERT, L. R. **Monitoring corrosion rates and localised corrosion in low conductivity water**. Corrosion science, v. 48, p. 3907–3923, 2006.
- LEE, J.; YUN, C.; YOON, D. **A structural corrosion-monitoring sensor based on a pair of prestrained fiber Bragg**. Measurement Science and Technology, p. 1-7, 2009.
- LI, S. U. N.; CHEN, C.; QIANQIAN, S. U. N. **Experimental and finite element analyses on the corrosion of underground pipelines**. Science China Technological Sciences, v. 58, n. 6, p. 1015–1020, 2015.
- LI, S. Y. et al. **Application of steel thin film electrical resistance sensor for in situ corrosion monitoring**. Sensors and Actuators, B: Chemical, v. 120, n. 2, p. 368–377, 2007.
- LIMA, H. F. et al. **Structural health monitoring of the church of santa casa da misericórdia of Aveiro using FBG sensors**. IEEE Sensors Journal, v. 8, n. 7, p. 1236–1242, 2008.
- MESQUITA, E. et al. **Groundwater level monitoring using a plastic optical fiber**. Sensors and Actuators, A: Physical, v. 240, p. 138-144, 2016.
- MESQUITA, E. **Structural characterization and monitoring of heritage constructions**. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto. Porto, 2017.
- MESQUITA, E. et al. **Optical sensors for bond-slip characterization and monitoring of RC**

structures. Sensors and Actuators, A: Physical, v. 280, p. 332–339, 2018.

POPOV, B. N.; ZHENG, G.; WHITE, R. E. **Surface Treatment for Inhibition of Corrosion and Hydrogen Penetration of Type 718 Alloy.** Corrosion, v. 50, n. 8, p. 613–619, 1994.

RAHIM, R. A. et al. **Ultrasonic Tomography for Monitoring the Corrosion of Steel.** Jurnal Teknologi, v. 6, p. 151–158, 2015.

RAZAK, H. A.; CHOI, F. C. **The effect of corrosion on the natural frequency and modal damping of reinforced concrete beams.** Engineering Structures, v. 23, n. 9, p. 1126–1133, 2001.

REBELO, C. et al. **Cable tensioning control and modal identification of a circular cable-stayed footbridge: Dynamic testing of civil engineering structures series.** Experimental Techniques, v. 34, n. 4, p. 62–68, 2010.

REN, L. et al. **Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring.** Optical Fiber Technology, v. 20, n. 1, p. 15–23, 2014.

SOHN, H. et al. **A Review of structural health Monitoring Literature 1996-2001.** Third World Conference on Structural Control, Como, Italy, p. 1–7, 2001.