

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO  
DE UM SENSOR ÓPTICO DE  
CORROSÃO PARA ESTRUTURAS  
GALVANIZADAS**

Elaborado por:

Aldsmythys Pinheiro da Costa Cruz

**Recife, Julho de 2015.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM  
SENSOR ÓPTICO DE CORROSÃO PARA  
ESTRUTURAS GALVANIZADAS**

por

**ALDSMYTHYS PINHEIRO DA COSTA CRUZ**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO**

Recife, Julho de 2015.

© Aldsmythys Pinheiro da Costa Cruz, 2015

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

C957c	<p>Cruz, Aldsmythys Pinheiro da Costa. Construção e caracterização de um sensor óptico de corrosão para estruturas galvanizadas / Aldsmythys Pinheiro da Costa Cruz. - Recife: O Autor, 2015. 72 folhas, il., gráfs., tabs.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015. Inclui Referências.</p> <p>1. Engenharia Elétrica. 2. Corrosão. 3. Sensor óptico. 4. Estruturas metálicas. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira. (Orientador). II. Título.</p> <p style="text-align: right;">UFPE</p> <p>621.3 CDD (22. ed.) <span style="float: right;">BCTG/2015-289</span></p>
-------	--



# Universidade Federal de Pernambuco

## *Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

# ALDSMYTHYS PINHEIRO DA COSTA CRUZ

TÍTULO

*“CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM  
SENSOR ÓPTICO DE CORROSÃO PARA ESTRUTURAS GALVANIZADAS”*

A comissão examinadora composta pelos professores: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE, EDUARDO FONTANA, DES/UFPE, JEHAN FONSÊCA DO NASCIMENTO CAA/UFPE e LUIS HENRIQUE VILELA LEÃO, CAA/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **ALDSMYTHYS PINHEIRO DA COSTA CRUZ** **APROVADO**.

Recife, 20 de julho de 2015.

---

**CECILIO JOSÉ LINS PIMENTEL**  
Coordenador do PPGE

---

**JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO**  
Orientador e Membro Titular Interno

---

**JEHAN FONSÊCA DO NASCIMENTO**  
Membro Titular Externo

---

**EDUARDO FONTANA**  
Membro Titular Interno

---

**LUIS HENRIQUE VILELA LEÃO**  
Membro Titular Externo

**DEDICO ESTE TRABALHO**

A Deus e a minha família.

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, que me deu forças e me fez superar as dificuldades, sem sua ajuda, nada seria possível;

Ao **Professor Joaquim F. Martins Filho** por orientar este estudo e conduzir seu desenvolvimento com paciência, e pelo apoio e incentivo ao longo do trabalho;

Ao **Professor Jehan Fonsêca do Nascimento** pelo incentivo, apoio e compartilhamento dos conhecimentos;

Ao **Professor Antônio Azevedo da Costa e a seu aluno de pós-graduação David Ley Domíngue** por me ajudarem na preparação das amostras no sputtering e na evaporadora;

Ao **Departamento de Física** por ter cedido o laboratório para confecção das amostras utilizadas na execução da parte experimental do projeto;

Aos amigos do grupo de pesquisa: **Elias e Marcionilo**, pela os incentivos para concluir essa dissertação e pelos conhecimentos compartilhados;

Aos **amigos da Chesf** que contribuíram para revisão dessa dissertação, que com muito carinho e dedicação corrigiram os meus erros e deram suas contribuições para que esse sonho torna-se realidade, muito obrigado;

A minha **família**, pela confiança, pelo incentivo e amor incondicional em todos os momentos;

À minha querida esposa **Edna de Farias Santiago**, pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis e por acreditar quando eu não mais acreditava.

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM SENSOR ÓPTICO DE CORROSÃO PARA ESTRUTURAS GALVANIZADAS**

**Aldsmhythys Pinheiro da Costa Cruz**

07/2015

Orientador: Joaquim Ferreira Martins Filho, Doutor.

Área de Concentração: Fotônica

Palavras-chave: Corrosão, Sensor Óptico e Estruturas Metálicas

Número de Páginas: 74.

Esta dissertação apresenta a construção e caracterização de um protótipo de cabeça sensora óptica para medição da corrosão em estruturas metálicas que têm o zinco como elemento de proteção. O elemento sensor consiste de uma fibra óptica com ponta metalizada com zinco. A fabricação da cabeça sensora envolve a clivagem, limpeza e deposição do metal. A caracterização foi realizada colocando o elemento sensor num sistema de medição óptica que mede o sinal óptico refletido pelo metal depositado na face da fibra.

Foram estudados três métodos de deposição: térmica, por spray metálico e por sputtering. Porém, a deposição por sputtering foi a única que se mostrou ser mais adequada na construção do elemento sensor.

Os resultados da medição pelo sistema proposto sugerem ser possível monitorar a corrosão do metal na ponta da fibra pela modulação do sinal óptico refletido. Desta forma, ao medir o tempo entre a intensidade da luz refletida máxima e mínima, foi possível calcular a taxa de corrosão do zinco. Isso sugere que as cabeças construídas, nos experimentos desta dissertação, têm um grande potencial para serem utilizadas num sistema óptico de monitoramento da corrosão em estruturas galvanizadas.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **CONSTRUCTION AND CHARACTERIZATION OF AN OPTICAL CORROSION SENSOR FOR GALVANIZED STRUCTURES**

**Aldsmythys Pinheiro da Costa Cruz**

07 /2015

Supervisor(s): Joaquim Ferreira Martins Filho

Area of Concentration: Photonics

Keywords: Corrosion, Fiber Optic sensor and Metal Structures

Number of Pages: 74

This dissertation presents the construction and characterization of a prototype optical sensor head for measuring corrosion on metal structures that have zinc as a protective element. The sensor element consists of an optical fiber with metalized face with zinc. The manufacture of the sensor head involves the cleavage, cleaning and metal deposition. Characterization was made by placing the sensor element in an optical measuring system that measures the optical signal reflected by the metal deposited on the face of the fiber.

Three methods of deposition were studied, thermal, by metal spraying and sputtering. However, the sputtering deposition was the only one that was more appropriate in the construction of the sensor element.

The measurement results by the proposed system suggest that it is possible to monitor metal corrosion on the tip of the fiber optic signal modulation reflected. Therefore, when measuring the time between intensity maximum and minimum reflected light, it was possible to calculate the zinc corrosion rate. This suggests that the heads built, in this dissertation, have great potential to be used in the optical system of monitoring corrosion in galvanized structures.

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

OTDR - Optical Time-Domain Reflectometry

OSA - Optical Spectrum Analyser

DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco

SMF - Standard Single Mode Fiber

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Tipos de corrosão [1]. .....	14
<b>Figura 2</b> – Sensor de polarização linear de duas pontas [3]. .....	21
<b>Figura 3</b> – Localização do sensor em uma planta de refinaria [3]. .....	22
<b>Figura 4</b> – Vários tipos cupons de prova [3]. .....	24
<b>Figura 5</b> – Sensor de resistência Linear [3]. .....	25
<b>Figura 6</b> – Sensor de resistência linear após desgaste [3]. .....	25
<b>Figura 7</b> – Esquema do sensor de corrosão multiponto à base de fibra óptica monomodo [8]. .....	28
<b>Figura 8</b> – Torres de transmissão de nível de tensão 230kV. ....	31
<b>Figura 9</b> – Cabo de alumínio utilizado em linha de transmissão. ....	31
<b>Figura 10</b> – Isoladores de porcelana e vidro. ....	32
<b>Figura 11</b> – A corrosão na base das estruturas metálicas [21]. ....	34
<b>Figura 12</b> – Suporte para apoiar até 20 fibras ópticas. ....	35
<b>Figura 13</b> – Eletrodos utilizados para realizar a deposição térmica. ....	36
<b>Figura 14</b> – Local onde foram colocadas as fibras. ....	37
<b>Figura 15</b> – Foto do equipamento de sputtering utilizado na deposição. ....	38
<b>Figura 16</b> – Em (a) tem-se o suporte circular onde são colocadas as amostras; em (b) câmara do sputtering, onde pode ser vistos os eletrodos e a posição das fibras dentro da câmara; e em (c) um exemplo do alvo empregado para realizar a deposição. ....	38
<b>Figura 17</b> – Seletora das amostras. ....	39
<b>Figura 18</b> – Posição das fibras ópticas no suporte do sputtering (a) e dentro da câmara (b). ...	39
<b>Figura 19</b> – Equipamento de medição da corrente de formação do plasma. ....	40
<b>Figura 20</b> – Em (a) mostra-se a suporte antes da deposição e em (b) tem-se a suporte após deposição em que pode se visto o zinco espalhado ao redor das amostras. ....	40
<b>Figura 21</b> – Esquema do sensor de corrosão para análise do processo de corrosão [28]. ....	41
<b>Figura 22</b> – Gráfico linear da refletância (dB) em função da variação da espessura do metal na ponta da fibra óptica quando e meio ambiente é o ar em escala linear (a), gráfico da refletância em função da variação da espessura do metal na ponta da fibra óptica com a indicação da espessura em escala logaritmo (b). ....	42
<b>Figura 23</b> – Intensidade da luz refletida durante o período de corrosão do elemento sensor metalizado. ....	44
<b>Figura 24</b> – Resultado da medição do perfilômetro para o tempo de deposição de 15min. ....	46
<b>Figura 25</b> – Gráfico mostra uma forte correlação linear entre a espessura e tempo de corrosão, com a indicação da curva de regressão. ....	47
<b>Figura 26</b> - Estatísticas descritivas das intensidades de luz refletida nas amostras para o tempo de deposição de 5, 10 e 15 minutos. ....	50
<b>Figura 27</b> – Imagens geradas pelo MEV do filme de zinco com espessura média de 97,3nm deposição de 5min na face de fibra. ....	51
<b>Figura 28</b> – Imagens geradas pelo MEV da corrosão do filme de zinco com espessura média de 97,3 nm deposição de 5min na face de fibra. ....	52
<b>Figura 29</b> – Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco em função do tempo de corrosão pelo método manual de medição. ....	52
<b>Figura 30</b> – Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco em função do tempo de corrosão pelo método automático de medição. ....	53

<b>Figura 31</b> – Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco em função do tempo de corrosão, após diluição do ácido (a), (b), (c) e (d).....	54
<b>Figura 32</b> – Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 269nm de espessura em função do tempo de corrosão para diferentes amostras (a), (b) e (c). .....	55
<b>Figura 33</b> – Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 97,3 nm de espessura em função do tempo de corrosão para diferentes amostras (a), (b), (c) e (d). .....	56
<b>Figura 34</b> –Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 10 minutos de deposição em função do tempo de corrosão para diferentes amostras (a), (b) e (c), e em (d) apresenta-se a comparação dos três resultados. ....	57
<b>Figura 35</b> – Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 10 minutos de deposição em função do tempo de corrosão. ....	58
<b>Figura 36</b> – Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 18,84 nm de espessura de deposição em função do tempo de corrosão para cinco diferentes amostras (a), (b), (c), (d) e (e). .....	59
<b>Figura 37</b> – Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 10 minutos de deposição em função do tempo de corrosão para amostras diferentes (a), (b) e (c). .....	60
<b>Figura 38</b> – Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 10 minutos de deposição em função do tempo de corrosão. ....	61
<b>Figura 39</b> – Gráficos das figuras 36, após ser retirado o período em que a intensidade da luz foi constante.....	63
<b>Figura 40</b> – Intensidade da luz refletida versus tempo de corrosão, comparação entre as curvas experimental e simulada. ....	64
<b>Figura 41</b> - Intensidade média da luz refletida em (a), limites superior e inferior para a intensidade da luz refletida para corrosão em ácido acético (b), verificação das curvas geradas experimentalmente com os limites superior e inferior (c).....	65

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Resultados das três medições no perfilômetro.....	46
<b>Tabela 2</b> Resultados da potência da luz refletida na fibra óptica metalizada com zinco com tempo deposição de 5min. ....	48
<b>Tabela 3</b> Resultados da potência da luz refletida na fibra óptica metalizada com zinco com tempo deposição de 10min. ....	48
<b>Tabela 4</b> Resultados da potência da luz refletida na fibra óptica metalizada com zinco com tempo deposição de 15min. ....	49
<b>Tabela 5</b> Tempos de conclusão da corrosão para os gráficos das figuras 43. ....	63

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1. Formulação do tema da pesquisa.....	10
1.2. Justificativa.....	11
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>12</b>
2.1. Corrosão .....	12
<i>2.1.1. Formas da corrosão .....</i>	<i>13</i>
<i>2.1.2. Meios corrosivos .....</i>	<i>17</i>
<i>2.1.3 Sistemas de monitoração da corrosão .....</i>	<i>19</i>
2.2. Sensores ópticos de corrosão.....	26
2.3. Refletância em filmes finos.....	29
2.4. Torre de transmissão de energia elétrica .....	31
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1. Equipamentos e materiais.....	35
3.2. Metalização.....	36
3.2.1. Metalização por evaporação térmica .....	36
3.2.2. Metalização por spray metálico .....	37
<i>3.2.3. Metalização por sputtering .....</i>	<i>37</i>
3.3. Montagem experimental .....	41
3.4. Simulação computacional.....	42
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>43</b>
4.1. Metalização térmica.....	43
4.2. Metalização por Spray metálico .....	44
4.3. Metalização por sputtering .....	45
4.4. Medição da corrosão pelo sistema óptico.....	52
4.5. Determinação da taxa de corrosão do zinco no ácido acético .....	62
4.6. Modelo estatístico.....	65
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>6. PERSPECTIVAS .....</b>	<b>68</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>69</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Formulação do tema da pesquisa

A corrosão de materiais metálicos causa danos econômicos em todo o mundo. Nos Estados Unidos, onde houve estudo sobre o assunto, estima-se que, os custos da corrosão são aproximadamente de 3,1% do PIB, cerca de 276 bilhões de custo direto e em 552 bilhões de dólares o custo indireto [3].

Dentre as ações utilizadas para diminuir os custos da corrosão, destacam-se as técnicas de monitoramento da corrosão. Elas permitem que as equipes de manutenção acompanhem o estado da corrosão dos equipamentos e estruturas, possibilitando melhores ações de manutenção e reparo. Há varias técnicas de acompanhamento da corrosão: Resistência de polarização Linear, Impedância eletroquímica, Ruído Eletroquímico, Correntes Galvânicas, são apenas alguns exemplos [1-3]. A utilização delas depende do tipo de corrosão e também do acesso ao equipamento e à estrutura metálica.

Atualmente, sensores ópticos são empregados para monitorar vários tipos de grandezas, como por exemplo, temperatura, pressão umidade, corrente, tensão, campo elétrico e campo magnético [4]. O monitoramento das grandezas por sensor a base de fibra óptica têm vantagens como baixo peso, pequena dimensão, resistência a interferências electromagnéticas, elevada sensibilidade, confiabilidade. Além disso, o uso de fibra óptica, para monitoramento de grandeza, permite a utilização da tecnologia empregada para comunicação dados ao sistema de monitoramento, garantindo assim características, tais como construção de um sistema de monitoramento de sensores ópticos multiplexados, bem como utilização de amplificadores para melhorar a qualidade e extensão do sinal dos sensores [5].

Os sensores de corrosão que fazem uso da fibra óptica podem utilizar varias técnicas para extrair informação da luz, como da intensidade da luz refletida, alteração no campo evanescente [6,7] e outros. O sistema proposto por Martins Filho e colaboradores foi construído utilizando o princípio da refletância da luz sobre uma fina camada de metal depositada sobre a face da fibra óptica [8]. Com isso, foi possível acompanhar corrosão do metal depositado ao longo do tempo em um meio corrosivo e obter a taxa de corrosão.

Portanto, esta dissertação tem como finalidade construir e caracterizar um elemento sensor óptico que possa ser usado no sistema desenvolvido por Martins Filho e colaboradores, visando o monitoramento das estruturas das torres de linha de transmissão.

## 1.2. Justificativa

No Brasil, a geração de energia elétrica encontra-se geralmente distante dos grandes centros de consumo, por isso, há, atualmente, um grande sistema de transmissão de energia elétrica em todo o país. O sistema é formado basicamente por subestações e linhas de transmissão que, por sua vez, constituem as vias de transmissão de energia e são formadas basicamente por cabos condutores, isoladores e estrutura metálica [9]. As estruturas metálicas, também chamadas de torres de transmissão, que dão sustentação e suporte aos cabos condutores são fabricadas com liga aço-carbono galvanizadas. A galvanização tem a função de proteger a estrutura contra a corrosão atmosférica e do solo. Dentre essas, a corrosão do solo é a mais difícil de monitorar, pois, atualmente, o estado da corrosão no pé da estrutura é verificado por escavação. O pessoal de campo realiza as escavações e em seguida verifica visualmente o estado da corrosão [10]. O método relatado é ineficiente, uma vez que, após as escavações, nem sempre é encontrado danos na estrutura. Portanto, é necessário encontrar métodos mais eficientes e precisos para determinação da corrosão. Assim, pode-se utilizar do sistema proposto em [5], para acompanhar o monitoramento da corrosão nas torres de transmissão, visto que, esse sistema apresenta boas características, tais como: monitoramento da corrosão em múltiplos pontos da corrosão por multiponto (monitora a corrosão em vários pontos ao mesmo tempo); auto referenciado (ímune a variações espúrias do nível de sinal óptico); pode ser usado em ambiente hostil e também determinar a corrosão a quilômetros de distância do ponto de medição [11]. Essas características são atraentes na construção de um sistema remoto de monitoramento da corrosão, uma vez que, em uma linha de transmissão, há um grande número de torres, e algumas estão a quilômetros de distância do centro de operação.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Corrosão

A corrosão é comumente definida como a deterioração de matérias, geralmente metálicas, pela ação química ou eletroquímica do meio ambiente associado ou não a esforços mecânicos. Essas deteriorações, que são devido à interação físico-química do material com seu meio, são indesejadas e danificam o material, deixando-o inadequado para uso [1].

A corrosão está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e a confiabilidade sejam prejudicadas e o material não seja mais adequado para uso ao qual se destina. Por isso, antes da utilização de materiais metálicos na construção de instalações e equipamentos, além de observar as propriedades mecânicas e características de fabricação, é necessário verificar a resistência do material aos processos corrosivos associados ao meio ambiente de operação [2].

Os processos corrosivos acontecem pela reação dos metais com elementos não metálicos presentes no meio ambiente, como o oxigênio e o enxofre, produzindo compostos químicos semelhantes aos encontrados na natureza. Logo, se pode dizer que a corrosão, neste caso, corresponde ao processo inverso da fabricação siderúrgica, cujo objetivo é obter o metal a partir dos seus minérios ou compostos.

O meio ambiente é um grande influenciador dos problemas de corrosão, que são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades, como: nas indústrias, na construção civil, nos meios de transportes, nos meios de transmissão de energia, na odontologia, na medicina e em obras de arte.

As perdas econômicas que acontecem nessas atividades provenientes da corrosão podem ser classificadas como diretas ou indiretas. As perdas diretas são aquelas relacionadas com as perdas de materiais, substituição de peças e equipamentos que sofrerão corrosão; custo de inspeção e proteção, assim como, as perdas de reprocessamento e manutenção associada à corrosão. Já as perdas indiretas são mais difíceis de avaliar, podem ser imprevisíveis e, a princípio, intangíveis ou imensuráveis, porque estão relacionadas não com as causas da corrosão, mas com as consequências, por exemplo: paralisação acidental, perda de eficiência, contaminação de produto, multas, indenizações e desgastes da imagem.

Em vários países, foram executados estudos sobre o custo da corrosão. Um estudo desenvolvido por Hoar da Universidade de Cambridge na Inglaterra apontou os gastos anuais

com a corrosão na ordem de 365 milhões de libras esterlinas, sendo esse valor 3,5% do PIB do Reino Unido em 1971.

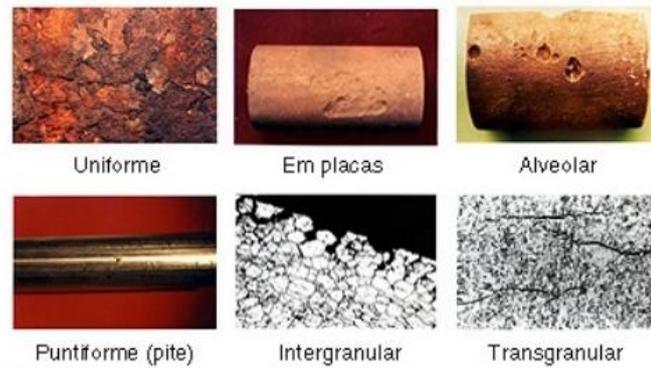
Estudos mais atualizados, realizados nos Estados Unidos e publicados em 2002, mostraram que o custo direto da corrosão é de 276 bilhões (aproximadamente 3.1% do PIB) e de 552 bilhões de dólares o custo indireto. O setor que representa a maior fatia do bolo é o setor de utilidades. Com o custo anual de 47,9 bilhões de dólares por ano, ele é formado pela área de suprimento de gás, água, eletricidade e telecomunicações.

No Brasil não há estudos para determinar as despesas da corrosão. Alguns autores consideram o índice de Hoar como uma boa aproximação, ou seja, 3,5% do PIB. Este valor estaria na faixa de 80 bilhões de reais por ano.

Os gastos com corrosão, com exemplificam esses dados, são elevados e, muitas das vezes, incomensuráveis quando não se tem um processo corrosivo controlado. É preciso, pois, uma boa administração da corrosão desde a fase de planejamento, em que deveria ser estudado o meio corrosivo e os materiais, até as fases de operação e monitoramento [1-3].

### ***2.1.1. Formas da corrosão***

A corrosão pode se apresentar sobre diversas formas, e a perfeita identificação das diferentes formas ajuda: no conhecimento do processo corrosivo, na escolha da melhor maneira de proteção e na melhor técnica de monitoramento. As diferentes formas estão relacionadas com aspecto do metal após sofrer a ação corrosão. Na Figura 1, encontram-se alguns tipos de corrosão cujos nomes estão relacionados com a impressão que o processo corrosivo deixou. Assim, por exemplo, quando se encontra um material metálico com uma grande área corroída dá-se a esse tipo de corrosão a denominação de uniforme, por outro lado, o local onde se vê um pequeno ponto de corrosão é chamado de pite.



**Figura 1** – Tipos de corrosão [1].

- Corrosão uniforme

A corrosão uniforme consiste no desgaste de toda a superfície em contato com o meio corrosivo de modo que a perda de espessura é praticamente igual em toda a região exposta ao processo. A corrosão uniforme acontece em geral devido às micropilhas de ação local e é, provavelmente, o tipo de corrosão mais comum em estrutura exposta à atmosfera ou a outros meios de ação uniforme.

Corrosão uniforme, por ter aproximadamente a mesma perda de espessura em toda a superfície metálica, é a forma de desgaste de mais fácil acompanhamento, principalmente quando se trata de corrosão interna em equipamentos ou instalações [1-3].

- Corrosão localizada

Corrosão localizada é um processo corrosivo em que a superfície, em contato com meio corrosivo, pode apresentar regiões com desgastes diferentes em relação a uma área maior. Há dois tipos de corrosão localizada: alveolar e por pite. Na alveolar, a corrosão se processa na superfície metálica produzindo sucos ou escavações semelhantes a alvéolos, caracterizando-se por apresentar o fundo arredondado com profundidade geralmente menor que seu diâmetro. Já na por pite, a corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, produzindo pites, caracterizando-se por apresentar cavidades profundas em forma angulosa e a profundidade é maior que seu diâmetro.

A corrosão alveolar é característica de matérias heterogêneas ou de meios que apresentam heterogeneidade. Pode ser acelerada por frestas e outros fatores geradores de

heterogeneidade, como cordão de solda, acúmulo de água, etc. Em contrapartida, a corrosão por pites é característica dos materiais metálicos formadores de película protetora e é o resultado, de modo geral, da atuação da pilha ativa-passiva nos pontos nos quais a camada passiva é violada [1-3].

Nos parágrafos anteriores, foram mostrados os tipos de corrosão com vista à forma de corrosão. Contudo, existe outro modo de classificar a corrosão; aquela em que leva em consideração o processo corrosivo envolvido.

- Corrosão por concentração diferencial

Os processos de corrosão associados à concentração diferencial ocorrem quando, no meio ambiente, existem agentes em concentrações diferentes, que resultam na criação de pilhas de concentração iônica diferencial e de concentração de aeração diferencial.

A corrosão por concentração iônica diferencial acontece toda vez que há uma variação da concentração de íons do metal no eletrólito. Essa variação de concentração favorecerá o aparecimento de diferentes potenciais eletroquímicos e, conseqüentemente, de uma pilha em que a área em contato com a menor concentração apresentará característica anódica, enquanto a área em contato com a maior concentração apresentará característica catódica [2-3].

A corrosão por concentração de aeração diferencial ocorre quando há variação de concentração de oxigênio no eletrólito. O potencial eletroquímico de um material metálico torna-se cada vez maior quanto maior for a concentração de oxigênio ao seu redor. Logo as áreas em contato com maior concentração de oxigênio apresentarão comportamentos catódicos. A corrosão de aeração diferencial é encontrada com frequência na interface de saída das estruturas do mar ou do solo para a atmosfera.

- Corrosão Galvânica

Quando dois materiais metálicos de diferentes potenciais eletroquímicos estão em contato na presença de um eletrólito, aparece uma diferença de potencial e, conseqüentemente, transferência de elétrons. Os elétrons serão transferidos do material metálico com características anódicas para o material com características catódicas, de modo que o anodo irá se desgastar, provocando assim a corrosão galvânica.

A corrosão galvânica caracteriza-se por apresentar corrosão localizada próxima à região de acoplamento, ocasionando profundas perfurações no material metálico que funciona como anodo. Este tipo de corrosão será mais intenso quanto mais afastado estiverem os materiais na tabela de potencial eletroquímico, quanto maior for a diferença das áreas anódica e catódica. Um bom exemplo de corrosão galvânica é dado pelo par cobre e ferro mergulhados em água. Neste caso, o ferro se corrói prontamente, ao passo que o cobre permanece protegido enquanto houver ferro.

Contudo, nem sempre o aparecimento de pilhas galvânicas é indesejável, pois há aplicações em que o surgimento da pilha galvânica é algo apreciável; porque elas funcionam, também, como proteção à corrosão; já que é possível, olhando uma tabela de potencial eletroquímico, escolher um metal capaz de fornecer elétrons a outro de importância estrutural, evitando a corrosão do material mais importante. Um bom exemplo da aplicação de proteção galvânica são os aços galvanizados, os quais são constituídos de aço revestido com uma fina camada de zinco, que, por apresentar característica eletroquímica mais negativa que o aço, será corroído, protegendo o aço.

- Corrosão Eletrolítica

A corrosão eletrolítica é um processo corrosivo de natureza eletroquímica, ele aparece quando há passagem da corrente elétrica de fuga de um circuito para o meio ambiente, solo e água, que, por sua vez, contenha uma estrutura metálica enterrada ou submersa, a qual passa a ser um bom caminho para a passagem da corrente elétrica até o ponto de retorno do circuito original. Os pontos, por onde a corrente de fuga tem acesso à estrutura metálica; e o ponto, por onde ela retorna o circuito original; são chamados respectivamente catodo e anodo.

A corrosão resultante poderá ser de grande intensidade e de alta velocidade. As intensidades dessas correntes são maiores do que aquelas originadas nas pilhas naturais da própria estrutura metálica, decorrentes das suas heterogeneidades ou das variações do meio em que se encontram.

Como visto, a intensidade da corrente é um fator determinante para esse tipo de corrosão; porém, há outra característica da corrente, que contribui para a gravidade da corrosão. A frequência da corrente também é algo que deve ser levada em conta, porque as

correntes contínuas e alternadas de baixa frequência são responsáveis por danos nas estruturas [1-3].

### **2.1.2. Meios corrosivos**

- Atmosfera

A corrosão atmosférica é a capacidade de a atmosfera causar danos em metais ou em ligas metálicas, podendo ocorrer em qualquer metal exposto à atmosfera terrestre, como as estruturas de torre de transmissão, carros, equipamentos [3,12]. A corrosão atmosférica é um processo eletroquímico que poderá apresentar desgaste uniforme ou localizado, e a depender da natureza do material e dos detalhes construtivos, podendo ser intensificada pela umidade relativa do ar, do teor de sais em suspensão e do teor de gás proveniente da queima de combustível [1-3]. Quando a umidade relativa do ar é muito baixa, os metais ou as ligas metálicas apresentam baixa taxa de corrosão. Porém, quando a umidade relativa do ar está acima de um valor crítico, há um aumento no processo corrosivo que será proporcionalmente a umidade relativa. A umidade relativa crítica (depende do material e dos contaminantes atmosféricos) está normalmente em torno de 60% para o aço; porém, pode chegar a 70% ou 80%, dependendo do microclima ao qual está exposto [1-3].

A presença de sais em suspensão aumenta o processo corrosivo, por isso os equipamentos, máquinas e estruturas próximas à orla marítima ou sobre o mar apresentam alto grau de corrosão. A maior ação corrosiva, nesses locais, deve-se à deposição de névoa salina contendo sais como cloreto de sódio e cloreto de magnésio,  $\text{NaCl}$  e  $\text{MgCl}_2$ , porque eles absorvem a umidade atmosférica deixando a superfície metálica sempre umedecida e, conseqüentemente, sujeita à corrosão, pois apresentam fortes eletrólitos.

Os gases, encontrados na atmosfera, não são apenas aqueles que a constituem, como oxigênio e nitrogênio, mas também aqueles provenientes da queima de combustível pela indústria e pelos automóveis tais como monóxido e dióxido de carbono ( $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ ), ozônio, ( $\text{O}_3$ ); dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ); trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ); monóxido de nitrogênio ( $\text{NO}$ ); dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ).

Dentre esses gases, os mais importantes para caracterizar os tipos de agressividade da atmosfera são o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e o trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ). Eles são produzidos devido ao uso de óleo combustível pela indústria, contendo geralmente 3% a 4% de enxofre e do grande aumento de veículos automotivos.

Esses gases formam com a umidade presente no ar respectivamente ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) e ácido sulfúrico, justificando o fato de as atmosferas industriais serem as mais corrosivas e as atmosferas urbanas mais corrosivas que as rurais.

- Solos

O conhecimento das características corrosivas do solo tem atualmente grande importância, pois, hoje em dia, tem-se uma grande quantidade de estruturas e tubulações enterradas tais como: oleodutos, gasodutos, adutoras e minerodutos; estruturas metálicas, usadas para construir torres de linha de transmissão e telecomunicações, e tanques de armazenamento de combustível.

A presença da corrosão em tanques ou tubulações, que transportam e armazenam combustíveis, podem causar furos, pelos quais devem vaziar combustíveis e, com isso, a possibilidade de contaminar o solo, os lençóis freáticos, além de pode causar incêndio e explosão. Já, as partes das estruturas metálicas enterradas das torres de transmissão de energia elétrica ou de telecomunicações, ao sofrerem corrosão do solo, podem afetar o fornecimento de energia elétrica ou causar perda de comunicação por um longo período de tempo, acarretando perda de faturamento da empresa prestadora do serviço bem como prejuízo à sociedade, uma vez que a energia e a informação são imprescindíveis à sociedade moderna.

A determinação da ação corrosiva do solo é verificada levando em consideração a natureza do solo, as características físico-químicas do mesmo, as condições microbiológicas e, posteriormente, as condições operacionais que podem influenciar na ação corrosiva sobre tubulações ou estruturas metálicas enterradas. A ação corrosiva pode ser iniciada por uma dessas variáveis, contudo o que ocorre normalmente é a união de todas elas.

As características físico-químicas do solo corrosivo podem ser influenciadas pela presença de algumas substâncias: água, sais solúveis e gases, bem como pela alteração nos valores do pH, da resistividade do solo e do potencial redox. Estas características não são totalmente independentes, o que ocorre de fato é combinações delas. Assim, por exemplo, pode-se citar a ação que a água e os sais solúveis exercem sobre a resistividade elétrica, que será mais baixa quanto maior for à concentração de sais e água. A presença de gases, provenientes da atmosfera, como o oxigênio, pode acelerar a corrosão, pois a redução do oxigênio na área catódica teria uma ação aceleradora.

O grau de agressividade do solo pode ser determinado pelos valores do pH. Cada solo tem o seu valor do pH - básico ou ácido- e é classificado conforme esse valor. Portanto,

os solos que têm valores de pH menores do que quatro são considerados muito corrosivos; compreendidos entre quatro e sete são considerados corrosivos; e os maiores que sete tornam o solo pouco corrosivo [2].

Alguns estudiosos consideram o potencial redox uma variável importante para caracterizar a corrosividade dos solos, pois ele mede a atividade microbiológica das bactérias redutoras de oxigênio, e é possível relacioná-lo com a corrosividade do solo.

As bactérias encontradas no solo podem ser classificadas em dois grupos, aeróbicas e anaeróbicas. As anaeróbicas retiram a energia necessária para seu metabolismo a partir da redução do enxofre e o produto da corrosão é caracterizado pelo aparecimento de tubérculos, que apresentam profundos pites e a presença de sulfeto de ferro, de cor preta.

As aeróbicas sintetizam compostos inorgânicos de carbono e nitrogênio. A energia para essa síntese é proveniente da oxidação do enxofre que forma o ácido sulfúrico e vai contribuir para alteração do valor do pH e da resistividade do solo, tornando-o mais corrosivo [1,2].

Os solos são classificados conforme a agressividade. Caso o solo apresente forte ação bacteriana, será classificado como muito corrosivo; caso solo apresente média ação bacteriana, será classificado com corrosivo; e caso solo apresente fraca ação bacteriana, será considerado com pouco corrosivo.

Contudo, a corrosividade é mais facilmente relacionada como a resistividade elétrica do solo, conforme se pode encontrar em [1]. Na literatura, encontram-se três estudos relacionando a resistividade do solo com o grau de corrosão: o primeiro relaciona a corrosão com apenas a resistividade elétrica; o segundo relaciona a corrosividade do solo com o potencial redox, teor de água e resistividade; e, último, reafirma a importância da resistividade elétrica como determinante na corrosividade do solo [1].

A resistividade do solo é uma variável importante na caracterização da agressividade, porém, para melhorar essa caracterização, deve-se, também, levar em conta o potencial redox, pH, umidade, teores de cloreto, sulfato e sulfeto.

### ***2.1.3 Sistemas de monitoração da corrosão***

A monitoração da corrosão consiste na utilização de técnicas, as quais permitam avaliar de forma preventiva o desenvolvimento de processos corrosivos, atestando a integridade de equipamentos ou instalações e, conseqüentemente, a sua confiabilidade operacional [2].

Apesar dos ensaios de corrosão permitirem o acompanhamento do processo corrosivo, existe um grande interesse, cada vez maior, na avaliação instantânea da corrosividade do meio e das taxas de corrosão.

A monitoração da corrosão pode ser efetuada com vistas à tomada de ações preventivas. Neste caso, com o acompanhamento in loco da corrosão, amplia-se os tempos de campanha e, principalmente, prover medidas corretivas que assegurem uma vida longa aos equipamentos e instalações [2]. Há, atualmente, uma grande necessidade de acompanhar o estado da corrosão no local de operação dos equipamentos e estruturas a fim de prever qualquer dano causado pela corrosão e, assim, antecipar as ações corretivas. Os sistemas de monitoramento da corrosão podem ser classificados em três grupos.

Os sistemas considerados de tempo real ou de pequeno espaço de tempo [3]:

- Resistência de Polarização Linear;
- Impedância Eletroquímica;
- Ruído Eletroquímico;
- Correntes Galvânicas.

Os sistemas de monitoração de acompanhamento:

- Os Cupons de Perda de Massa;
- Resistência elétrica;

Os sistemas de monitoração da corrosão considerados a posteriori.

- Resistência de Polarização Linear

É uma técnica de tempo real, que consiste na aplicação de uma pequena voltagem (ou polarização) a um eletrodo mergulhado no eletrólito. A corrente necessária para um pequeno afastamento do potencial específico de repouso (potencial de corrosão), por exemplo, 10mA, está diretamente relacionada à corrosão na superfície do eletrodo imerso no eletrólito. Assim, medindo a variação da corrente, é possível determinar a velocidade da corrosão que está acontecendo na superfície do eletrodo [2].

A técnica de resistência à polarização é utilizada em sistemas aquosos, pois a presença do eletrólito é fundamental. Essa técnica permite identificar algum descontrole na corrosão e, assim, possibilitando ações imediatas com o intuito de controlar o processo corrosivo.

A Resistência de Polarização Linear tem as seguintes vantagens: mede muito bem taxa a taxa de corrosão uniforme, é usado em laboratório, permite rapidez na determinação de taxa de corrosão, tem boa sensibilidade para detectar pequenas variações no meio corrosivo. Contudo, não fornece boas informações quando a corrosão acontece de maneira localizada, pois pequenos furos podem não ser percebidos como uma variação perceptível pela técnica, além da necessidade de introduzir sonda. Por fim, a polarização linear fornece informação qualitativa, posto que a taxa de corrosão medida possa apresentar erros significativos em relação ao valor real [2].

Os sensores são formados por dois ou três eletrodos. A figura 2 mostra um exemplo do sensor de resistência de polarização linear com dois eletrodos, destacando a localização dos eletrodos e de elementos importantes para a operação do sensor. Os eletrodos são denominados como eletrodo de trabalho e eletrodo de referência. Ambos não precisam ser do mesmo metal do equipamento em que se observa a corrosão, essa exigência é apenas para o eletrodo de trabalho.

Na Figura 3 exibem-se uma planta de refinaria, em destaque estão os pontos, na planta, onde são colocados os sensores de corrosão. Os pontos são escolhidos em locais representativos do processo corrosivo.



**Figura 2** – Sensor de polarização linear de duas pontas [3].



**Figura 3** – Localização do sensor em uma planta de refinaria [3].

Conforme pode ser visto na referência (Jambo, 2008), os sensores são instalados em locais representativos do processo, procurando evitar zonas mortas ou regiões de estagnação ou altas velocidades de fluxo, podendo ser utilizado em desvios, “by-pass”, desde que sejam asseguradas as condições representativas do processo.

- Impedância Eletroquímica

A cinética das reações que ocorre na interface, metal e eletrólito, não podem ser determinados pelas técnicas estacionárias, pois essas técnicas, como a polarização linear, permitem apenas o conhecimento sobre a etapa lenta do processo corrosivo [3].

Por esse motivo, técnicas não estacionárias, entre elas as de impedância eletroquímica, foram desenvolvidas para permitir melhor compreensão dos processos eletroquímicos. A impedância eletroquímica é, atualmente, uma das ferramentas mais empregadas para a pesquisa do comportamento de interfaces eletroquímicas [2,3].

A técnica da impedância eletroquímica funciona a partir de uma aplicação de um sinal de potencial ou corrente de pequena amplitude e com frequência variável, sobre o eletrodo em estado estacionário permitindo que a impedância seja a razão entre a variação imposta e a resposta do sistema.

O fato de utilizar sinais de pequena amplitude garante que o sistema esteja operando em região linear. Ao se impor variações na frequência, é possível conseguir informações sobre os processos eletroquímicos que ocorrem na área de contato entre o eletrodo e a

solução, uma vez que cada processo é caracterizado por constantes de tempo com valores diferentes, e que respondem com diferentes velocidades às variações impostas.

Essa técnica de monitoramento permite identificar o mecanismo de corrosão e os efeitos eletroquímicos por meio de diversos parâmetros obtidos com os diagramas de impedância. Apresenta como desvantagens: somente ser aplicada em meios condutores, utiliza instrumentação bastante sofisticada e é de difícil adaptação para medidas de campo, além de ser necessário ter um maior grau de conhecimento sobre eletroquímica e sobre o fenômeno de interface para interpretar os diagramas de impedância [2].

- Ruído Eletroquímico

Ruídos eletroquímicos referem-se à ocorrência natural de flutuações no fluxo de potenciais e correntes de corrosão. As flutuações no potencial de corrosão podem indicar uma alteração na termodinâmica do processo corrosivo, enquanto as flutuações na corrente indicam variações na cinética do processo corrosivo. As flutuações dos potenciais e correntes de corrosão têm sido largamente usadas para investigar processos corrosivos, principalmente de corrosão localizada e de corrosão sobtensão.

Uma peça metálica colocada em um meio corrosivo apresenta diferenças estruturais tais como: mais de uma fase metalúrgica; contorno de grão, inclusões, tensões internas etc. Esta anisotropia propicia a existência de uma infinidade de microscópicas pilhas galvânicas distribuídas ao longo de toda a superfície imersa do metal. Essas pilhas são formadas por regiões ou sítios anódicos e catódicos que, em pequenas frações de tempo, aparecem e desaparecem, invertem seu potencial ou formam novas combinações de pilhas.

O processo de monitoramento pelo ruído eletroquímico apresenta a vantagem de ser uma técnica de resposta rápida, utilizada para detecção de fenômenos aleatórios e tem como desvantagem, a interpretação dos resultados, pois necessita de um bom conhecimento técnico [2].

- Correntes Galvânicas

A técnica de monitoramento de corrosão galvânica, que é também conhecida com amperímetro de resistência nula, é constituída de uma sonda galvânica formada por dois eletrodos dissimilares, que, quando expostos ao mesmo fluxo, aparecerá uma diferença de potencial natural entre os dois eletrodos [2-3].

Logo, a corrente gerada como consequência dessa diferença de potencial está relacionada à taxa de corrosão que está acontecendo no eletrodo mais ativo (anodo). Essa técnica é largamente aplicada em sistema de injeção de água em que a concentração de oxigênio dissolvido é uma preocupação fundamental.

A técnica de corrente galvânica apresenta partes simples de mediação. Serve como um bom indicador da presença de espécies oxidantes no sistema, e tem, como desvantagem, a aplicação apenas em meios condutores, não funcionar bem em meios com sulfeto e não indica a taxa de corrosão, apenas mostra a presença de compostos oxidantes.

- Os Cupons de Perda de Massa

A corrosão pode ser monitorada facilmente pela medida de perda de massa. Um cupom (amostra do metal ou liga), conforme pode ser visto na figura 4, é pesado e colocado em meio corrosivo. Após um período de tempo razoável, o cupom é removido, limpo utilizando normas específicas para esse procedimento; e novamente pesado. A redução de massa do corpo de prova é convertida em uma perda de espessura total, e depois em taxa de corrosão.

Essa técnica é altamente usada pela indústria de óleo e gás para determinar a taxa de corrosão em tubulações e equipamentos de forma bastante simples. É uma técnica de baixo custo, e também permite obter informações a respeito da morfologia do processo corrosivo e da natureza dos depósitos, mede a perda real no período de exposição e permite a verificação de camada protetora sobre o cupom. Porém apresenta a desvantagem de só ser utilizada se o processo corrosivo for completamente uniforme; e precisa de cuidado especial na limpeza do material aderente, pois, ao limpar o cupom para retirada da parte corrida, pode-se acabar removendo também parte do material que não sofreu corrosão e com isso interferir na medição da taxa de corrosão [2,3].

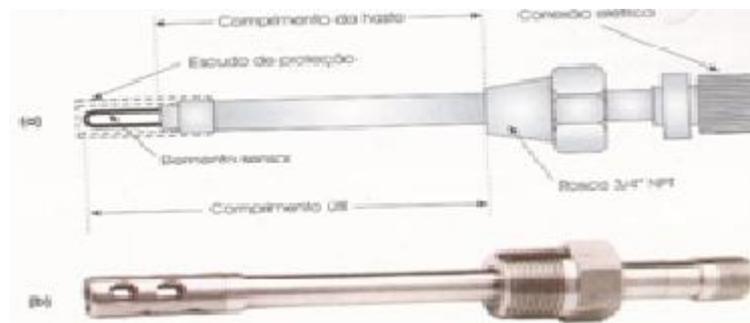


**Figura 4** – Vários tipos cupons de prova [3].

- Resistência elétrica

A técnica de resistência elétrica utiliza o princípio da variação da resistência elétrica a partir da diminuição da área do elemento resistivo (fio, tubo ou tira) exposto o meio corrosivo, ao longo do tempo. As variações da resistência elétrica são medidas cumulativamente, tendo-se como base a medida de resistência inicial do sensor [2-3].

A figura 5 mostra um exemplo do sensor antes da utilização, é possível ver a área superficial íntegra. A redução dessa área permite medição da taxa de corrosão. O sensor ao ser colocado dentro de um ambiente corrosivo, ele começa a perder parte da superfície lateral, conforme pode ser visto na figura 6.



**Figura 5** – Sensor de resistência Linear [3].



**Figura 6** – Sensor de resistência linear após desgaste [3].

Essa técnica é empregada em meios onde não existe a presença de uma fase aquosa contínua, como em oleodutos e gasodutos, ele mostra a tendência da taxa de corrosão em função do tempo, proporcionando a obtenção, com clareza, do aumento e diminuição da corrosividade ocasionada pelas variações do processo (vazão, temperatura, pressão aumento da concentração de agentes corrosivos etc.). O método de resistência elétrica pode ser usado em qualquer tipo de meio para determinação da taxa de corrosão uniforme [3].

Porém, não permite medir as mudanças de corrosividade nos fluidos ou taxa de corrosão de forma instantânea. É suscetível a interferência eletromagnética, pois sofre

influência de fontes de ruídos elétrico e térmico, tais como fonte de alimentação, motores elétricos e transmissão de rádio [2].

- Acompanhamento de espessura

A técnica de acompanhamento da espessura utiliza-se de ultrassom para avaliar a espessura dos equipamentos ou dutos em pontos críticos, e, com isso, avaliar o processo corrosivo, estimar a vida útil, bem como definir o momento mais adequado para realizar parada operacional.

Esse método de avaliação da corrosão tem limitação a avaliar apenas corrosão uniforme, o transporte do equipamento de ultrassom para o local, além da dificuldade de acessar locais nos equipamentos ou nos dutos onde devem ser colocadas as sondas.

## **2.2. Sensores ópticos de corrosão**

Um sensor óptico de corrosão pode ser definido como um dispositivo através do qual o processo corrosivo interage com a luz guiada pela fibra óptica, produzindo alteração em algum parâmetro da luz como intensidade, fase, polarização ou comprimento de onda ( $\lambda$ ). A partir dessas modificações é possível criar uma relação entre as variações do parâmetro da luz como processo corrosivo, permitindo assim o monitoramento da corrosão por meio de dispositivo óptico [13-15].

Um sistema de monitoramento óptico de corrosão utiliza-se de equipamentos, dispositivos e fibras ópticas. A fibra óptica tem a função de transportar a luz até o elemento sensor, bem como ser parte essencial desse elemento, uma vez que a fabricação dele é realizada por meio de modificações nas características da fibra óptica [6].

A utilização de fibra óptica traz consigo algumas vantagens: imunidade eletromagnética, por serem constituídas por materiais isolantes; monitoramento remoto, uma vez que os feixes luminosos viajem por longas distâncias na fibra sem perdas de propagação significativas; e como tem dimensões pequenas podem ser colocadas em locais de difícil acesso. Os sensores de ópticos de corrosão podem ser aplicados em vários locais tais como poços de petróleo e aeronaves [16].

Os sensores ópticos de corrosão podem ser classificados como intrínsecos ou extrínsecos [16]. Quando o processo corrosivo interage diretamente com o feixe de luz, modificando uma ou mais características da luz, o sensor óptico é chamado de sensor extrínseco; Ou seja, a luz que sai da fibra, interage com o processo corrosivo e retorna à fibra

para ser processada, e assim, é possível obter informação sobre a corrosão. Já no sensor intrínseco, a modificação da luz acontece dentro da própria fibra óptica, não ocorrendo interação do feixe de luz com o meio corrosivo. O feixe de luz que se propaga pela fibra óptica sofre alteração dentro da própria fibra, sem contato com o meio externo [13, 17].

Os sensores ópticos de corrosão também podem ser classificados conforme a forma de medição: indireta ou direta da corrosão. O sensor óptico de medição indireta mensura corrosão, não observando o material da estrutura ou equipamento, mas sim, a partir de uma amostra dessa material colocado de alguma forma na ponta da fibra óptica. Outros materiais podem ser utilizados, desde que seja possível encontrar uma relação entre os materiais.

Por outro lado, os sensores ópticos de medição direta tenta detectar os produtos da corrosão, como oxigênio ou hidrogênio. Esse tipo de sensor é independente do material que está sendo corroído. Os sensores ópticos de medição direta usam a detecção dos íons resultantes do processo de corrosão. O sensor é construído a partir da ligação entre a fibra óptica e um polímero, o polímero tem a função de interagir com o produto da corrosão, tais como hidrogênio, oxigênio. Essa interação modifica a propriedade do polímero que, por sua vez, modifica o comprimento de onda da luz. A grande vantagem da técnica de fluorescência é que permite detectar concentrações muito baixas do produto analisado [16].

C. Lee (2006) exemplifica a construção de um sensor óptico de medição direta. Os passos para construção do sensor são descritos a seguir: a casca de fibra óptica é retirada lateralmente até atingir o núcleo; em seguida, é depositado um polímero que modificar o índice de refração quando está em contato com o hidrogênio.

Os sensores ópticos de corrosão indireta monitora o mesmo metal constituinte da estrutura onde ocorre o processo corrosivo [16]. A medição é indireta, pois o metal observado durante o processo corrosivo, não faz parte de estrutura em si, foi depositado por algum processo de metalização na fibra óptica [11]. Portanto, ao colocar a fibra metalizada no mesmo ambiente corrosivo da estrutura, espera-se que ambos sofram o mesmo processo corrosivo, dessa maneira, inferir sobre a corrosão na estrutura a partir da modificação de algum parâmetro da luz ocasionada pela corrosão do metal na fibra óptica. Os metais de interesse são, geralmente, colocados em dois locais na fibra óptica: na face ou na superfície lateral. A escolha de onde deve ficar o metal vai depender de alguns fatores, tais como o sistema de medição óptico, o tipo de fibra óptica empregada, qual parâmetro da luz deseja ser modificado etc.

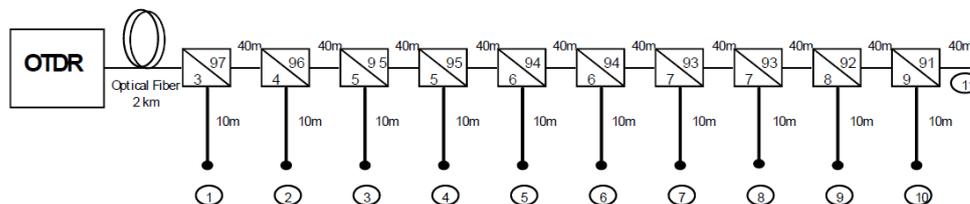
A metalização na lateral de fibra óptica é mais complexa e apresenta uma grande desvantagem em relação à metalização na face; o fato de ocorrer no núcleo e para isso é preciso remover o a casca deixando a fibra mais frágil.

Em G. QIAO (2006) é demonstrada a criação de um sistema de medição óptica de corrosão o qual é construído basicamente por fibra óptica, circulador, fonte luz e medidor de potência óptica. O elemento sensor foi fabricado a partir da deposição de uma liga ferro-carbono (Fe-C) sobre a cabeça da fibra óptica que, ao ser colocado em um ambiente corrosivo, possibilitou medir a variação da intensidade da luz por unidade de tempo, mostrando uma relação entre a corrosão do metal e a modificação da intensidade da luz.

Já em Nascimento (2011) foi proposto um sistema de medição em que na cabeça de fibra foi depositado alumínio e o sistema de medição consistiu de um OTDR e acopladores, conforme pode ser visto na figura 7, esse tipo de sensor é classificado como um sensor de fibra óptica quase distribuído porque não observa a corrosão em toda a estrutura, mas em alguns pontos.

Os pontos numerados de 1 até 10, na figura 7, são formados por prolongações de fibras ópticas monomodo onde foram depositados filmes metálicos, usando a técnica de evaporação térmica.

O OTDR lança sobre a fibra óptica um pulso de luz que, ao chegar à ponta metalizada, retorna devido à refletância. O pulso que retorna trás consigo a informação da espessura do metal na ponta da fibra, pois, quanto menor a quantidade de metal, menos luz retornará ao OTDR. Assim, ao colocar as pontas em um meio corrosivo, há, conseqüentemente, uma diminuição na intensidade da luz de retorno.



**Figura 7** – Esquema do sensor de corrosão multiponto à base de fibra óptica monomodo [8].

Portanto, há, atualmente, duas linhas de pesquisa para sensor de corrosão óptico. A que faz uso da medição direta, capazes de medir, por meio da interação com a luz, a corrosão a partir detecção de algum elemento resultante do processo corrosivo; e a medição indireta que trata de uma inferência da corrosão, uma vez que o metal que está sendo observado não é o metal do equipamento ou estrutura, mas aquele que foi depositado na face da fibra óptica.

### 2.3. Refletância em filmes finos.

Os filmes finos possuem algumas aplicações, tais como: em sistemas antirreflexos, em sistemas altamente refletivos, em filtros interferométricos, dispositivos de polarização e em sistemas absorvedores de calor. Eles também são largamente utilizados na microeletrônica como barreiras de alta constante dielétrica e como transistores, além de dispositivos optoeletrônicos, micro-eleto-mecânicos e outros [18].

O estudo dos filmes finos passa pela caracterização dos filmes quanto às características mecânica, elétrica e óptica. Tendo o conhecimento dessas características, é possível direcioná-los para alguma aplicação. Um bom exemplo disso são os óculos polarizados, onde os filmes têm a propriedade de permitir que a luz sem polarização tenha maior intensidade em uma direção do que em outra, dando ao usuário maior conforto visual [19].

As propriedades ópticas de filme fino para materiais não dielétricos podem ser obtidas a partir da medição da potência óptica de transmissão e de reflexão da luz, considerando conhecidos o ângulo e comprimento de onda da luz incidente, bem como comprimento do filme. O inverso também é verdadeiro, caso se conheça a propriedade do filme fino, com as constantes ópticas é possível calcular o valor da refletância e transmitância da luz que incide sobre o filme fino.

Para o caso de uma camada simples de filme transparente com luz incidindo perpendicularmente à interface, os coeficientes de reflexão de Fresnel, para a interface fibra/filme e a interface filme/ambiente, são expressos por  $r_1$  e  $r_2$ , respectivamente [19,20].

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad (1)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad (2)$$

onde  $n_0$ ,  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração da fibra, do filme e do meio ambiente, respectivamente. No caso de haver absorção no filme (por exemplo, filmes metálicos), o índice de refração terá um termo complexo. Portanto, o filme metálico passará a ter um componente real e outra imaginária ( $n_1 = n_1 - ik_1$ ). Assim, as expressões para o coeficiente de Fresnel considerando filmes metálicos serão:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1 + ik_1}{n_0 + n_1 - ik_1}, \quad (3)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2 + ik_1}{n_1 + n_2 - ik_1}. \quad (4)$$

O coeficiente de reflexão de Fresnel não terá um significado direto com a intensidade da luz refletida, porque o meio agora não só reflete ou transmite a luz mais também tem a propriedade de absorver. Portanto, caso a atenuação da onda não dependa da distância que a luz se propaga no filme, o coeficiente de reflexão de Fresnel pode ser escrito como [25, 28]:

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-i\Phi_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-i\Phi_1}}, \quad (5)$$

o  $r$  representa o coeficiente de reflexão total de Fresnel para uma camada simples.  $\Phi_1$  é a mudança de fase devido à passagem na camada absorvedora e é expresso por [28]:

$$\Phi = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda}, \quad (6)$$

em que  $d_1$  é a espessura do filme,  $\lambda$  é o comprimento da luz incidente no vácuo e o  $n_1$  é índice de refração do filme. A refletância para uma camada simples absorvedora é o módulo do coeficiente de reflexão de Fresnel, que é escrito da seguinte forma [25, 28]:

$$R_{\text{uma camada}} = \left| \frac{r_1 + r_2 e^{-i\Phi_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-i\Phi_1}} \right|^2 \quad (7)$$

## 2.4. Torre de transmissão de energia elétrica

A maior parte da geração da energia elétrica brasileira vem de usinas hidroelétricas. Conforme dados da Aneel, cerca de 90% da energia elétrica gerada no país vem dessas usinas. Por estarem longe dos grandes centros de consumo, as usinas geradoras de energia elétrica precisam de um sistema de transmissão, formado basicamente de linhas de transmissão, conforme pode ser visto na figura 8, e subestações elevadoras e abaixadoras. O Brasil tem mais de 100.000km de linha de transmissão com tensão igual ou superior a 230kV [10].



**Figura 8** – Torres de transmissão de nível de tensão 230kV.

Uma linha de transmissão, em seu aspecto construtivo, é formada basicamente de três partes: cabos condutores, isoladores e estruturas. Os cabos condutores são os elementos ativos propriamente ditos, devendo, portanto, possuir qualidades especiais. Como alta condutividade, baixo custo, boa resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência à oxidação. Os metais mais usados para construir cabos condutores são Alumínio e Cobre. O Alumínio é o metal que contém algumas das propriedades anteriormente citadas, portanto é largamente utilizado para construir cabos de linha de transmissão. O cobre também pode ser utilizado, porém limitando-se as linhas de transmissão curta, devido ao seu alto custo em relação ao alumínio. Veja na figura 9 algumas formas de cabo, os quais podem ser tanto de alma de aço com também constituído, apenas, de alumínio [10].



**Figura 9** – Cabo de alumínio utilizado em linha de transmissão.

Os cabos são suportados nas estruturas por meio de isoladores, que, como seu próprio nome indica, os mantém isolado eletricamente da estrutura. Eles devem resistir às

solicitações mecânicas, como forças verticais e horizontais, além de suportar as solicitações de natureza elétrica, como surtos de sobretensão de manobra, de tensão normal e sobretensões. Os isoladores são fabricados empregando-se materiais como a porcelana vitrificada, vidro temperado e borracha. Na figura 10, se encontram dois tipos de isoladores, o mais escuro sendo construído de porcelana e o transparente de vidro temperado.



**Figura 10**– Isoladores de porcelana e vidro.

As estruturas são os elementos de sustentação dos cabos condutores das linhas de transmissão e terão tantos pontos de suspensão quanto forem os cabos condutores e cabos para-raios a serem suportados. As dimensões e formas de uma linha de transmissão dependem de vários fatores: disposição dos condutores, altura de segurança, materiais. Os materiais empregados para a fabricação das estruturas das linhas de transmissão são madeira, concreto e metais. Para cada tipo de material, há formas construtivas diferentes inerentes às suas possibilidades. No Brasil, o material largamente empregado é o metálico, uma vez que a utilização de madeira implicaria vários problemas ambientais. As estruturas de concreto são mais baratas, contudo as dificuldades de transporte, principalmente em terrenos acidentados e de difícil acesso, inviabilizaram o seu uso. Por outro lado, estruturas metálicas apresentam vantagens em seu uso, porque podem ser transportadas em pequenas partes, para depois serem fixadas na faixa de servidão. Isso facilita o transporte e a montagem em terrenos acidentados.

As estruturas metálicas são construídas normalmente de aço-carbono normais de alta resistência, em perfilados ou tubos, podendo ser obtidas as mais variadas formas e dimensões. A aplicação do aço para construir as torres de transmissão mostra-se versátil, pois as peças podem ser construídas em série. Sendo compostas de peças relativamente pequenas e leves, podem ser transportadas com bastante facilidade a qualquer ponto, para sua montagem mesmo em locais de difícil acesso, permitindo construir torres em morros e dentro de rios.

A fim de garantir ao aço das torres de transmissão resistência ao ambiente corrosivo, as peças passam por um processo de galvanização a quente para garantir uma maior durabilidade das estruturas.

O ambiente corrosivo em que as estruturas estão submetidas não é uniforme, já que uma parte da estrutura da linha de transmissão encontra-se enterrada e a maior parte encontra-

se em contato com a atmosfera. As estruturas não estão submetidas a um ambiente corrosivo uniforme, porque elas estão expostas tanto a corrosão causada pela atmosférica quanto pela corrosão causada pelo solo. Sendo, portanto, a corrosão do solo mais agressiva do que a corrosão atmosférica.

As fundações sofrem processo corrosivo devido à agressividade do solo causada pela presença de íons que podem propiciar a formação de gradiente de concentração iônico, fazendo com que as regiões mais ricas se tornem anódinas que por sua vez causam corrosão.

Além disso, há fatores externos que interferem no processo de corrosão, dentre eles, os de maior importância são as correntes de fuga, que podem ser alternada ou contínua. A corrente contínua é gerada devido ao fenômeno de macropilha de corrosão ou pilha de longo alcance. A alternada é decorrente da indução que ocorre nas torres de transmissão. A corrosão por corrente alternada acontece nos estais quando estes forem constituídos de haste concretada. A corrosão por corrente alternada nas hastes é, na maioria das vezes, de forma localizada, o que deixa situação bem agravante, conforme pode ser visto na Figura 11 [21].

Portanto, a corrosão da parte metálica nas torres de transmissão é algo preocupante, porque a redução gradativa da sua seção diminui a resistência mecânica, levando conseqüentemente a risco de ruptura/queda de componentes, que podem resultar no colapso do fornecimento de energia elétrica.

Por tudo isso, torna-se necessário o acompanhamento das estruturas metálicas enterradas, que é atualmente realizado de duas formas: a partir das dispendiosas escavações na base de estrutura a fim de encontrar áreas danificadas; ou por meio de um processo de difícil análise, que tenta correlacionar medições eletroquímicas do solo com possíveis estados degenerativos [21].





**Figura 11**– A corrosão na base das estruturas metálicas [21].

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Equipamentos e materiais

Os equipamentos utilizados para construir o sistema de medição foram um Laser (DWDM) sintonizado no comprimento de onda de 1550nm; um equipamento usado para medir as alterações na intensidade de luz refletida, OSA; e um circulador óptico.

A simulação do ambiente corrosivo se deu pela utilização de dois tipos de ácidos. O ácido clorídrico (HCl) que foi empregado nas concentrações de 38%, 10%, 5% e 0,01% de diluição [22]; e o ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH), o qual o foi usado nas concentrações de 100% e 10% [23].

A fibra óptica do tipo *Standard Single Mode Fiber* (SMF) foi utilizada para construir o elemento sensor. Ela apresenta as seguintes características físicas: diâmetro do núcleo de 9µm, diâmetro da casca de 125µm, e apresentam parâmetro de atenuação de 0.2 dB/km e de dispersão de 17-18 ps/nm.km para o comprimento de onda de 1550nm.

A construção do sensor óptico se deu da seguinte maneira: mediu-se um metro de fibra óptica que, após passar pelo procedimento de limpeza e clivagem, foi colocada em uma base de acrílico a qual foi construída para suportar até vinte fibras; em seguida, a base com fibras ópticas foram levadas para o procedimento de metalização das faces, utilizando-se equipamento de metalização térmica, ou por sputtering, ou de spray metálico. Na figura 12, é possível ver a base de acrílico com uma pequena camada de metal sobre a sua superfície e também sobre as fibras ópticas.



**Figura 12**– Suporte para apoiar até 20 fibras ópticas.

## 3.2. Metalização

Foram utilizados três métodos de metalização: a metalização térmica, iônica (sputtering) e spray de tinta metálica. Dentre esses três, apenas a metalização por spray de tinta metálica não permite controle da espessura do metal. Essa informação é importante, uma vez que se deseja relacionar a espessura depositada na fibra óptica com a intensidade da luz refletida.

### 3.2.1. Metalização por evaporação térmica

A técnica de deposição de filmes metálicos através da evaporação consiste em colocar pequenas amostras do metal a ser evaporado em um cadinho, que depois será inserido entre dois eletrodos. A corrente elétrica, que passará de um eletrodo para outro através do cadinho, irá aquecê-lo por meio do efeito Joule. Em consequência disso, o metal evaporará, gerando uma atmosfera metálica que permitirá a condensação do metal sobre toda a câmara e por consequência, na superfície desejada (ver figura 13).



**Figura 13**– Eletrodos utilizados para realizar a deposição térmica.

O equipamento empregado para realizar as deposições foi a evaporadora térmica da Varian, modelo 3318, do Departamento de Física da UFPE. Esta evaporadora possui três eletrodos, um terra e dois positivos; uma câmara de vácuo onde acontece a deposição; duas bombas para gerar o vácuo, uma mecânica e outra de difusão; um sensor de medição de espessura; um sistema de medição e controle das variáveis utilizadas para controlar a deposição.

As fibras ópticas foram colocadas na parte superior da câmara (ver figura 15) para que ficassem na posição contrária ao fluxo do vapor metálico e possibilitasse uma boa deposição na face de fibra. A medição da espessura do filme fino de metal, na face da fibra

óptica, foi realizada pelo sensor de deposição que mede tanto a taxa de deposição como a espessura depositada (ver figura 15). Para este trabalho a espessura desejada para o filme fino metálico de zinco foi de 100 nm a 200 nm.



**Figura 14** – Local onde foram colocadas as fibras.

### 3.2.2. Metalização por spray metálico

Na deposição por tinta metálica, utilizou-se da tinta de fabricação Quimatec, C.R.Z. galvanização à frio. O zinco, nesse spray, tem grau de pureza de 97%.

O procedimento foi realizado da seguinte maneira: colocaram-se as fibras na base de acrílico dentro de uma capela com as faces voltadas para cima e aplicou-se o spray a uma distância de 20 cm, segundo orientação do rótulo do produto. Após a pintura, esperou-se 24h para secar a tinta completamente, seguindo a orientação do próprio fabricante do produto. Nesse processo não é possível controlar a espessura do metal na face da fibra óptica, pois se trata de um procedimento bastante rudimentar de metalização.

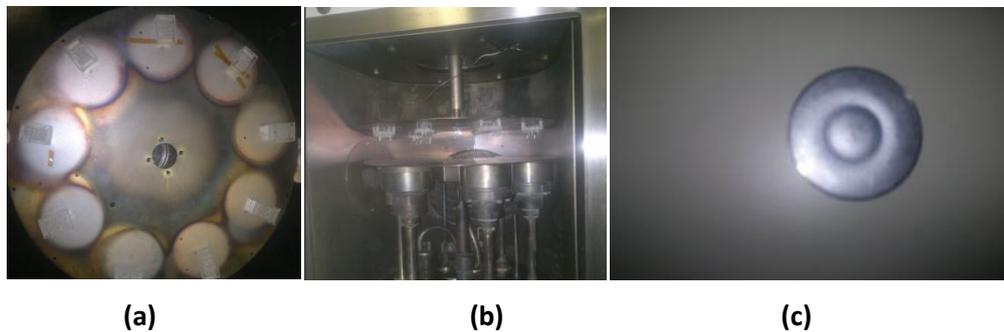
### 3.2.3. *Metalização por sputtering*

O equipamento para realizar a técnica de deposição de filme fino de metal por sputtering pertence ao Departamento de Física da UFPE. É um Balzers-Pfeffer modelo PLS 500, conforme pode ser visto na figura 15. Ele é composto de duas partes principais: A câmara de vácuo e os sistemas de controle do plasma.



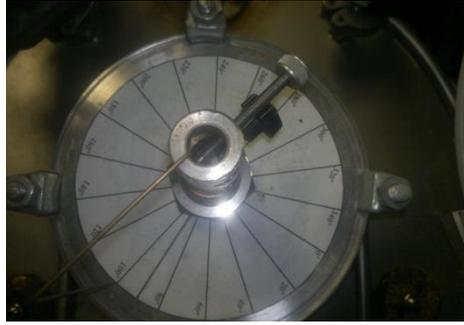
**Figura 15**– Foto do equipamento de sputtering utilizado na deposição.

A câmara de vácuo tem quatro eletrodos, um bloqueador e um suporte em forma de disco onde são colocadas as amostras. Os alvos são colocados nos eletrodos. Como o equipamento possui quatro eletrodos, é possível, portanto, colocar quatro metais diferentes ao mesmo tempo para realizar deposição. O bloqueador que cobre os eletrodos tem a função de selecionar qual eletrodo será usado para a deposição do metal por meio de um furo em sua estrutura. O suporte das amostras fica logo acima do bloqueador dos eletrodos, sendo este o local onde foram posicionadas as fibras ópticas (ver figura 19).



**Figura 16**– Em (a) tem-se o suporte circular onde são colocadas as amostras; em (b) câmara do sputtering, onde pode ser vistos os eletrodos e a posição das fibras dentro da câmara; e em (c) um exemplo do alvo empregado para realizar a deposição.

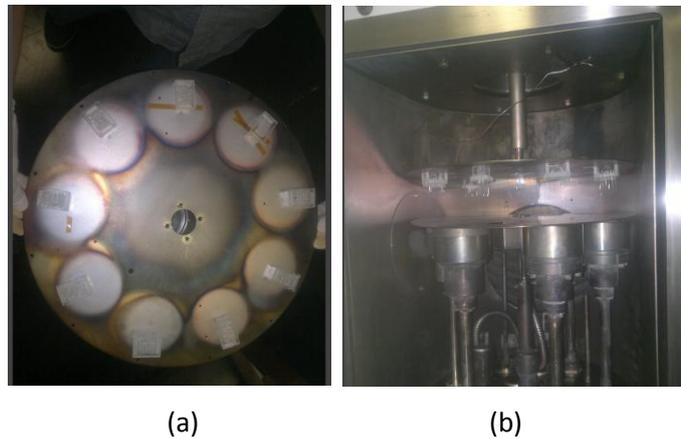
Em cima da câmara de vácuo, existe um círculo graduado em ângulos e uma haste; ao movimentar essa haste pelo círculo graduado, posiciona-se as amostras sobre o eletrodo (ver figura 17).



**Figura 17**– Seletora das amostras.

Para realizar a deposição dos filmes finos metálicos, as fibras ópticas foram colocadas no suporte circular, esse suporte foi colocado dentro do equipamento com as faces das fibras ópticas voltadas para baixo (ver figura 18).

Após o acondicionamento das fibras no interior do equipamento, fechou-se o bloqueador; programou-se o equipamento para gerar o vácuo, que, após se estabilizar nas condições necessárias para deposição; e abriu-se a válvula para que o gás argônio pudesse entrar na câmara. Após alguns segundos, iniciou-se a criação do plasma cujo controle se deu pela administração da corrente elétrica no eletrodo. Os valores da corrente podem ser visto na figura 19.



**Figura 18**– Posição das fibras ópticas no suporte do sputtering (a) e dentro da câmara (b).



**Figura 19**– Equipamento de medição da corrente de formação do plasma.

O que acontece no interior da câmara é que a tensão ioniza os átomos do gás argônio, esses, por sua vez, irão se chocar com os alvos de zinco liberando átomos do metal no ambiente. Ainda devido à tensão aplicada, os átomos dos metais liberados migrarão para a parte superior da câmara onde se encontraram as faces das fibras ópticas, formando, portanto, o filme desejado.

Na figura 20, pode-se ver o disco em que foram colocadas as fibras ópticas, antes da deposição, e após a deposição, pode-se ver que há zinco espalhado pelo suporte e também em cima das fibras.



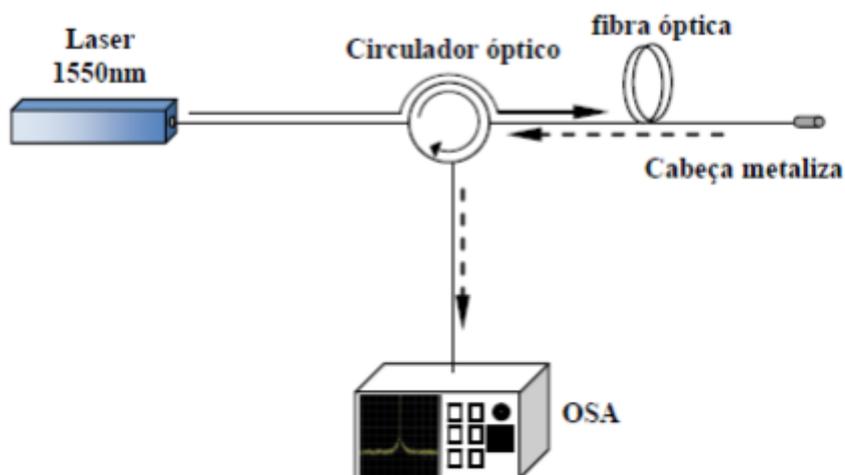
**Figura 20**– Em (a) mostra-se a suporte antes da deposição e em (b) tem-se a suporte após deposição em que pode se visto o zinco espalhado ao redor das amostras.

### 3.3. Montagem experimental

O sistema montado no laboratório tem a finalidade de medir o sinal óptico que retorna após ser refletido pelo metal depositado na face da fibra óptica. Os equipamentos e componentes constituintes desse sistema são: um Laser, monomodo sintonizável, sintonizado em 1550nm, sendo usado como fonte de luz; um elemento de detecção, OSA, que mede o sinal óptico de retorno; um sensor óptico construído que tem como base fibra óptica monomodo padrão (SMF-28); e um circulador óptico.

A montagem experimental consiste em conectar Laser, Osa e o sensor óptico ao circulador óptico conforme figura 21. O funcionamento do sistema acontece da seguinte maneira: o Laser envia um sinal óptico que se propaga até encontrar o circulador, que, por sua vez, o direciona para a face da fibra óptica metalizada; neste local, parte do sinal óptico é transmitida e parte é refletida de volta para o circulador, que o direciona, desta vez, para Osa, que tem a função de medir a quantidade de sinal óptico refletido. Dessa maneira, é possível correlacionar alteração da intensidade da luz refletida com mudança na espessura do metal.

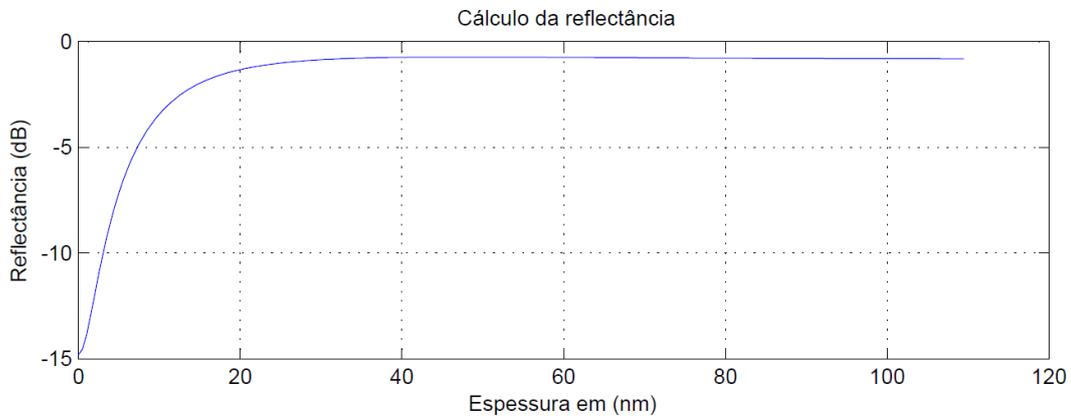
Por fim, foi criado um programa de computador utilizando Labview para controlar a fonte de luz e o equipamento de medição, o que deixou o sistema mais eficiente na execução das medições.



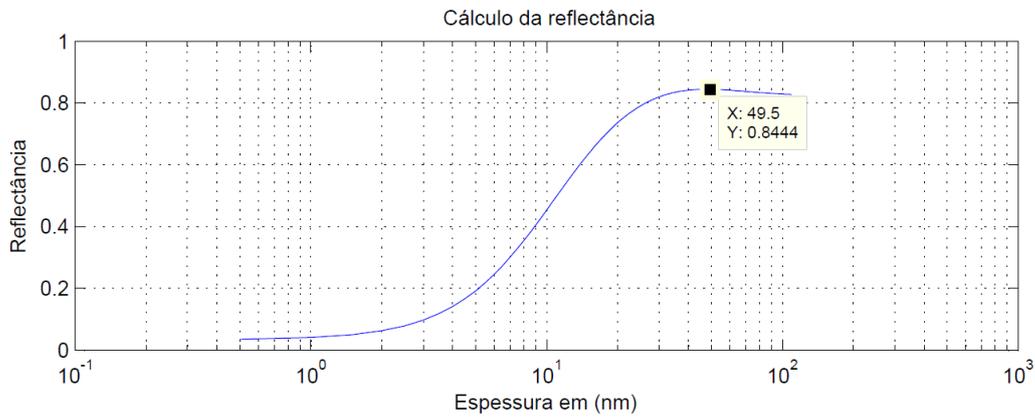
**Figura 21**– Esquema do sensor de corrosão para análise do processo de corrosão [28].

### 3.4. Simulação computacional

A quantidade de zinco a ser depositado na ponta de fibra óptica foi determinada por meio de simulação computacional. O programa foi desenvolvido no Matlab e teve como base matemática as equações de Fresnel. Para realizar a simulação foi considerado que a luz incide sobre o metal em um ângulo de 90 graus, e as variáveis de entrada foram o comprimento de onda da fonte óptica, índice de refração da fibra e do meio ambiente, as constantes ópticas do metal, que para o zinco são  $n=1,47$  e  $k= 6,96$ . Os resultados, para diferentes espessuras do zinco, podem ser vistos na figura 22 a e b.



(a)



(b)

**Figura 22**– Gráfico linear da reflectância (dB) em função da variação da espessura do metal na ponta da fibra óptica quando o meio ambiente é o ar em escala linear (a), gráfico da reflectância em função da variação da espessura do metal na ponta da fibra óptica com a indicação da espessura em escala logarítmica (b).

Conforme visto nas figuras 22 a e b, a espessura do zinco que melhor reflete a luz é, por simulação, maior que 40nm, pois, a partir desse valor, a intensidade da onda refletida decresce, essa constatação pode ser vista no gráfico b de figura 22, lá é possível observar uma queda na intensidade da luz quando a espessura do metal na fibra atinge o valor de 49,5nm. Outra observação, é que a partir de 20nm até 40nm há uma pequena variação na intensidade da luz refletida, algo em torno de 0,5 dB. Portanto, caso o sistema de medição tenha um erro em torno de 1 dB não haverá diferença entre uma deposição de 20 nanômetros e de 40 nanômetros.

Após teste no sistema de medição, constatou-se que o sistema apresentou um erro de medição de aproximadamente um decibel (dB). Logo, a variação em decibéis (dB) para as espessuras entre 20 e 40nm não poderá ser percebida pelo sistema. Portanto, é possível concluir que uma boa espessura de zinco depositado na face da fibra óptica seria algo em torno de 50nm.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Metalização térmica**

Metalizaram-se inicialmente vinte fibras ópticas com zinco, que foram levadas ao laboratório e instaladas uma a uma ao sistema de medição proposto, com finalidade de verificar a intensidade da luz de refletida.

Os resultados obtidos mostraram-se em desacordo com aqueles encontrados na simulação, pois, não existiu mudança na intensidade da luz refletida, sendo igual à intensidade de luz refletida quando a fibra estava sem metal, sugerindo, portanto, que o zinco não se depositou na face da fibra. Para comprovar esse fato, realizou-se mais uma deposição de zinco na ponta das fibras ópticas e os resultados foram semelhantes ao anterior. Por fim, tentou-se depositar, antes do zinco, uma fina camada de níquel na face de fibra a fim de melhor a aderência do zinco, contudo, tal procedimento não apresentou resultados diferentes dos anteriores.

Uma explicação para o zinco não depositar sobre a fibra foi porque ao evaporar o zinco não conseguiu ter uma boa aderência e voltou a se evaporar, deixando a fibra óptica sem metal [24].

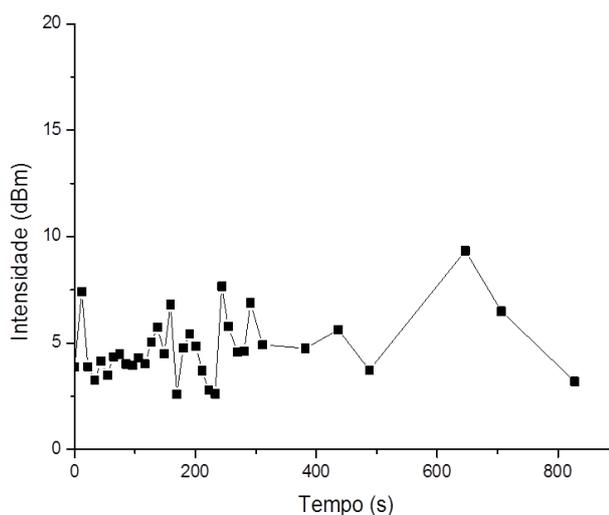
## 4.2. Metalização por Spray metálico

Os testes com a deposição por tinta metálica apresentou mudança da intensidade da luz refletida. Os resultados foram positivos quando o elemento sensor encontrava-se no ar, porque foi possível verificar mudança na intensidade da luz refletida no OSA.

Em seguida, colocou-se o elemento sensor dentro de um recipiente com ácido clorídrico a 37%, fim simular um ambiente corrosivo. No entanto, não houve mudança da intensidade da luz refletida quando a ponta encontrava-se no ácido, mesmo após um longo período de medição (ver figura 23).

A pequena variação na intensidade da luz poderia ser ocasionada por dois motivos: ou o ácido não estava correndo o zinco, hipótese, que foi logo descartada porque era possível observar formação de hidrogênio no ácido; ou havia algo que estava impedindo a luz de ter contato com o metal.

A segunda hipótese mostrou ser verdadeira. A tinta metálica, além de conter uma boa porcentagem de zinco, 99%, contém também uma resina translúcida, que se depositou entre a fibra óptica e o metal. Essa substância acabou impedindo que luz entrasse em contato com o metal e impediu a identificação da corrosão do metal pela variação da intensidade da luz. Tal resina, cuja presença está descrita no rótulo do produto, possui a função de melhorar aderência do zinco metalizado.



**Figura 23** – Intensidade da luz refletida durante o período de corrosão do elemento sensor metalizado.

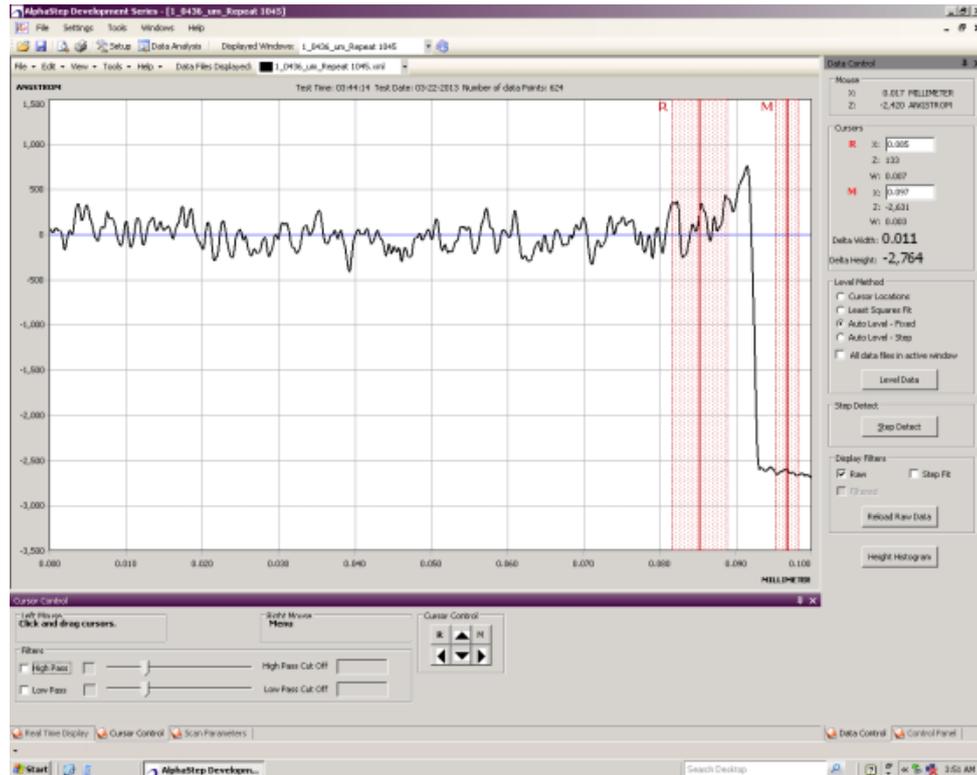
### 4.3. Metalização por sputtering

Antes de iniciar a deposição do zinco sobre as faces da fibra óptica, foi necessário determinar a taxa de deposição desse metal quando a deposição ocorre pela técnica de sputtering. Tal informação é importante, porque, com ela, é possível controlar a deposição do metal.

O procedimento para determinação da taxa de deposição do metal seguiu os seguintes passos: primeiro, desenhou-se uma linha com lápis hidrocor em uma lâmina de vidro de 2x2 cm<sup>2</sup>; em seguida, foram colocadas três peças dentro do equipamento de deposição, a fim de depositar o zinco nos tempos de 5, 10, 15 minutos. Depois da deposição, as peças foram levadas ao equipamento de ultrassom, com a intenção de retirar o metal sobre a linha desenhada, e, com isso, gerar um pequeno desnível entre a parte da peça com metal e a outra sem metal. Após esse processo, as peças foram levadas ao perfilômetro, equipamento que é capaz de medir essa pequena diferença de nível entre os pontos com e sem metal. Com os dados obtidos do equipamento de medição, foi possível estabelecer a taxa de deposição, que relaciona o tempo de deposição com a espessura do metal depositado.

O valor da espessura foi encontrado a partir da média aritmética de três medições de pontos diferentes da placa. Os resultados das medições podem ser vistos na Tabela 1.

A figura 24 demonstra um resultado da medição realizada pelo equipamento. Pode ser visto claramente um desnível que representa a diferença entre um lado com metal e outro sem. O valor da altura desse desnível informa a quantidade de metal depositado na peça durante a deposição. Na figura, observa-se, como resultado da medição, uma espessura de 276nm para o tempo de deposição de 15 minutos.

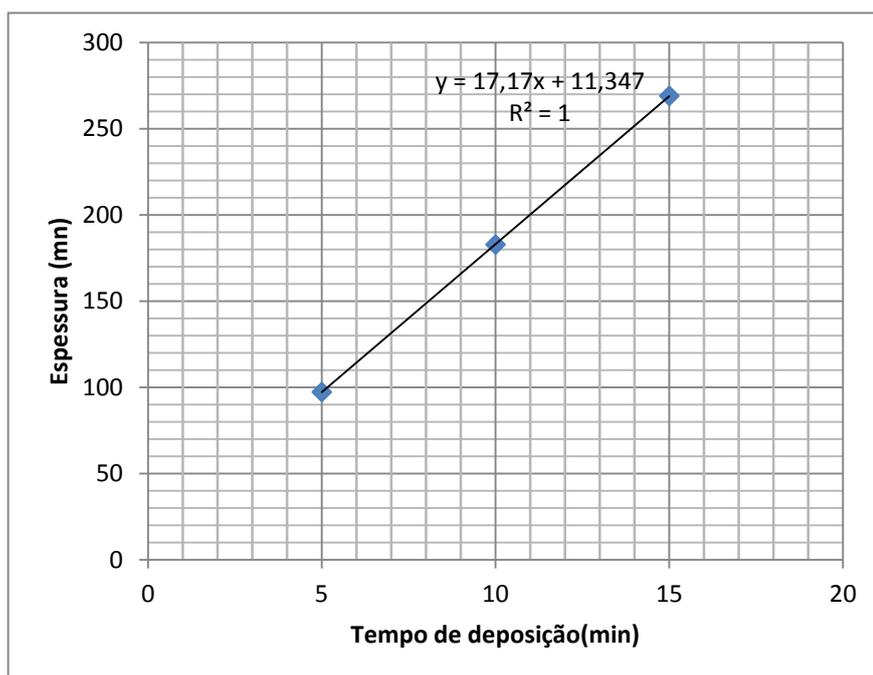


**Figura 24**– Resultado da medição do perfilômetro para o tempo de deposição de 15min.

Tempo de deposição	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Desvio padrão	Taxa de deposição
15 min	276,4 nm	277,5 nm	253,1nm	269nm	13,78 nm	17,93nm/min
10 min	164,2 nm	191,3 nm	193,0nm	182,84nm	16,16 nm	18,2nm/min
5 min	98,7 nm	89,3	103,9	97,3nm	7,4 nm	19,46nm/min
				Média	12,2 nm	18,53 nm/min

**Tabela 1** Resultados das três medições no perfilômetro.

A partir da média dos resultados das medidas, foi construído um gráfico (ver figura 25) do tempo de deposição versus espessura do metal depositado. O gráfico mostra uma forte correlação linear entre as grandezas. Isso pode ser confirmado uma vez que a estatística de correlação linear  $R^2$  apresentou valor de correlação igual a 1 [26].



**Figura 25**– Gráfico mostra uma forte correlação linear entre a espessura e tempo de corrosão, com a indicação da curva de regressão.

Com o conhecimento da taxa de corrosão, depositou-se zinco nas faces da fibra óptica para os tempos de 5, 10 e 15 minutos. As espessuras esperadas eram 97nm, 182nm e 269nm respectivamente.

Os valores depositados são maiores do que aquele encontrado (50nm) na simulação teórica conforme pode ser confirmado na Tabela 1. Essa escolha se deu por não se conhecer a taxa de corrosão do zinco nos ácidos utilizados. Poderia ser que com 50nm de espessura, o metal fosse corroído rapidamente a ponto de não ser observado pelo sistema.

Após a deposição, foi realizado teste de medição da intensidade de luz refletida nas faces das fibras ópticas metalizadas; e os resultados estão mostrados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Fibra	Potência refletida (dBm)
1	-8,15
2	-3,95
3	-5,00
4	-2,35
5	-2,66
6	-3,49
7	-3,50
8	-4,47
9	-2,87
10	-6,64
11	-2,94
12	-3,00
13	-2,10
14	-2,46
15	-12,50
16	-1,63
17	-2,13
18	-1,97
19	-3,12

**Tabela 2** Resultados da potência da luz refletida na fibra óptica metalizada com zinco com tempo deposição de 5min.

Fibra	Potência refletida (dBm)
1	-2,7
2	-3,52
3	-3,30
4	-3,63
5	-3,17
6	-3,29
7	-3,34
8	-3,23
9	-3,73
10	-16,4
11	-5,39
12	-1,27
13	-1,16
14	-1,62
15	-1,46
16	-1,53
17	-2,43
18	-2,18

**Tabela 3** Resultados da potência da luz refletida na fibra óptica metalizada com zinco com tempo deposição de 10min.

Fibra	Potência (dBm)
1	-1,5
2	-1,5
3	-19,3
4	-2,8
5	-2,6
6	-2,2
7	-2,2
8	-35
9	-1,6
10	-2,4
11	-2,6
12	-2,2
13	-2,0
14	-2,0

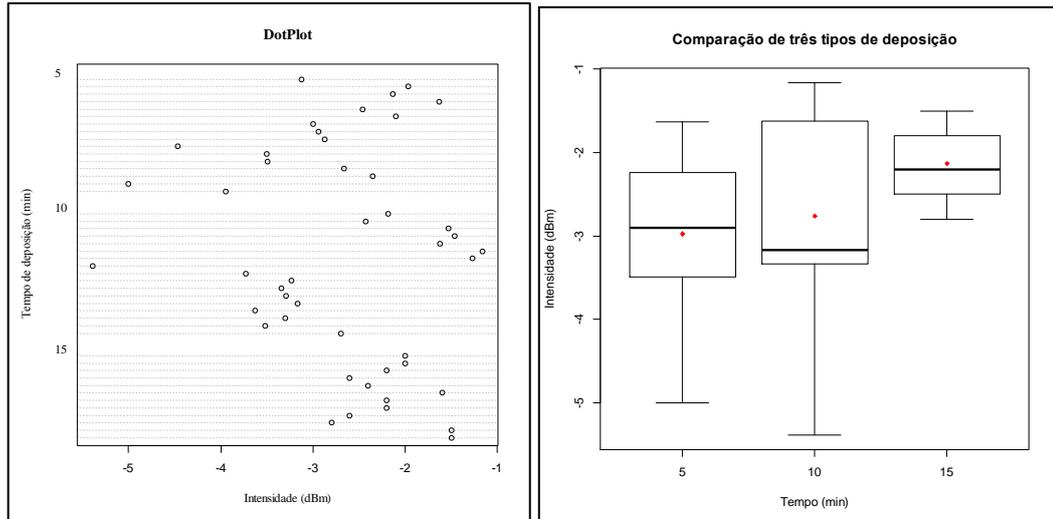
**Tabela 4** Resultados da potência da luz refletida na fibra óptica metalizada com zinco com tempo deposição de 15min.

Após as medições, foi realizada a análise estatística dos resultados, determinando-se a média e o desvio padrão de cada amostra, tendo o cuidado de excluir os valores discrepantes, como -19 dBm e -35 dBm, para nas amostras de 5, 10 e 15 minutos de deposição.

É possível evidenciar, a partir da análise descritiva dos dados observados, que a deposição com 15 minutos é a mais uniforme, característica essa desejada para a construção do sensor. Nas figuras 26 (a) e (b) é possível concluir que o tempo de deposição de 15 minutos apresenta menor variação na intensidade da luz refletida.

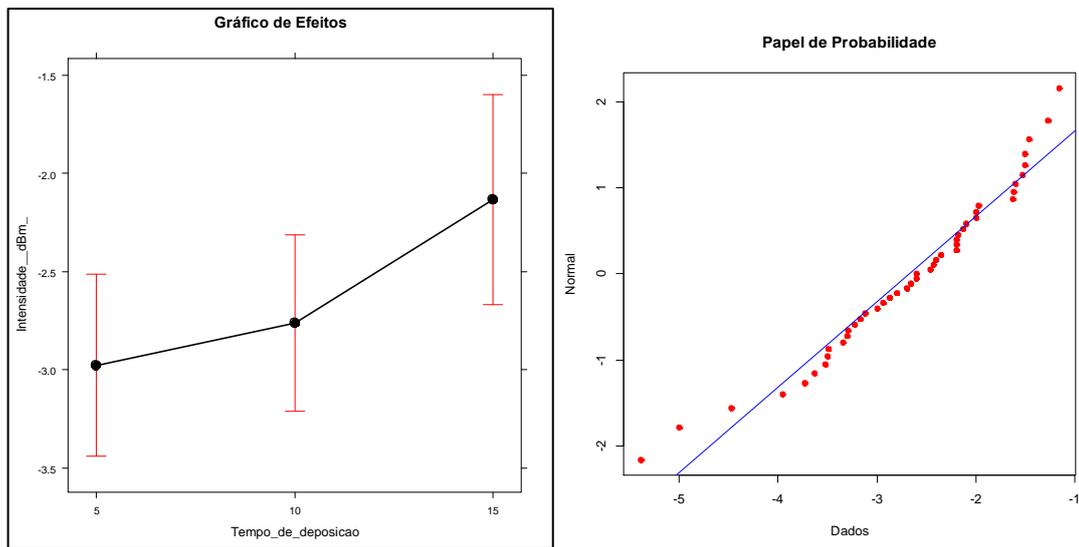
O gráfico da figura 26 (c) mostra que o valor da intensidade da luz refletida aumenta com o aumento de tempo de deposição. Além disso, observa-se que a variabilidade é similar entre os tempos de 5 e 10 minutos.

Por fim, testou-se a hipótese de normalidade dos dados. Após o teste estatístico de normalidade, os dados mostraram seguir a curva normal com nível de significância de 95% (ver figura 26 (d)). Com essa informação, foi possível testar se há diferença estatística significativa entre os tempos de deposição, quando se mede a luz refletida. A estatística inferencial utilizada foi a Anova, análise de variância. O resultado encontrado para a estatística p-valor foi maior que 5%, conclui-se, então, que não há diferença significativa entre os tempos de deposição para o sistema de medição; quer dizer que tanto faz para ele se o tempo é de 5, 10 ou 15 minutos, na média eles são iguais.



(a)

(b)



(c)

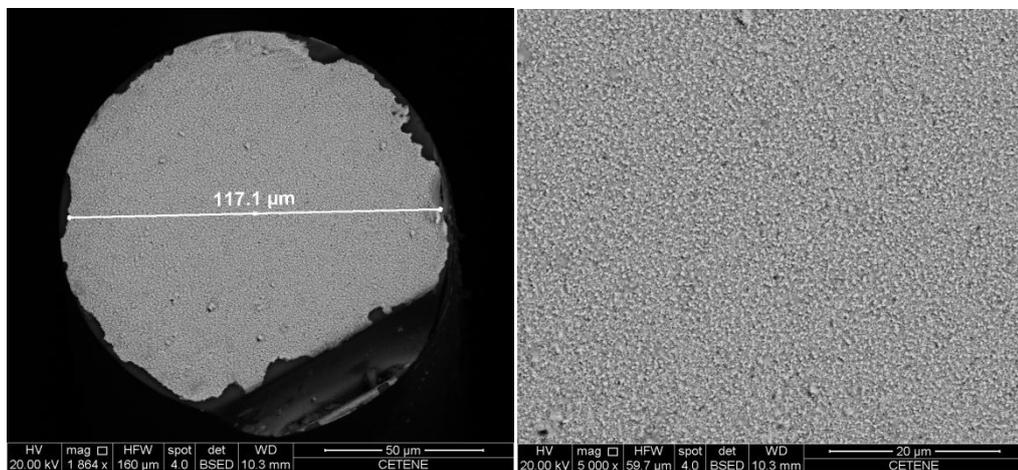
(d)

**Figura 26-** Estatísticas descritivas das intensidades de luz refletida nas amostras para o tempo de deposição de 5, 10 e 15 minutos.

A fim de melhor caracterizar as amostras, realizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV) em algumas amostras de fibra óptica depositada. As imagens do MEV, apresentadas na figura 27, mostram como o zinco se depositou na face da fibra óptica. O metal na face da fibra óptica cobre o núcleo e a casca. É possível observar, nessas imagens, pequenas falhas na deposição e a granularidade do metal, ou seja, a deposição não deixa a superfície lisa, mas rugosa. A rugosidade pode gerar um problema na detecção da corrosão por meio do sensor óptico, porque essa característica do filme pode fazer com que o processo

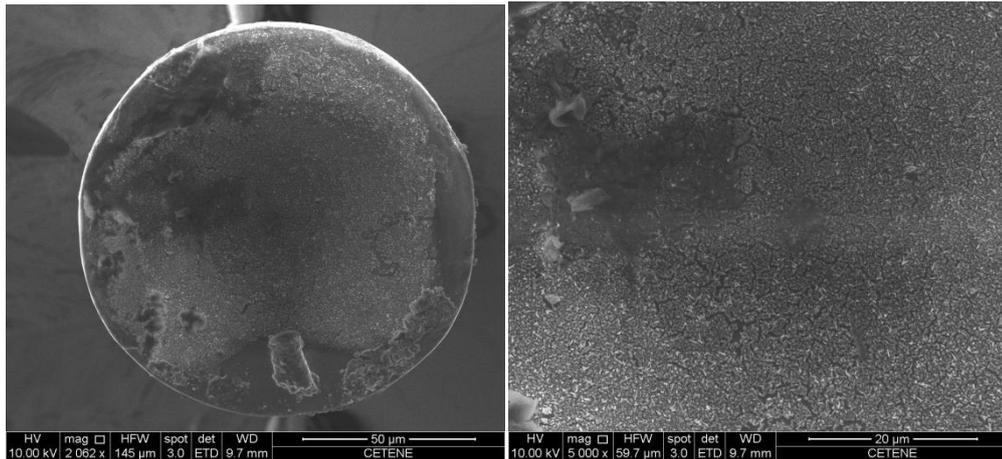
corrosivo aconteça em qualquer parte da fibra, não começando necessariamente perto do núcleo, local em que a corrosão seria mais facilmente detectada pela luz.

Outro ponto importante a ser observado na figura 27 é o aparecimento de furos na superfície. Esses furos podem comprometer a medição da corrosão, pois eles representam pontos de fragilidade na superfície e podem ser facilmente envolvidos pelo meio corrosivo, assim mudando o tempo da observação da corrosão para o mesmo tempo de deposição, apenas porque o furo aconteceu no lugar mais propício de ser observado com a luz, por exemplo, perto do núcleo.



**Figura 27**– Imagens geradas pelo MEV do filme de zinco com espessura média de 97,3nm deposição de 5min na face de fibra.

A figura 28 mostra a face da fibra óptica após passar pelo processo de corrosão. Conforme pode ser visto em J.F. Nascimento (2010), a corrosão não acontece de maneira uniforme, ou seja, não ocorre camada por camada do metal, mas intergranular, ou seja, o ácido provoca falhas na superfície entre os grãos do metal, e dessa forma corrói todo o metal. A figura 28 mostra também que, na superfície da fibra, aparecem locais com e sem metal.

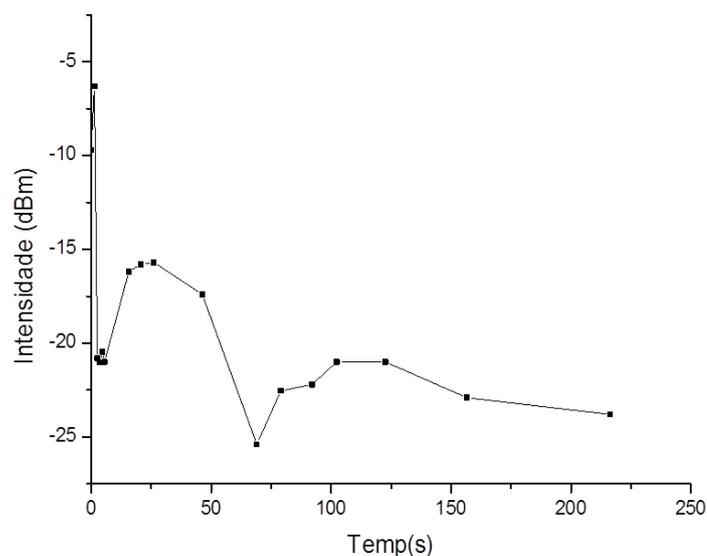


**Figura 28**– Imagens geradas pelo MEV da corrosão do filme de zinco com espessura média de 97,3 nm deposição de 5min na face de fibra.

#### 4.4. Medição da corrosão pelo sistema óptico

O processo de preparação da medição da corrosão era realizado manualmente. A fibra óptica metalizada era colocada dentro do ácido por no máximo um segundo; depois, era retirada do ácido e colocada em um recipiente com água, com a finalidade de parar a corrosão; e, em seguida, a fibra era retirada da água para realizar a medição.

Através deste procedimento, construiu-se o gráfico da figura 29 usando como meio corrosivo o ácido clorídrico na concentração de 0,1% para uma fibra com espessura média de 182,84 nm.

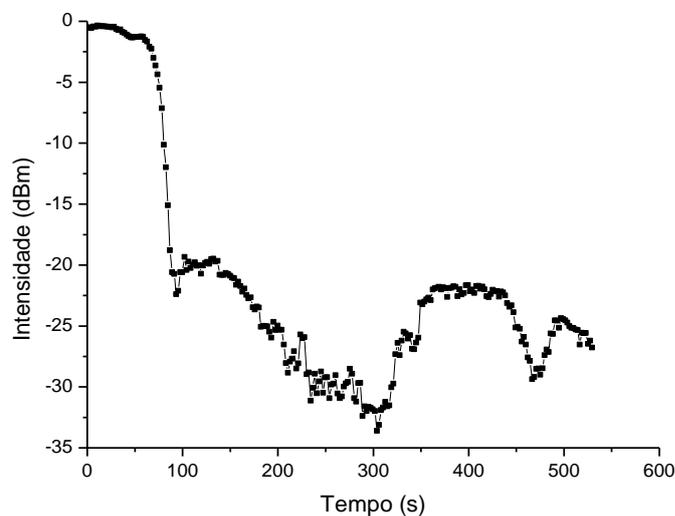


**Figura 29**– Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco em função do tempo de corrosão pelo método manual de medição.

O gráfico apresenta poucos pontos de observação. Mostra que a medição, como estava sendo realizada, perdia bastante informação do processo corrosivo, além do que, não representava uma situação real, pois, em uma aplicação real, o elemento sensor permanece o tempo todo no ambiente corrosivo.

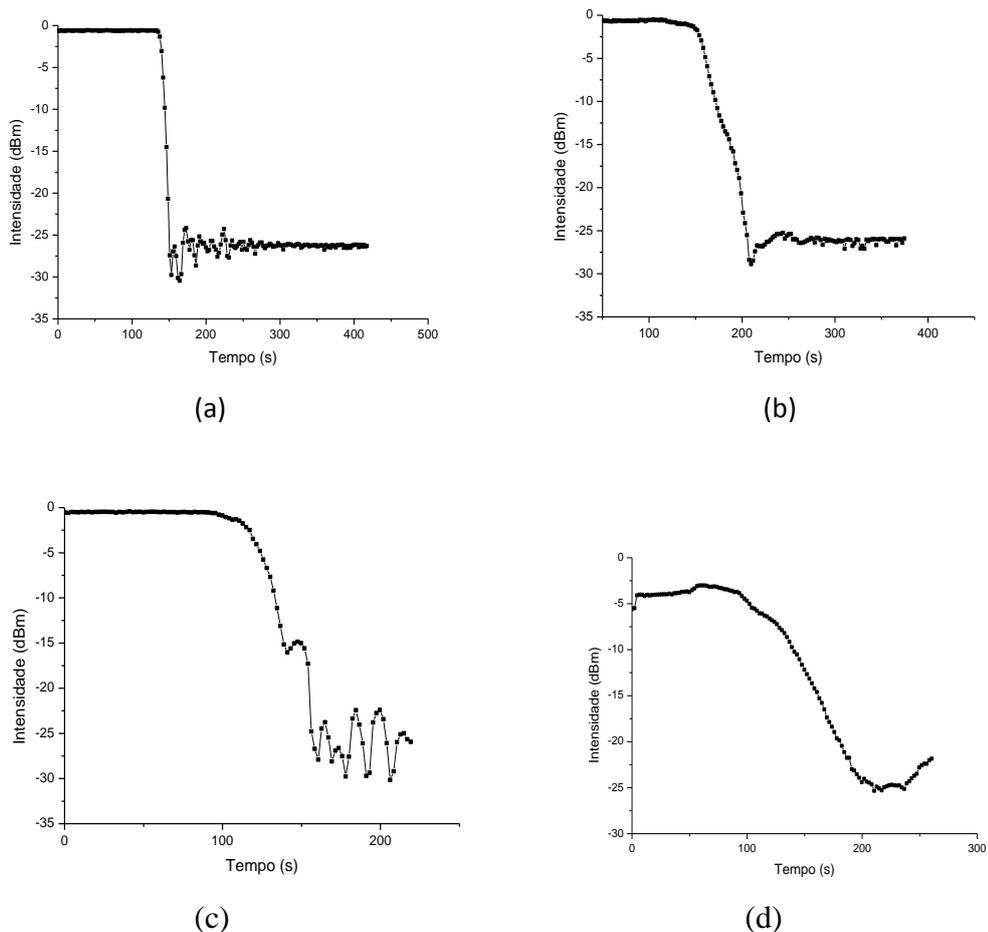
Outro detalhe com relação ao processo de medição mostrado, foi que, mesmo colocando a face metalizada dentro da água, o processo corrosivo não encerrava, ou seja, continuava corroendo, mesmo não estando mais em contato com o ácido. Portanto, foi necessário modificar o procedimento de medição da corrosão, que passou a ser mais próximo de uma situação real, em que a fibra óptica permanece o tempo todo dentro do ambiente corrosivo e a medição processou-se de forma automática.

Automatizou-se o processo de medição a partir da criação de um programa de computador no *LabView*, que controlou o Laser e OSA. Assim, o elemento sensor não precisou ser retirado do meio corrosivo, ficando durante todo o processo imerso no ácido. Isso deixou o experimento no laboratório, mais próximo da realidade. O software realizou medições da corrosão em intervalos de 2 segundos. Os gráficos gerados a partir desse processo podem ser vistos na figura 30, onde se vê um maior número de pontos.



**Figura 30**– Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco em função do tempo de corrosão pelo método automático de medição.

Nota-se na figura 30 que há vários pontos de observação, o que é bom para verificar o comportamento da corrosão, Contudo, não há semelhança entre os gráficos que possa indicar um padrão de medição. Com o propósito de alcançar resultados melhores, foi necessário fazer algumas mudanças: a primeira, foi alterar a concentração do ácido clorídrico (HCl) de 0,1% para 0,01%. Essa modificação, em um primeiro momento, não apresentou resultados satisfatórios, pois os gráficos gerados não apresentaram semelhanças entre si que pudesse ser considerados como um padrão do processo corrosivo. Conforme pode ser visto nas figuras 31, onde se observa quatro gráficos, e cada um com o traçado diferente para o mesmo meio corrosivo.

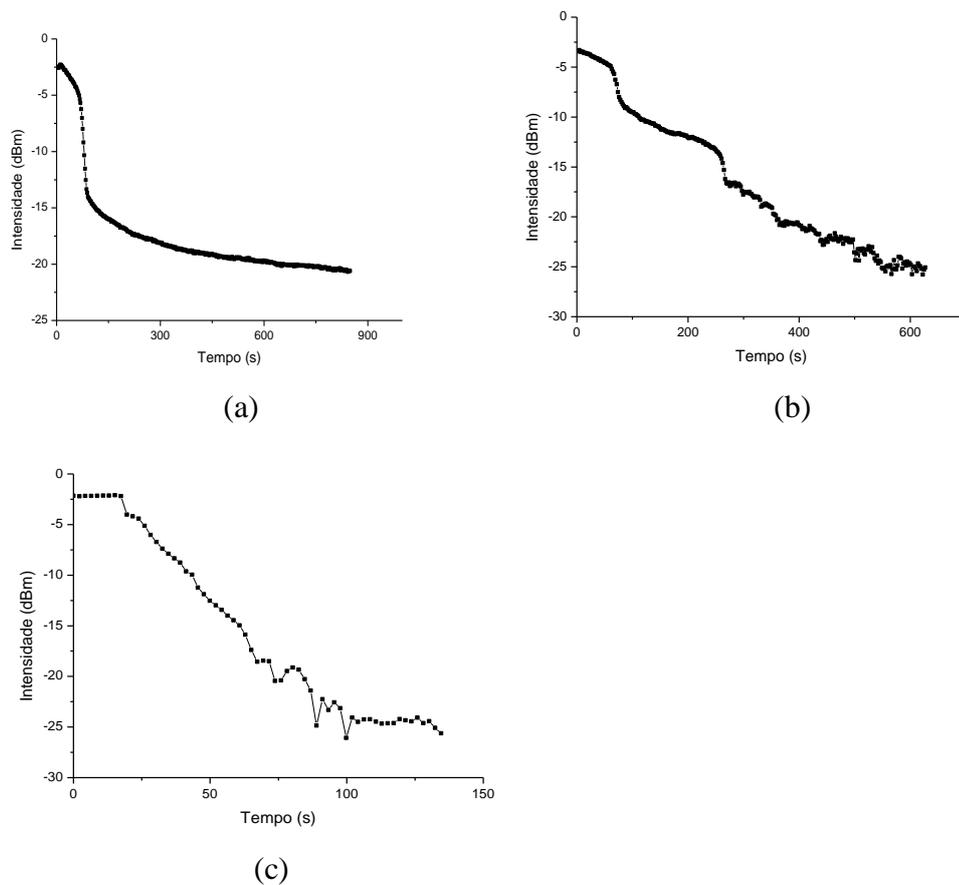


**Figura 31**– Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco em função do tempo de corrosão, após diluição do ácido (a), (b), (c) e (d).

Outro ponto a ser modificado foi o tempo de deposição do metal. Anteriormente, o tempo de deposição foi de 10 minutos. Posteriormente, este tempo foi modificado para 5, 10 e 15 minutos a fim de verificar qual dos tempos de deposição apresentaria melhor resultado.

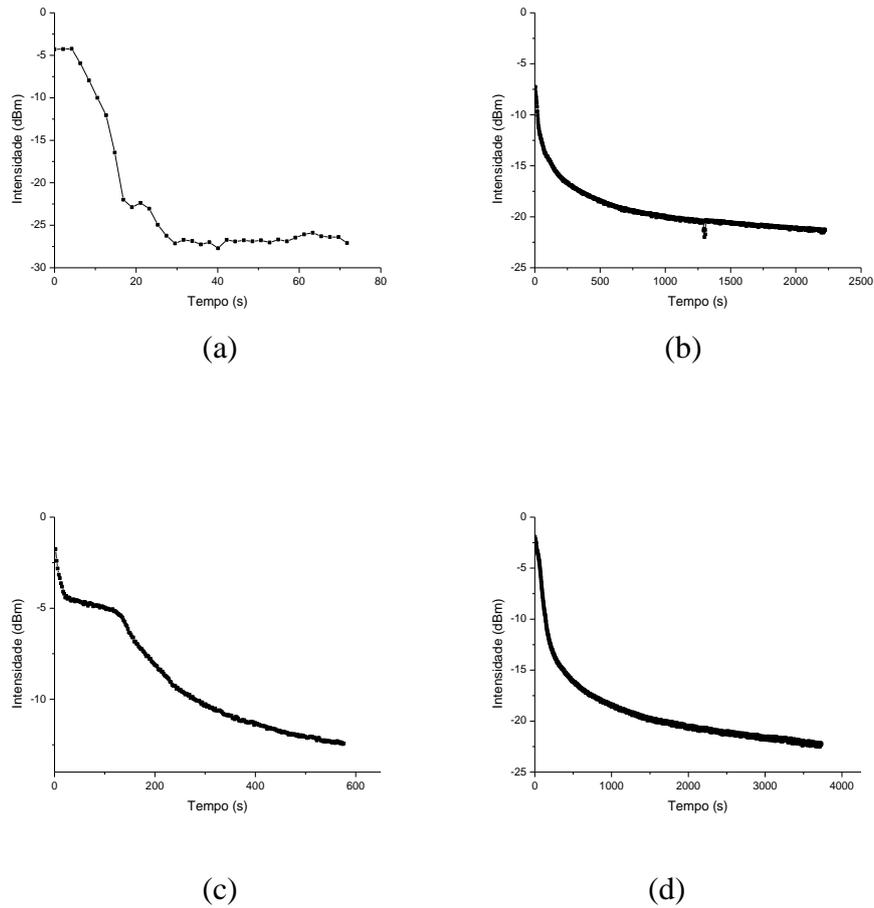
Primeiro, testou-se as fibras com a espessura de zinco depositado de 269nm. As fibras ópticas tiveram uma extremidade fundida com o sistema e a outra extremidade metalizada e foram coladas dentro de um recipiente com o ácido clorídrico na concentração de 0,01%. Os resultados da medição da corrosão podem ser vistos na figura 32, onde é possível ver a dependência da intensidade da luz com o tempo de corrosão.

No entanto, considerando o mesmo tempo de deposição para o mesmo ambiente corrosivo, os gráficos não apresentaram semelhanças entre si, pois, como pode ser visto na figura 32, eles têm tempos de corrosão diferentes.



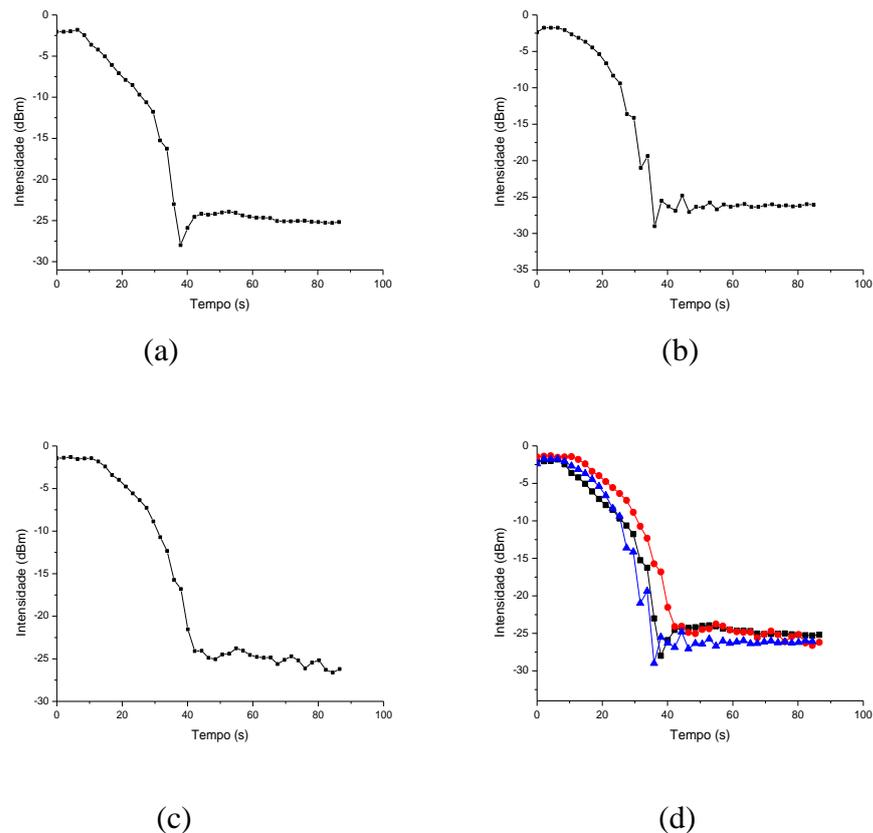
**Figura 32**– Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 269nm de espessura em função do tempo de corrosão para diferentes amostras (a), (b) e (c).

Com o tempo de deposição de 5 minutos, os resultados foram semelhantes aos obtidos na deposição de 15 minutos (ver figura 33). Eles têm tempo de conclusão da corrosão e formas diferentes, não tendo, como no caso anterior, um padrão nas curvas da corrosão que pudesse ser usado como referência.



**Figura 33**– Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 97,3 nm de espessura em função do tempo de corrosão para diferentes amostras (a), (b), (c) e (d).

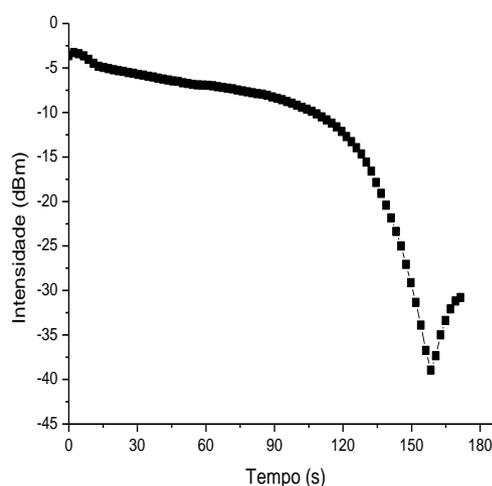
Por fim, foram testadas as fibras ópticas com a espessura de deposição de 182,84nm. Os resultados encontrados demonstram que as curvas são semelhantes entre si, conforme pode ser comprovado nos gráficos da figura 34.



**Figura 34**—Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 10 minutos de deposição em função do tempo de corrosão para diferentes amostras (a), (b) e (c), e em (d) apresenta-se a comparação dos três resultados.

Os resultados, encontrados nos gráficos da figura 34, mostram ser bastante promissores, pois apresentaram tempo de corrosão quase idêntico, e a maneira como a curva se comporta ao longo de tempo é muito semelhante. Sendo, portanto, a espessura do filme depositada na ponta da fibra óptica um norte para a definição de uma das características do sensor; além de definir a melhor concentração do ácido clorídrico, ideal para os experimentos em laboratório.

O ácido clorídrico apresentou bons resultados na corrosão. Contudo, foi encontrado na literatura outro ácido que apresentou boas características na corrosão do zinco, o ácido acético, que é um ácido monocarboxílico, o qual apresenta características de corrosão ativa e uniforme para o zinco no qual a água entra como um fator que contribui para melhorar a corrosão do metal [23]. Logo, colocou-se o sensor óptico, com 182,84 nm de espessura de deposição, dentro do ácido acético e o resultado encontrado é apresentado no gráfico da figura 35.



**Figura 35**– Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 10 minutos de deposição em função do tempo de corrosão.

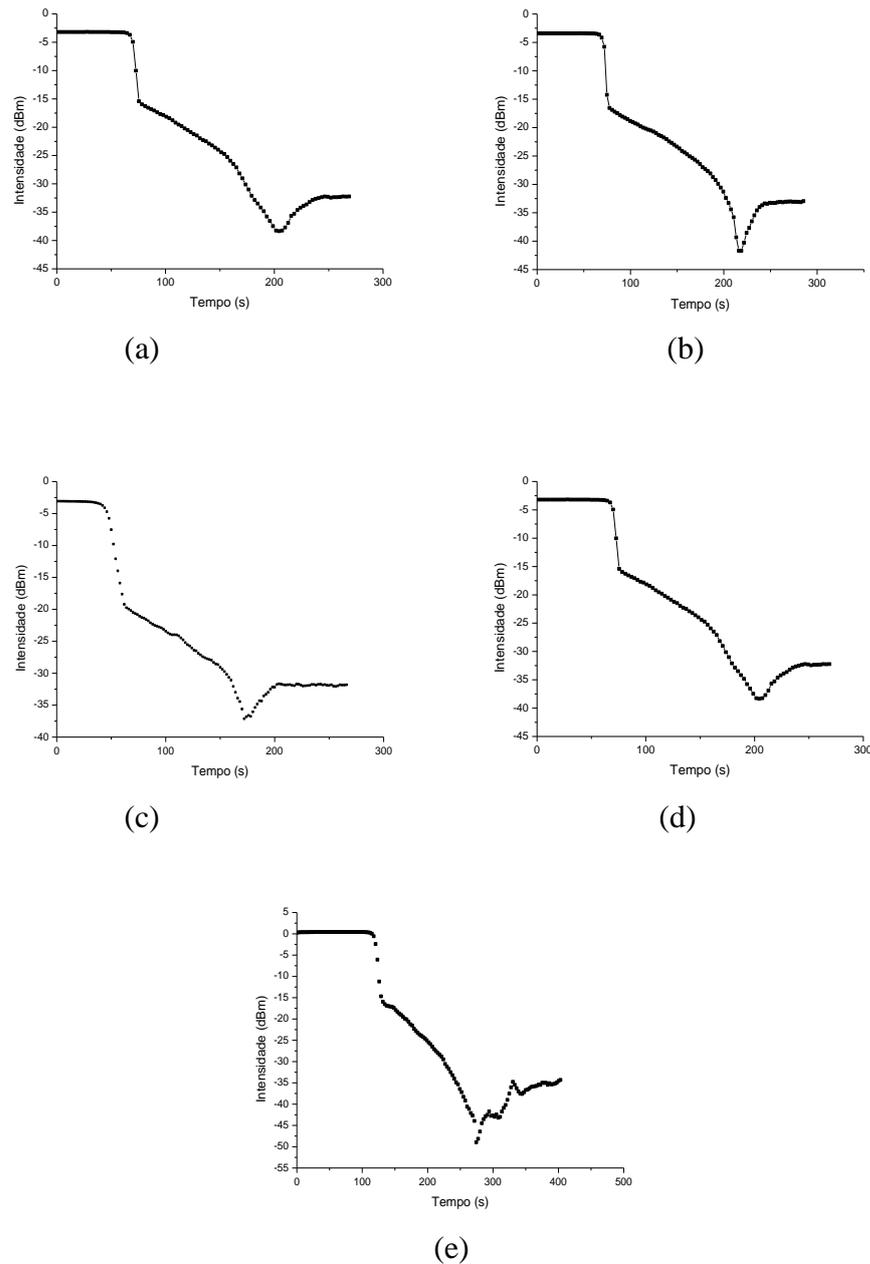
O gráfico da figura 35 mostrou-se muito parecido com aquele encontrado por Martins Filho e colaboradores [8], que utilizou o alumínio como metal. Também apresentou semelhanças com o gráfico da simulação computacional, exceto pelo fato de que na simulação não aparece o vale, porém, na literatura [8], o vale também aparece para o caso do Alumínio.

Por conseguinte, ficou definido que, para o elemento sensor com zinco depositado, o tempo de deposição seria de dez minutos e o ambiente corrosivo seria simulado pelo ácido acético na concentração 100%.

Quando foram realizados novos experimentos, considerando as informações definidas para o tempo de deposição e para o ácido, foram encontrados três conjuntos de curvas de corrosão.

O primeiro conjunto de curvas, conforme pode ser visto na figura 36, apresentou tempo médio de 262 segundos e taxa de corrosão média de 1,43 nm/s. Nessas curvas, aparece,

inicialmente, um período onde não ocorre corrosão e a intensidade de luz refletida permanece constante até que começa decair. Esse período pode ter sido ocasionado pela presença do óxido de zinco, que normalmente se forma espontaneamente e tem a função de apassarivar o metal, deixando-o mais nobre, de modo que o torna mais resistente a corrosão. Portanto, o que se observa nos gráficos é o comportamento da corrosão de dois meios diferentes, o óxido de zinco, mais resistente à corrosão, e o zinco [28].

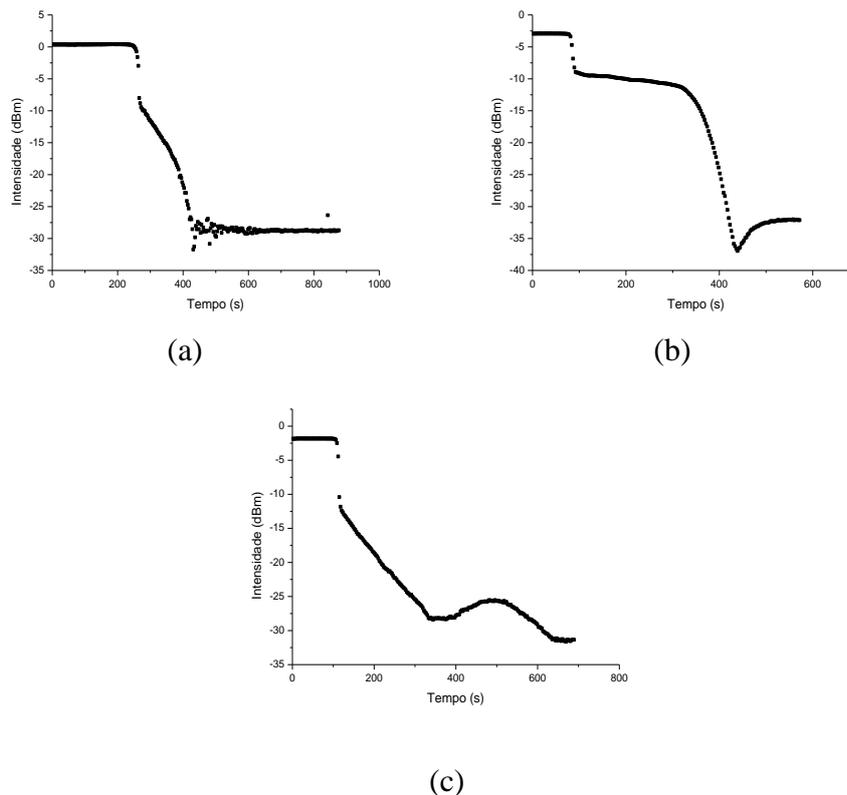


**Figura 36**– Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 18,84 nm de espessura de deposição em função do tempo de corrosão para cinco diferentes amostras (a), (b), (c), (d) e (e).

O segundo grupo de curvas de corrosão também apresentou esse período na intensidade da luz refletida pelo mesmo motivo das curvas anteriores. Contudo, o tempo de corrosão não foi o mesmo (ver figura 37). O tempo médio da corrosão foi maior que o observado nas curvas anteriores, média de 457 segundos e taxa de corrosão média de 0,40 nm/s.

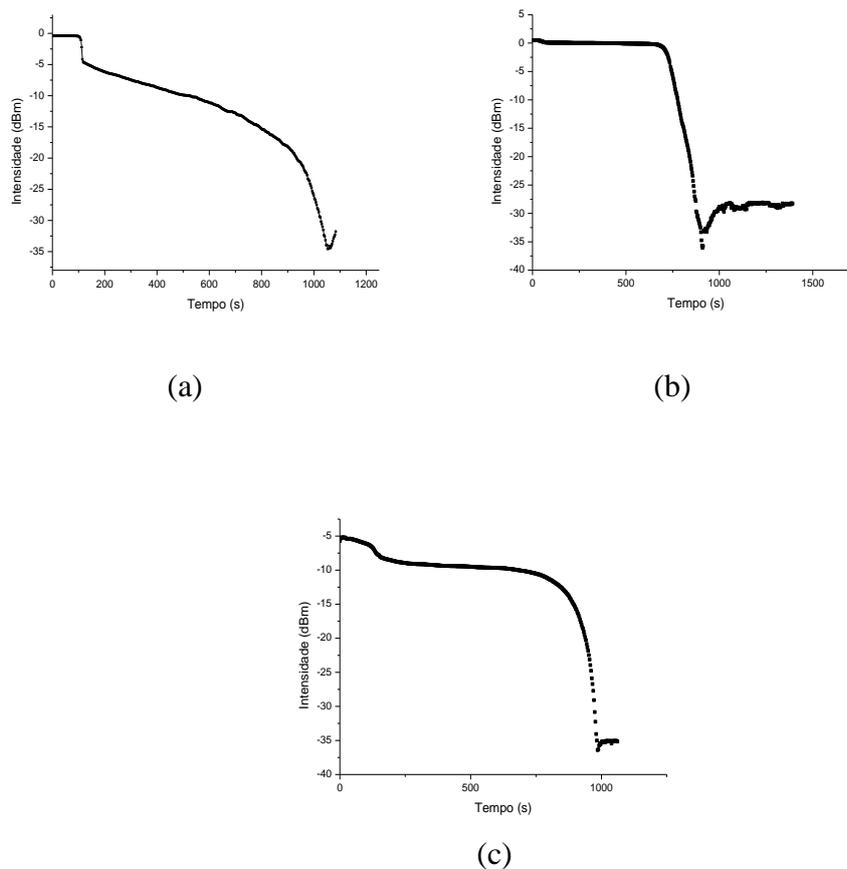
O aumento no tempo de corrosão e, conseqüentemente, a diminuição na taxa de corrosão podem ser explicados pelo fato de a deposição não ser homogênea. Acredita-se que as distâncias entre as fibras ópticas na base de acrílico são suficientemente grandes para causar diferença na deposição, dependendo de como as fibras estão distribuídas.

Outro ponto que deve ser observado é o fato que o tempo de duração do período constante da intensidade também aumentou. Isso pode ser explicado pelo fato de ter mais metal na face da fibra, levando a maior oxidação do metal e gerando uma camada protetora ainda maior.



**Figura 37**– Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 10 minutos de deposição em função do tempo de corrosão para amostras diferentes (a), (b) e (c).

O terceiro grupo de curvas apresentou maior tempo de corrosão. Isso pode ser explicado da mesma maneira que o grupo anterior. Essa mudança na característica da curva pode ser explicada pelo fato das fibras ópticas apresentarem mais metal do que os dois últimos grupos (ver figura 38). Por conseguinte, o período de passivação não foi observado, sendo confundido com o período em que não há mudança na intensidade da luz devido à quantidade de metal na face da fibra óptica.



**Figura 38**– Intensidade da luz refletida na ponta do sensor para filme de zinco com 10 minutos de deposição em função do tempo de corrosão.

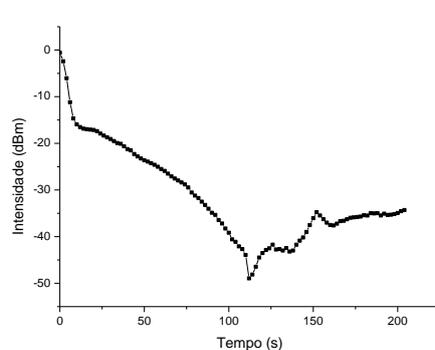
Todas as curvas apresentaram um vale que não está previsto na simulação teórica, contudo, elas estão em conformidade com os dados observados na literatura [5, 8,11], que relata a presença de vales em experiências de corrosão do alumínio em laboratório.

Uma possível explicação para o aparecimento de vales nos experimentos é a ocorrência de plasmon de superfície (ondas eletromagnéticas superficiais provocadas pela corrosão que acontecem na interface entre o metal e a fibra óptica). A razão disso é que a corrosão não acontece de forma uniforme, mas por pite, conforme foi comprovado pelo MEV que foi realizado nas pontas das fibras ópticas após passar pela corrosão [5].

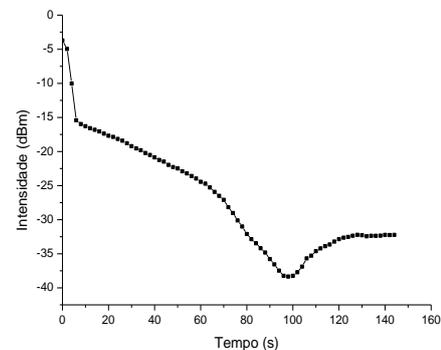
Os pites, que são pequenos furos no metal, podem ser responsáveis pelo surgimento do plasmon de superfície, uma vez que, quando mais de 30% (trinta por cento) da superfície metálica está coberta de furos e a espessura do metal está na ordem de 5nm, ocorre a transmissão total da luz devido ao surgimento das ondas eletromagnéticas superficiais que independente do ângulo de incidência da luz.

#### 4.5. Determinação da taxa de corrosão do zinco no ácido acético

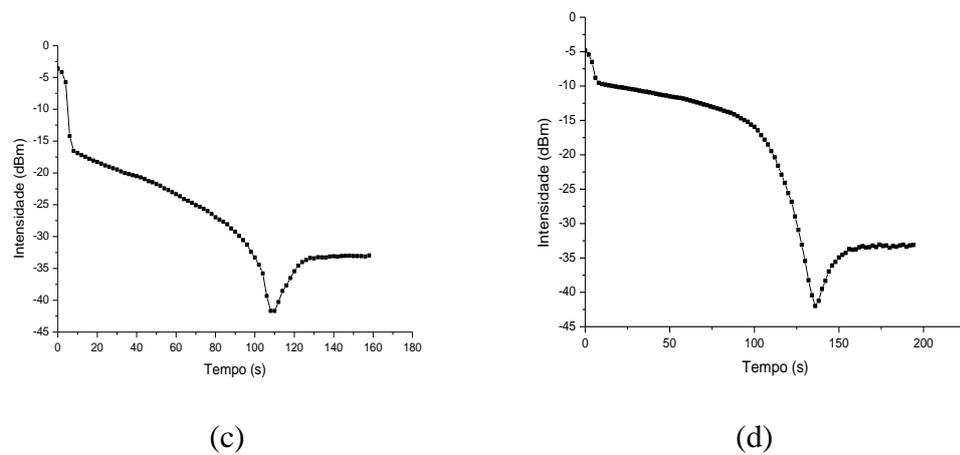
Com as informações da seção anterior, foi possível determinar a taxa de corrosão do zinco para o ácido acético. Para isso, foram realizados os seguintes procedimentos: primeiro, foi definido que o fim da corrosão ocorreria quando a intensidade da luz refletida apresentasse variações menores que 0,2 dBm após passagem pelo vale; segundo, a fim de obter mais amostras de tempo para compor a taxa de corrosão, realizou-se um ajuste nos dados que geraram as curvas da figura 36. Desconsiderou-se o período inicial dos gráficos, que consiste naquele em que a intensidade da luz refletida manteve-se constante, por se entendeu que esse intervalo de tempo foi causado pela oxidação do zinco. A execução dos procedimentos descritos gerou os gráficos da figura 39, os quais são equivalentes entre si, tanto quanto o tempo de início da corrosão, quanto ao fim dela.



(a)



(b)



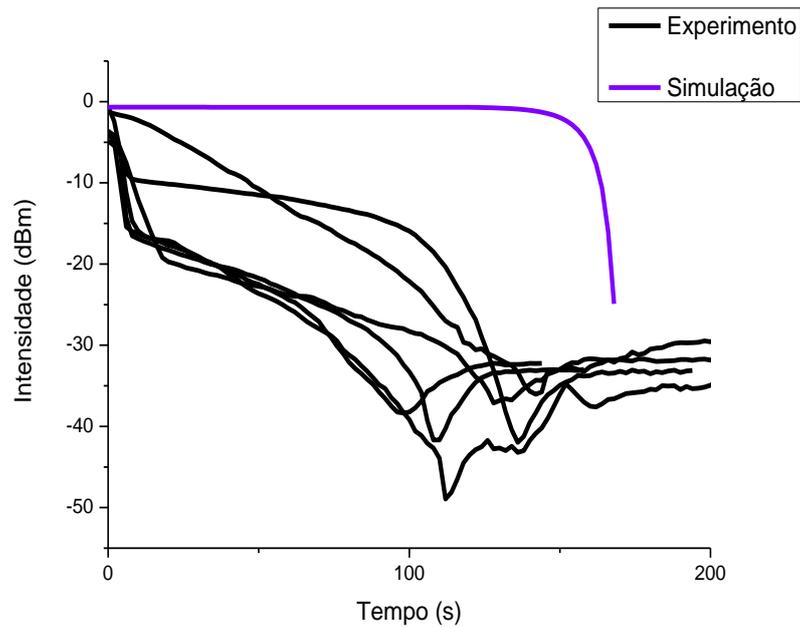
**Figura 39**– Gráficos das figuras 36, após ser retirado o período em que a intensidade da luz foi constante.

Assim, a partir da média dos valores encontrados na Tabela 05 mais a média da deposição, 182,84 nm, que foi retirada da Tabela 1, foi possível determinar a taxa de corrosão do zinco no ácido acético.

Tempo de corrosão (s)	184
	140
	170
	158
	170
	202
	158
Média (s)	168,85
Desvio Padrão (S)	20

**Tabela 5** Tempos de conclusão da corrosão para os gráficos das figuras 43.

O valor encontrado para a taxa de corrosão do zinco no ácido acético foi de 1,08 nm/s. Esse resultado é importante, porque, com isso, pode-se reajustar o modelo computacional, que, antes, era obtido pela refletância em função da quantidade de metal retirado na face da fibra óptica. Agora, passou ser em função do tempo (ver figura 40). Dessa forma, torna-se possível realizar comparações entre os gráficos gerados experimentalmente e os gerados por simulação.



**Figura 40**– Intensidade da luz refletida versus tempo de corrosão, comparação entre as curvas experimental e simulada.

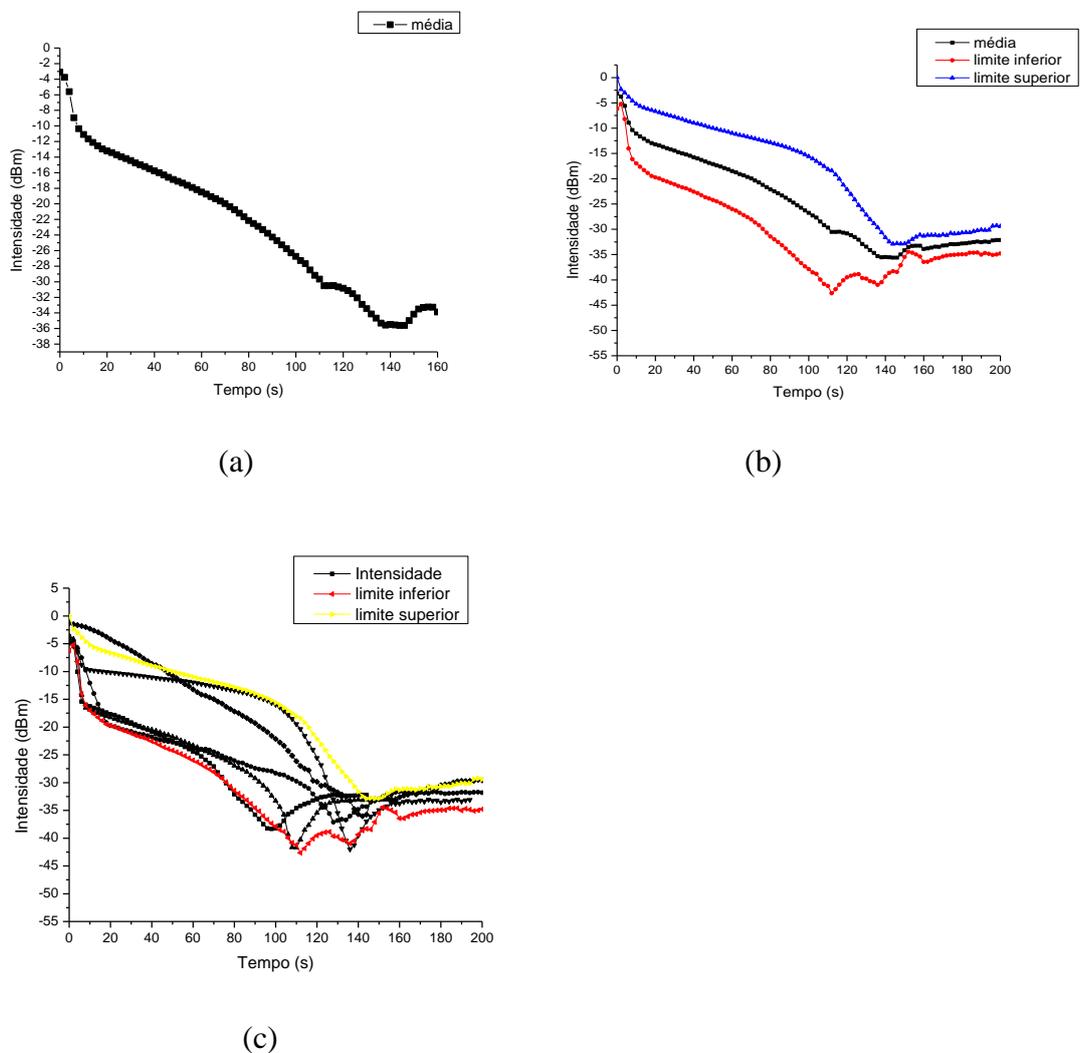
Há claramente diferenças entre os gráficos. O vale que aparece no experimento não é previsto na simulação. Uma explicação é que, na simulação, a corrosão foi considerada uniforme, nela não foi prevista a corrosão por pite, ou seja, com rugosidade.

Um ponto de dessemelhança é o comportamento da curva ao longo do tempo de corrosão. Na simulação, vê-se que a curva é constante até o tempo de 150s, a partir desse tempo começa a decair rapidamente nos segundos finais, algo que não é visto pela curva experimental, pois elas já começam a decair nos primeiros minutos da corrosão. Contudo, pode-se observar que a intensidade da luz refletida e o tempo total da corrosão são praticamente equivalentes entres os dois tipos de gráficos.

## 4.6. Modelo estatístico

Com a finalidade de construir um modelo estatístico para curvas de corrosão, foi calculada a média aritmética das curvas do experimento e gerada a curva (a) da figura 41. A curva (b) da figura 41 tem a finalidade de limitar as curvas que serão aceitas como tendo o tempo de corrosão de 1,08 nm/s para ácido acético. Elas foram construídas a partir da adição e subtração de dois desvios padrões da média, assim criando o limite inferior e superior com nível de significância de 95%.

A curva (c) mostra que as curvas experimentais estão dentro desse intervalo de confiança, permitindo, assim, concluir que, mesmo com os diferentes comportamentos das curvas, elas representam a taxa de corrosão encontrada.



**Figura 41-** Intensidade média da luz refletida em (a), limites superior e inferior para a intensidade da luz refletida para corrosão em ácido acético (b), verificação das curvas geradas experimentalmente com os limites superior e inferior (c).

## 5. CONCLUSÕES

Essa dissertação mostrou um estudo e análise do elemento sensor óptico integrante do sistema de medição proposto por Martins-Filho e colaboradores.

Esse elemento sensor é constituído de uma fibra óptica padrão, a mesma usada no sistema de telecomunicação; com um metro de comprimento, uma das extremidades clivada e com zinco depositado. A deposição do metal foi realizada de três maneiras diferentes: por deposição térmica, spray metalizado e sputtering.

Conforme resultados, a deposição térmica mostrou-se inadequada para metalização do zinco na fibra óptica, uma vez que as fibras metalizadas não apresentaram intensidade de luz refletida após o processo de metalização, sugerindo então que não havia metal na face da fibra.

A deposição por spray metalizada também não apresentou resultados satisfatórios, pois, mesmo apresentando a intensidade da luz refletida, essa luz não variou com a modificação da espessura do zinco. Isso ocorreu devido a uma pequena resina que se deposita entre a fibra e o zinco, impossibilitando a percepção da variação da espessura do metal pela variação da intensidade da luz.

A deposição por sputtering mostrou melhores resultados, pois, quando as fibras ópticas metalizadas foram colocadas no sistema de medição, foi possível acompanhar a variação da intensidade da luz a partir da mudança na espessura do zinco na ponta da fibra óptica.

Contudo, ao que parece, esse procedimento de deposição não gerou uma deposição homogênea, pois, para o conjunto de fibra que foram depositadas ao mesmo tempo, há variações na intensidade de luz refletida, revelando assim uma heterogeneidade na deposição.

A simulação do ambiente corrosivo foi realizada por dois tipos de ácido: ácido clorídrico e ácido acético. O ácido clorídrico mostrou-se mais adequado na concentração de 0,001% a 0,01%. Já o ácido acético, na concentração de 100%, mostrou resultados melhores do que aqueles encontrados quando o ácido utilizado foi o clorídrico, porque, para esse ácido, foi possível encontrar curvas do processo de corrosão semelhantes, dando a entender que esse seja o padrão da curva de corrosão para zinco no ácido acético, fato que não aconteceu com o ácido clorídrico.

Os resultados da medição da corrosão das faces metalizadas apresentaram semelhanças com o resultado teórico, diferenciando mais acentuadamente no final da corrosão

em que se apresentou um vale, porém esse vale também foi encontrado em trabalhos publicados anteriormente com o alumínio; portanto pode-se de dizer que, o elemento sensor em questão, pode, ainda que qualitativamente, indicar a corrosão do zinco em ambiente corrosivo.

## **6. PERSPECTIVAS**

Como perspectivas, podem se citadas as seguintes melhorias: melhorar o suporte onde foram colocadas as fibras ópticas a fim de deixar a deposição mais homogênea; realizar medição com ferro e zinco depositado na face da fibra, com a finalidade de caracterizar o processo de proteção do zinco quando está em contato com outro metal; desenvolver uma simulação computacional que leve em consideração à rugosidade da superfície, para poder entender melhor a ocorrência do vale na luz refletida.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. GENTIL, *Corrosão*, 6. Local, Ed. LTC, 2011.
- [2] P. L. NUNES, *Fundamentos de resistência à corrosão*, 3. Local, Ed. Interciência, 2008.
- [3] M. C. H. JAMBO, *Corrosão: fundamentos, monitoração e controle*, 3. Ed. Ciência Moderna, 2008.
- [4] B. LEE, Review of the present status of optical fiber sensors, *Optical Fiber Technology*, v. 8, p. 57–99, 2003.
- [5] J. F. NASCIMENTO, J. GUIMARAES, E. CIPRIANO, M. J. SILVA, J. F. MARTINS-FILHO, *Characterization of an amplified OTDR fiber-optic multipoint sensor system*, In Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), SBMO/IEEE MTT-S International. Natal – RN, 2011 p. 627 - 631.
- [6] C. LEE, *Fiber optic Corrosion Sensor*, in SensorTran, Austin, 2006.
- [7] G. QIAO, J. ZHOU, J. OU, Thin fe-c alloy solid film based fiber optic corrosion sensor, In: *Proc. of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2006, p. 541–544
- [8] J. F. MARTINS-FILHO, E. FONTANA, J. GUIMARÃES, D. F. PIZZATO, I. J. COELHO, *Fiber-optic-based corrosion sensor using otdr*, In: IEEE sensors conference, 2007, p.1172–1174.
- [9] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil), *Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de EnergiaElétrica*. – Brasília: ANEEL, 2002.
- [10] R. D. FUCHS, *Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas, teoria das linhas em regime permanente*, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; Itajubá, Escola Federal de Engenharia, 1997.
- [11] J. F. MARTINS-FILHO, E. FONTANA, *Optical fibre sensor system for multipoint corrosion detection*, 1a ed. In-Tech: Vienna, 2009, cap. Optical Fibre, New Developments, p. 35–44.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Corrosão atmosférica-Classificação da corrosividade de atmosferas*, NBR 14643. Rio de Janeiro, 2001.
- [13] B. CULSHAW, A. KERSEY, *Fiber-optic sensing: A historical perspective*, *Lightwave Technology*, v. 26, p. 1064–1078, 2008
- [14] C.A.J. GOUVEIA, *Sensor em fibra óptica para monitorização ambiental*, Dissertação, Universidade da Madeira, 2008.
- [15] S. YIN, P. B. RUFFIN, F. T. S. YU, *Fiber optic sensors*, 2, Ed. CRC press, 2008.
- [16] P G. VENÂNCIO, R.A. COTTIS , R. NARAYANASWAMY, J. C. S. FERNANDES, *Sensores de corrosão para Aeronaves*, *Corrosão Proteção Mater*, Vol. 28, 2009.
- [17] S. GHETIA, R. GAJJAR, P. TRIVEDI, *Classification Of Fiber Optical Sensors*, *International Journal of Electronics Communication and Computer Technology*, Vol. 3, 2013.

- [18] R. C. PAZIM, *Caracterização Óptica de Filmes Finos*, Dissertação, Universidade de Federal de Mato Grosso, Instituto de física, 2011.
- [19] E. FONTANA, R. H. PANTELL, *Characterization of multilayer rough surfaces by use of surface-plasmon spectroscopy*, Phys. Rev. B, vol. 37, n. 7, p. 3164-3182, 1988.
- [20] O.S. HEAVENS, *Optical Properties of Thin Films*, IOPScience, Prog Phys. 1960.
- [21] J. F.A. G. WAVRIK, J.M. SILVA, *Corrosão em Estais Devido a Circulação de correntes de Desequilíbrios em Linha de Transmissão, ABENDE, ABRACO e IBP, 2009.*
- [22] K. ORUBITE-OKOROSAYE, N.C. OFORKA, *Corrosion Inhibition of Zinc on HCl using Nypa Fruticans Wurmb Extract and 1,5 Dipheneyl Carbazone*, J. Appl. Sci. Environ, vol. 8, p. 57-61, 2004.
- [23] S. T. G. AMARAL, *Corrosão de Vários Materiais Metálicos em Álcool Etílico Hidratado Combustível e sua Inibição a 25°C*, Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 3-8, 1984.
- [24] GRUPO DE DISCUSSÃO NO LINKEDIN, *Thin film fórum*, Disponível em <http://www.linkedin.com/groupItem?view=&gid=2916707&type=mem>. Acesso em: 31 Jul. 2012 às 08h e 04 min.
- [25] M.T. C, M. BORGES, *Determinação de propriedades radiativas espectrais de vidro e películas Finos*, Dissertação, Universidade de Federal Santa Catarina, Engenharia Mecânica; 2004.
- [26] A. P. SILVA, M. C. C. ALVES, *Como Iniciar a validação de métodos analíticos*, Enqulab, 2006
- [27] J. F. NASCIMENTO, J. GUIMARAES, C. E. S. MARCIEL, D. L. FONTANA, I. J. S. COELHO, E. FONTANA, J. F. MARTINS-FILHO, *Influência da Rugosidade na Resposta de Sensores de Corrosão à Base de Fibra Óptica*. In: MOMAG 2010. Vilha Velha - ES..
- [28] E. A. SILVA-JR, A. P. C. CRUZ, J. F. MARTINS-FILHO, J. F. *Sensor de Corrosão Utilizando Dupla Camada Metálica em Fibra óptica*. In: MOMAG 2014. Curitiba - PR.