

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS – CCT  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DIEGO PEREIRA SILVA**

**ANÁLISE E DIAGNOSE DA CORROSÃO NAS ESTRUTURAS METÁLICAS DAS  
TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES**

**SÃO LUÍS – MA**

**2017**

**DIEGO PEREIRA SILVA**

**ANÁLISE E DIAGNOSE DA CORROSÃO NAS ESTRUTURAS METÁLICAS DAS  
TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Francismar Rodrigues de Sousa

**SÃO LUÍS – MA**

**2017**

Silva, Diego Pereira.

Análise e diagnose da corrosão nas estruturas metálicas das torres de telecomunicações. / Diego Pereira Silva. – São Luís, 2017.

53 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Me. Francismar Rodrigues de Sousa.

1. Torres de telecomunicações. 2. Corrosão. 3. Proteção anticorrosiva. I.  
Título.

CDU 621:693.8

**DIEGO PEREIRA SILVA**

**ANÁLISE E DIAGNOSE DA CORROSÃO NAS ESTRUTURAS METÁLICAS DAS  
TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES**

Aprovada em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2017

---

Prof. MSc. Francismar Rodrigues de Sousa.  
(Orientador)

---

Prof. MSc. Paulino Cutrim Martins.  
(Membro da Banca Examinadora)

---

Prof. Thiago Aguiar Santos.  
(Membro da Banca Examinadora)

Aos familiares, em especial a meus pais que sempre me apoiaram na busca da realização dos meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me proporcionado saúde, motivação, sabedoria, determinação e superação para vencer todos os obstáculos surgidos ao decorrer do projeto.

Agradeço aos meus pais, Dorismar da Silva Pereira e Dourival da Luz Silva, por sempre me guiarem para o caminho do conhecimento, através de incentivos, cobranças, carinho e conselhos, na qual se não fossem por eles não estaria concluindo essa etapa tão marcante na minha vida.

Agradeço também ao meu professor e orientador Mestre Francismar Rodrigues de Sousa pela disponibilidade, incentivo, conhecimentos transmitidos e também por está presente em todas as etapas de execução do projeto.

Um agradecimento também a toda minha família e amigos, em que torcem pelo meu sucesso e ajudaram em todos os sentidos ao decorrer da minha formação.

Um agradecimento especial para meu amigo André Felipe, pelos momentos de alegrias e de preocupações que passamos juntos para elaboração deste projeto e principalmente ao longo do curso.

Agradeço a empresa Poçostec-MA, na qual fiz grandes amizades e também obtive ajudas como ideias, materiais e conhecimento na área de engenharia.

Um agradecimento ao professor Thiago Aguiar Santos que nos auxiliou na execução dos ensaios laboratoriais, nos ajudando diretamente na obtenção dos métodos e resultados. E também ao professor Doutor da Universidade Federal do Maranhão, José Roberto Pereira Rodrigues que contribuiu com ideias para elaboração do projeto.

Agradeço também a Universidade Estadual do Maranhão por ter me dado esta oportunidade de ensino. Também ao Instituto Federal do Maranhão por ter cedido seu laboratório para realização dos experimentos.

*“Todo mundo é um gênio. Mas, se você julgar um peixe por sua capacidade de subir em uma árvore, ela vai gastar toda a sua vida acreditando que ele é estúpido.”*

Albert Einstein

## RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de estudar a influência da corrosão nas torres de telecomunicações, analisando os meios corrosivos que influenciam na deterioração do material, também analisando a geometria das peças que compõem a estrutura e verificando o comportamento da corrosão em relação ao material que é fabricado. Desta forma, no princípio foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre o tema. Em seguida foi feita inspeções visuais para observar o estado da estrutura e também apontar locais que são facilitadores da corrosão. Logo após a visita foi realizado ensaio de campo para simular a influência real dos meios corrosivos em que as torres de telecomunicações estão sujeitas. E também foi feito ensaio de laboratório, em que o corpo de prova foi submetido a uma solução salina para assim verificar a perda de massa do material. Com a obtenção dos resultados foi possível perceber que as torres de telecomunicações estão sujeitas a ação degradante da corrosão, desse modo é necessário à aplicação de um sistema de proteção anticorrosiva adequada para inibir a propagação do produto de corrosão nas estruturas em geral.

*Palavras Chave:* Torres de telecomunicações, corrosão, proteção anticorrosiva.

## **ABSTRACT**

The present work has the objective of studying the influence of corrosion on telecommunications towers, analyzing the corrosive media that influence the deterioration of the material, also analyzing the geometry of the parts that compose the structure and verifying the behavior of the corrosion in relation to the Material that is Manufactured. Thus, in the beginning, bibliographical researches on the subject were carried out. Then visual inspections were made to observe the state of the structure and also to point out places that are facilitators of corrosion. Soon after the visit was conducted field test to simulate a real influence of the corrosive media in which as telecommunications towers are subjected. A laboratory test was also performed, in which the test specimen was subjected to a saline solution so as to check the mass loss of the material. With the obtaining of the results it was possible to notice that the telecommunications towers are subject to degrading action of the corrosion, in this way it is necessary to the application of a system of anticorrosive protection adequate to prevent propagation of the product of corrosion in the structures in general.

Keywords: Telecommunication towers, corrosion, protection anticorrosive.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Corrosão na base da torre.....	14
Figura 2 - Corrosão na parte superior da torre.....	14
Figura 3 - Torre estaiada.....	17
Figura 4 - Torre autoportante .....	18
Figura 5 - Torre mista.....	18
Figura 6 - Comportamento corrosivo do processo metalúrgico .....	19
Figura 7 - Equilíbrio de íons entre a solução e o eletrodo.....	22
Figura 8 – Série galvânica em água do mar.....	22
Figura 9 - Componentes de uma pilha de eletroquímica.....	23
Figura 10 - Pilha galvânica entre ferro e cobre .....	24
Figura 11 - Pilhas de aeração diferencial.....	26
Figura 12 - Corrosão uniforme em chapa de aço – carbono.....	27
Figura 13 - Corrosão por placas .....	27
Figura 14 - Corrosão alveolar.....	28
Figura 15 - Corrosão por pites.....	28
Figura 16 - Corrosão intergranular .....	29
Figura 17 - Esfoliação em tubo de aço-carbono .....	29
Figura 18 - Corrosão por fresta.....	30
Figura 19 - Pontos de acúmulo de água e impurezas .....	32
Figura 20 - Corrosão galvânica .....	33
Figura 21 - Informações da torre .....	37
Figura 22 - Torre de telecomunicação da vivo .....	38
Figura 23 – Corpo de prova com as dimensões: 110 mm x 45 mm x 1,5mm.....	39
Figura 24 – Suporte para os corpos de prova .....	39
Figura 25 – Organização dos corpos de prova .....	40
Figura 26 – Corpo de prova para o experimento .....	40
Figura 27 – Preparação dos materiais.....	41
Figura 28 – Peça submersa na solução de NaCl.....	42
Figura 29 – Aparato na estufa aquecedora .....	42
Figura 30 - Situação da base.....	43
Figura 31 Montagem da estrutura.....	43
Figura 32 – Flange sujeito a acúmulo de água .....	44

Figura 33 - Cordão de solda .....	44
Figura 34 - Contato entre parafuso e cantoneira.....	45
Figura 35 - Propagação da corrosão nos corpos de prova .....	45
Figura 36 – Peça com 32 dias no ambiente .....	46
Figura 37 – Parte inferior do corpo de prova após 32 dias.....	46
Figura 38 – Estado do corpo de prova após o ensaio .....	47
Figura 39 – Estado do corpo de prova após o ensaio e da limpeza superficial .....	47
Figura 40 – Pesagem do corpo de prova antes do ensaio .....	48
Figura 41 – Pesagem do corpo de prova depois do ensaio.....	48
Figura 42 - Classificação do grau de corrosividade .....	49

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1. Objetivos</b> .....	16
1.1.1. Objetivo geral .....	16
1.1.2. Objetivos específicos .....	16
<b>2. TORRES TELECOMUNICAÇÕES</b> .....	17
<b>3. CORROSÃO</b> .....	19
<b>3.1. Tipos de corrosão</b> .....	20
3.1.1. Corrosão química .....	20
3.1.2. Corrosão eletrolítica .....	20
3.1.3. Corrosão eletroquímica .....	20
<b>3.2. Mecanismo eletroquímico</b> .....	20
<b>3.3. Potencial de eletrodo</b> .....	21
<b>3.4. Pilhas eletroquímicas</b> .....	23
3.4.1. Pilhas de eletrodos metálicos diferentes .....	24
3.4.2. Pilha ativa-passiva .....	25
3.4.3. Pilha de concentração iônica .....	25
3.4.4. Pilhas de aeração diferencial .....	25
<b>3.5. Formas de corrosão</b> .....	26
3.5.1. Corrosão uniforme .....	27
3.5.2. Corrosão por placas .....	27
3.5.3. Corrosão alveolar .....	28
3.5.4. Corrosão puntiforme ou por pites .....	28
3.5.5. Corrosão intergranular .....	29
3.5.6. Corrosão por esfoliação .....	29
3.5.7. Corrosão galvânica .....	30

3.5.8.	Corrosão em fresta.....	30
<b>3.6.</b>	<b>Meios corrosivos.....</b>	<b>31</b>
3.6.1.	Atmosfera .....	31
3.6.2.	Solos .....	31
3.6.3.	Águas naturais .....	32
3.6.4.	Águas do mar.....	32
<b>3.7.</b>	<b>Fatores que influenciam a corrosão .....</b>	<b>32</b>
3.7.1.	Geometria da peça .....	32
3.7.2.	Soldas .....	33
3.7.3.	Pares galvânicos .....	33
3.7.4.	Fresta .....	33
<b>3.8.</b>	<b>Métodos de proteção anticorrosiva .....</b>	<b>34</b>
3.8.1.	Proteção catódica.....	34
3.8.2.	Revestimentos.....	34
3.8.3.	Galvanização .....	35
<b>3.9.</b>	<b>Ensaio de corrosão .....</b>	<b>35</b>
3.9.1.	Teste por imersão.....	36
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1.</b>	<b>Ensaio visual.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2.</b>	<b>Ensaio de campo.....</b>	<b>38</b>
<b>4.3.</b>	<b>Ensaio por imersão .....</b>	<b>40</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADO E DISCURSÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>5.1.</b>	<b>Resultado do Ensaio Visual.....</b>	<b>43</b>
<b>5.2.</b>	<b>Resultado do ensaio de campo .....</b>	<b>45</b>
<b>5.3.</b>	<b>Resultado do ensaio de corrosão por imersão .....</b>	<b>47</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As torres de telecomunicações estão distribuídas por vários lugares e situações. Com avanço das tecnologias a quantidade destas torres vem progredindo consideravelmente nos últimos anos. Estas estruturas estão espalhadas tanto em território rural, quanto em território urbano. E o órgão federal responsável pelo controle destas torres é a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações).

Estas estruturas de telecomunicação são responsáveis em emitir ou receber sinais de telefonia móveis, rádios e televisões, e assim permitir a comunicação simultânea entre as pessoas. Segundo a ANATEL, estima-se que no período entre 2010 a 2020, serão inauguradas 10.000 novas torres de telecomunicações para melhorar o sistema comunicação no Brasil.

Existem inúmeras torres distribuídas por todo país, pois levam as comunidades o acesso à comunicação. Desta forma, elas estão localizadas próximas a regiões desertas ou principalmente em regiões de grande população. Com isso estas estruturas estão expostas a fenômenos ambientais, que afetam e aceleram diretamente a degradação do material da torre. Assim sendo, é necessária uma atenção especial a estas estruturas para minimizar e prevenir contra consequências provenientes da sua exposição no meio ambiente e também da ação do tempo por um período considerável.

Como a função das torres é emitir ou receber sinais elas devem estar localizadas em lugares estratégicos para evitar interferência que atrapalhe a propagação destes sinais. Desta forma, são construídas em uma altura bastante razoável para atender seu objetivo. Com isso, para proporcionar melhor comunicação, elas não devem possuir obstáculos visuais. Portanto, através da robustez destas estruturas, faz-se necessário a escolha do material adequado para facilitar implantação e manutenção das torres. Desta forma, o material que atende estes requisitos e são comumente usados nas torres de telecomunicações é o metal. Pois, é considerado vantajoso, devido suas características como: resistência mecânica, facilidade de montagem, economia, manutenção da estrutura na área, dentre outros. Mas os metais sofrem influência do fenômeno bastante conhecido que é a corrosão.

Segundo GENTIL (2012), a corrosão é um fenômeno espontâneo, na qual transformam constantemente os materiais metálicos, de modo que seu desempenho e durabilidade deixam de satisfazer a aplicação desejada.

A partir das figuras 1 e 2, pode-se perceber a intensidade de deterioração que estão sujeitas as estruturas de telecomunicações. Tanto as partes superiores e inferiores da torre

estão sendo degradadas pelo fenômeno da corrosão. Esta degradação ocorre devido aos meios corrosivos e também a falta de um sistema de proteção anticorrosiva, que iniba o processo de destruição do metal. Desta forma, é essencial conhecer as influências dos principais meios corrosivos, as causas que levam ao aparecimento do produto de corrosão, as formas de propagação e também os pontos propícios para a ocorrência de corrosão. Todos esses fatores auxiliam no combate a danificação das estruturas.



Figura 1 - Corrosão na base da torre  
Fonte: Amaral et al (2008)



Figura 2 - Corrosão na parte superior da torre  
Fonte: INPRA LATINA

A corrosão é um fenômeno que age em materiais que propiciam sua ação, ou seja, aqueles que possuem pouca resistência à corrosão. Como o metal está sujeito a este fenômeno, devem se ter uma atenção especial às estruturas das torres de telecomunicações, pois a falta de manutenção e prevenção trará algumas consequências. Segundo Gemelli (2001), estas consequências podem ser diretas ou indiretas. As diretas envolvem os custos de substituição de peças ou equipamentos corroídos, incluindo gastos com mão-de-obra e energia; também a questão de segurança, como essas estruturas se localizam em regiões adjacentes a casas e fluxo de pessoas, dependendo da intensidade de deterioração da estrutura, é possível ocorrer o rompimento da mesma e assim envolver perdas de bens ou vidas humanas; outro ponto é os transtornos com os clientes, na qual o fenômeno de corrosão pode levar a interrupções na comunicação entre as torres. Pode-se perceber que todos esses fatores provenientes da corrosão abrangem perdas econômicas significantes. Por isso é necessário conhecer meios que previnam esse fenômeno tão comum nas estruturas metálicas.

As consequências indiretas estão relacionadas ao desgaste das reservas de recursos minerais. Segundo Gentil (2012), a conservação de recursos minerais é um aspecto importante que está relacionado com a destruição de materiais metálicos pela corrosão, pois há necessidade de produzir uma quantidade adicional de material para repor aqueles que foram degradados pela corrosão. Assim, conforme a literatura, cerca de 25% da produção mundial de aço, são geradas para ressarcir esta significativa parcela de material perdido. Deste modo, esta reposição faz com que reservas naturais de alguns metais sejam consumidas, chegando ao fim. Além disso, a agressão ao meio ambiente é outro fator indireto, que é fruto do fenômeno da corrosão.

Este trabalho de conclusão de curso tem como foco estudar o comportamento da corrosão da torre quando submetida a meios corrosivos que facilitam a degradação da estrutura ao longo do tempo. O problema da pesquisa surgiu a partir do projeto de iniciação científica, que tem como tema principal “Patologias da corrosão em estruturas metálicas das torres de telecomunicações”. Assim foi possível perceber a necessidade de uma proteção anticorrosiva adequada para minimizar a propagação da corrosão, principalmente nos pontos favoráveis, que precisam de uma atenção especial. Será possível verificar a partir deste projeto a importância do uso da proteção, pois a velocidade de corrosão em uma estrutura não protegida, onde possui o contato direto entre superfície e meios corrosivos, acontecerá de forma progressiva, pois o fenômeno da corrosão ocorre facilmente nos materiais utilizados nas torres.

A hipótese para solução do problema seria a manutenção preventiva nas torres para evitar danos maiores como os mencionados anteriormente; também a aplicação de uma proteção anticorrosiva apropriada, como pintura e galvanização; ou também a fabricação da estrutura utilizando metais resistentes à corrosão, como aços inoxidáveis. Segundo Pourbaix (1987), os aços inoxidáveis são ligas que possuem o aumento em determinadas propriedades, como a resistência a várias formas de corrosão. Mas o alto custo desses aços faz com que as empresas das torres de telecomunicações optem por aços mais economicamente viáveis.

Deste modo, este projeto de conclusão de curso analisará o comportamento da corrosão no metal sem proteção, estando sujeitos a ambientes que simulem as condições ambientais das torres de telecomunicações. E também serão apontados alguns pontos na estrutura que precisam de atenção, pois são áreas favoráveis que aceleram e facilitam o acontecimento da corrosão.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Analisar as influências da corrosão na degradação do material das torres de telecomunicações, através da análise das mudanças sofridas pela estrutura quando em contato com o ambiente de serviço. E assim discutir as principais causas e mecanismos decorrentes desse fenômeno.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Analisar as principais causas de deterioração da estrutura;
- Avaliar os riscos que os meios corrosivos influenciam na deterioração da torre;
- Verificar as alterações provocadas pelo ambiente de serviço no material da estrutura metálica analisada;
- Comparar com os resultados disponíveis na literatura.

## 2. TORRES TELECOMUNICAÇÕES

Segundo Zampiron (2008), o tipo de material que será utilizado na construção de uma torre de telecomunicação dependerá de vários fatores que afetarão o comportamento do projeto, como: peso, custo, montagem e manutenção. Como cada material possui suas características e aplicações adequadas para cada tipo de projeto desejado, tais estruturas podem ser fabricadas a partir dos seguintes materiais: madeira, aço, concreto armado e também mista de concreto e aço.

Conforme Amaral et al (2008), as antenas devem estar localizadas em lugares estratégicos ou dotadas de torres elevadas, pois estas estruturas tem como função emitir ou receber sinais vindas de outras torres. Assim, a propagação de sinais tem grande importância para garantir a perfeita comunicação entre elas.

Desta forma, a escolha do material das torres é de grande importância para a execução do projeto, manutenção da estrutura e conseqüente garantia do serviço das empresas. Amaral et al (2008), apresenta que o material mais comumente utilizado nas torres de telecomunicações é o metal, devido a facilidade e velocidade de instalação. E também o metal possui resistência mecânica e custo acessível para estas estruturas de grande porte. As torres metálicas de telecomunicações estão divididas em autoportantes, estaiadas e mistas.

Segundo Zampiron (2008), nas estruturas estaiadas (figura 3) os esforços horizontais são transmitidos para os cabos, que resistem tais tensões. A desvantagem desse tipo de torre é a necessidade de áreas espaçosas para fixação dos tirantes.



Figura 3 - Torre estaiada  
Fonte: IDEAL ANTENAS

Outro tipo de estrutura bastante utilizado é as autoportantes (figura 4), na qual são formadas por um mastro de treliça ou tubular, que suporta todos os esforços da estrutura. Sua vantagem é a necessidade de menor área para implantação (ABDALLA, 2002).



Figura 4 - Torre autoportante  
Fonte: IDEAL ANTENAS

Conforme Zampiron (2008), as torres mistas (figura 5) é a mescla entre a estrutura estaiada e autoportante, todavia, esta forma é pouco utilizada.



Figura 5 - Torre mista  
Fonte: STRUCTURAE (2008)

### 3. CORROSÃO

A explicação de corrosão que é mais aceita e difundida pelo mundo, é definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, que sofre influência de uma ação química ou eletroquímica do meio ambiente na qual se encontra, associada ou não a esforços mecânicos. A degradação ocorrida no material pela interação físico-química através do meio operacional causa alterações indesejáveis, que influenciam nas características e aplicações, tornando a peça inadequada para o uso, em razão de seu desgaste e modificações estruturais (GENTIL, 2012).

A corrosão é considerada, normalmente, um processo espontâneo, na qual modificam a durabilidade e o desempenho dos materiais metálicos, deixando de satisfazer os fins a que se destinam. Diante disso, algumas destas ligas estão presentes nas estruturas metálicas enterradas ou submersas, como: minerodutos, oleodutos, gasodutos, tanques de armazenamento de combustíveis; nos meios de transportes, tais como: trens, navios, automóveis; também nas estruturas metálicas sobre o solo ou aérea, assim como: torres de telecomunicações, pontes, postes de iluminação, torres de linhas de transmissão de energia elétrica, dentre outros (GENTIL, 2012).

Estas estruturas metálicas citadas estão sujeitas aos fenômenos de corrosão, pois o metal sem proteção favorece ao aparecimento do produto de corrosão. Segundo Gemelli (2001), os problemas de corrosão são mais frequentes nestes tipos de materiais, devido serem mais vulneráveis aos meios corrosivos do que os materiais cerâmicos e polímeros.

Segundo Oliveira (2012) a corrosão é considerada o processo inverso do processo metalúrgico, pois este transforma os minérios extraídos da natureza em diversos tipos de metais, através de uma série de processos. Enquanto a corrosão tende a transformar o metal em seu estado natural, ou seja, volta a ser minério novamente. Esse esquema pode ser observado na figura 6.



Figura 6 - Comportamento corrosivo do processo metalúrgico  
Fonte: Gentil, 2003

### **3.1. Tipos de corrosão**

#### **3.1.1. Corrosão química**

Conhecida também por corrosão seca, sendo definida como o ataque de um metal através de um gás ou vapor, resultando assim em uma reação química heterogênea entre gás (ou vapor) e metal. Este tipo de mecanismo dificilmente ocorre na natureza, sendo frequentes em ambientes industriais, pois acontece em regiões de serviço de altas temperaturas, tais como: indústrias químicas, metalúrgicas, de transformação e produção de energia (GEMELLI, 2001).

#### **3.1.2. Corrosão eletrolítica**

Segundo Nunes (1990), este tipo de corrosão é considerada eletroquímica e não espontânea, pois se dá através da aplicação de uma corrente elétrica externa, forçando assim o fluxo de elétrons no material. E também pode ser ocasionada pelas correntes de fuga, em que ocorre com muita frequência em tubulações de petróleo, de água potável, em taques de gasolina, dentre outros. Por essas estruturas estarem próximas a equipamentos elétricos sofrem a influência dessas fontes externas.

#### **3.1.3. Corrosão eletroquímica**

Conforme Nunes (1990), a corrosão eletroquímica é um processo espontâneo, conhecida como corrosão úmida, pois necessita da presença de água no seu mecanismo e ocorre através do fluxo de elétrons entre duas superfícies com mesmo material ou materiais diferentes.

### **3.2. Mecanismo eletroquímico**

Quando um elemento químico perde ou cede elétron, diz-se que ele se oxida. Quando recebem elétrons ele se reduz. Logo, a reação de redução e oxidação envolve transferência de elétrons. Uma reação de corrosão ocorre o fluxo de elétrons entre um elemento químico de um material e o meio em que se encontra. Na corrosão eletroquímica, os elétrons se difundem pela superfície do metal. Na região onde acontecem as perdas de elétrons, ocasiona a corrosão naquele ponto, assim há perda de átomos e conseqüentemente perda de massa da estrutura.

Enquanto, que na região onde ocorre o recebimento de elétrons, há deposição do material, pois naquela área da superfície há o ganho de átomo, e conseqüentemente é notado ganho de massa. A região que ocorre a oxidação é denominada anodo e aquele que há o consumo de elétrons são chamadas de catodo (SERRA, 2014).

Para Ramanathan (1987), a quase totalidade do aparecimento de corrosão acontece envolvendo reações eletroquímicas. A corrosão eletroquímica é também conhecida como corrosão úmida, sendo que seu mecanismo atinge especialmente metais expostos a ambientes que estão em contato com ar atmosférico, submersos no solo, a água de rios, mares, dentre outros.

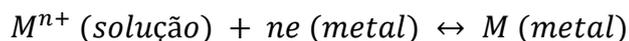
Desta forma, o mecanismo eletroquímico ocorre através da presença de água, funcionando como eletrólito que contém íons, gerando assim condução de eletricidade. Dando início ao processo de corrosão eletroquímica.

### 3.3. Potencial de eletrodo

De acordo com Gemelli (2001, pag. 9), “quando um metal é colocado em contato com uma solução (eletrólito), o diferencial de potencial químico entre a solução e o metal faz com que íons metálicos se dissolvam ou íons da solução penetrem no metal. Desta forma, há uma diferença de potencial elétrico entre o eletrodo (fase sólida) e o eletrólito (fase líquida). Sendo conhecido como diferença de potencial eletroquímica”.

Segundo Amorim (2012), o potencial de eletrodo nada mais é que a medida de facilidade com que os eletrodos de um determinado material perdem elétrons ou da facilidade com que os íons ganham elétrons.

Gentil (2012) explica que o sistema metal – solução tende a alcançar um equilíbrio de modo espontâneo. Na qual, este equilíbrio eletroquímico pode ser representado pela equação 1 e visualizado na figura 7.



Equação 1 – Equilíbrio eletroquímico

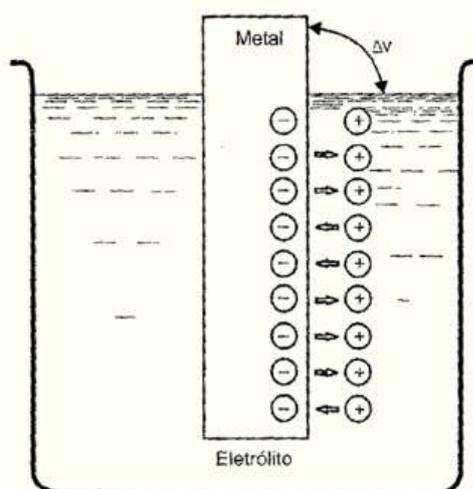


Figura 7 - Equilíbrio de íons entre a solução e o eletrodo  
Fonte: Gemelli (2001)

Segundo Gentil (2012), já foi verificado que os metais tem diferentes tendências de oxidação. Por exemplo, na presença de ar e umidade verifica-se que o ferro tem maior facilidade de oxidação que o níquel e que o ouro, pois esses não se corroem.

Amorim (2012) reforça que foi criada uma série configurada de metais e ligas, os mais usados nas indústrias, para determinar o material que tem maior facilidade de corrosão em relação a outro. Isto pode ser verificado a partir do potencial de eletrodo de cada material em relação à solução. A série foi colocada em ordem, conforme a figura 8.

1. Magnésio (mais ativo)	12. 316 inoxidável (ativo)	23. Ligas cupro-níquel
2. Ligas de magnésio	13. Hastelloy C	24. Titânio
3. Zinco.	14. Solda Chumbo-estanho	25. Monel
4. Alumínio 100	15. Chumbo	26. Solda prata
5. Cádmio	16. Estanho	27. Níquel (passivo)
6. Alumínio 2017	17. Níquel (ativo)	28. Inconel (passivo)
7. Aços (não ligados)	18. Inconel (ativo)	29. Ferro cromo (passivo)
8. Ferro fundido	19. Hastelloy B	30. 304 inoxidável (passivo)
9. Ferro cromo (ativo)	20. Latão	31. 316 inoxidável (passivo)
10. Ferro níquel fundido	21. Cobre	32. Prata
11. 304 inoxidável (ativo)	22. Bronze	33. Grafite (menos ativo)

Figura 8 – Série galvânica em água do mar  
Fonte: Serra, 2014

Conforme Nunes (1987), quanto maior a distância entre os metais observados, na figura 8, mais intensa será a corrosão no material. O metal que estiver mais próximo do topo da série sofrerá primeiro a corrosão em relação a outro metal que estiver abaixo.

### 3.4. Pilhas eletroquímicas

O estudo das pilhas eletroquímicas é de grande importância, pois se trata do entendimento básico do mecanismo da corrosão eletroquímica. A partir disso, podem-se verificar os componentes que compõem o processo.

Segundo Lombardi (1993), os componentes que fazem parte da pilha eletroquímica são:

- Anodo: Eletrodo em que ocorre a oxidação, ou seja, onde acontece a corrosão. Nessa região, os íons metálicos positivos migram para o eletrólito pela corrente elétrica. Enquanto os elétrons migram pelo circuito metálico para o outro eletrodo.
- Catodo: Eletrodo em que ocorre a redução, ou seja, a deposição do material. As cargas negativas migram do eletrodo, fazendo com que aconteçam reações de redução.
- Eletrólito: Um condutor, geralmente um líquido, que é responsável em gerar uma diferença de potencial entre o anodo e catodo e assim provocar o fluxo de elétrons entre eles.
- Circuito metálico: ligação entre os dois eletrodos, por onde acontece o transporte dos elétrons, escoando do anodo para o catodo.

Tais componentes podem ser visto através da ilustração da figura 9.

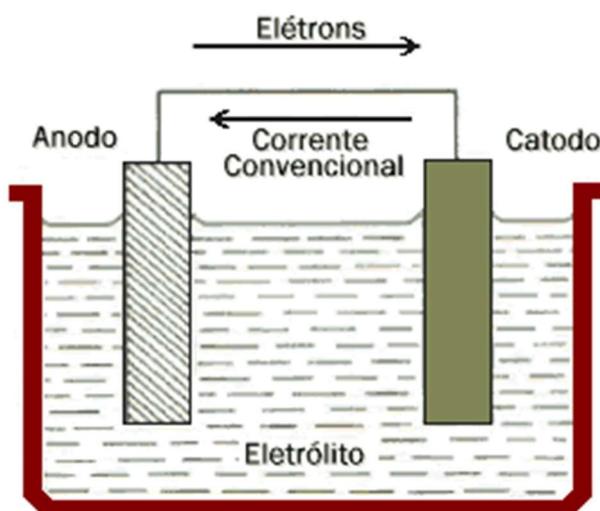


Figura 9 - Componentes de uma pilha de eletroquímica  
Fonte: Serra, 2014

Segundo Gentil (2012), há a diferença de potencial entre dois eletrodos ocorre quando acontecem as seguintes situações:

- Os eletrodos possuem diferentes substâncias, possuindo diferentes potenciais;
- Os eletrodos são de mesma substância, mas há atividades diferentes na solução;
- Os eletrodos são da mesma substância e as atividades são iguais das soluções, mas os eletrodos estão submetidos a diferentes pressões parciais de substâncias gasosas.
- Os eletrodos possuem diferentes temperaturas.

Desta forma, as pilhas eletroquímicas podem ser dos seguintes tipos:

#### 3.4.1. Pilhas de eletrodos metálicos diferentes

Amorim (2012, pag. 15) explica que “este tipo de pilha ocorre na medida em que dois metais ou ligas diferentes ficam em contato e mergulhados num mesmo eletrólito, sendo chamada de pilha galvânica”.

Os metais quando estão imersos em uma solução corrosiva e condutora há uma diferença de potencial entre eles. Caso estes materiais entrem em contato ou exista um circuito metálico que interliguem as duas superfícies, esta diferença de potencial origina fluxo de corrente entre os materiais. Deste modo, o metal com menor potencial de redução é o anodo, sendo mais reativo e menos nobre, aumentando assim a sua corrosão. Enquanto, o metal com maior potencial de redução é o catodo, tornando-se sua corrosão mais diminuída (RAMANATHAN, 1987).

A pilha galvânica pode ser visualizada, conforme a figura 10. Na qual, demonstra os elétrons fluindo do ferro para o cobre, pois o ferro possui menor potencial de redução.

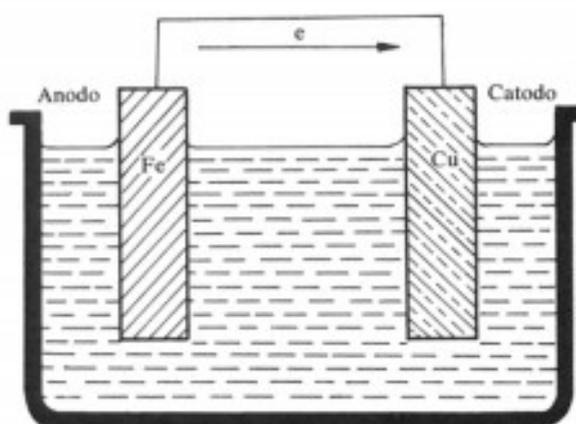


Figura 10 - Pilha galvânica entre ferro e cobre  
Fonte: Serra, 2014

### 3.4.2. Pilha ativa-passiva

De acordo com Gentil (2012), alguns metais ou ligas tendem a formar em sua superfície uma película de óxido fina e aderente. Esse fenômeno acontece nos seguintes metais: alumínio, chumbo, aço inoxidável, titânio, cromo, dentre outros. Assim, a passivação torna esses materiais protegidos contra a corrosão. Mas, os íons cloretos destroem essa passivação ou impede a sua formação, pois eles penetram através de poros ou falhas das redes cristalinas da camada de óxido do metal.

Amorim (2012) completa explicando que a destruição da película protetora pelos íons cloretos, faz com que o metal fique exposto aos meios agressivos se tornando ativo (anodo), e em adjacência grande área passivada (catodo), assim ocorre uma diferença de potencial, chamada de pilha ativa-passiva.

### 3.4.3. Pilha de concentração iônica

De acordo como Gemelli (2001), a pilha de concentração iônica é formada por materiais iguais ou diferentes, entretanto estão em contato com soluções de diferentes concentrações. Se os materiais são iguais, é denominado de concentração iônica simples, a região anódica e catódica é determinada a partir da concentração de cada solução, caso seja mais diluída é o anodo, caso seja mais concentrada é o catodo. E se os materiais foram diferentes, conhecido como concentração iônica complexa, a oxidação acontece no eletrodo de menor potencial de redução, pois a liberação de íons positivos e retenção de elétrons ocorrem com maior facilidade.

### 3.4.4. Pilhas de aeração diferencial

Amorim (2012), explica que este tipo de pilha acontece em eletrodos de mesmo material metálico em contato com um mesmo eletrólito, mas com diferentes quantidades de gases dissolvidos.

Segundo Gemelli (2001), a pilha de aeração diferencial também é conhecida como pilha de oxigenação diferencial, pois a diferença de concentração de oxigênio gera uma diferença de potencial. Funcionando o eletrodo com mais oxigênio, ou seja, mais aerado, como o catodo e o menos aerado como anodo. Este esquema pode ser visto na figura 11.

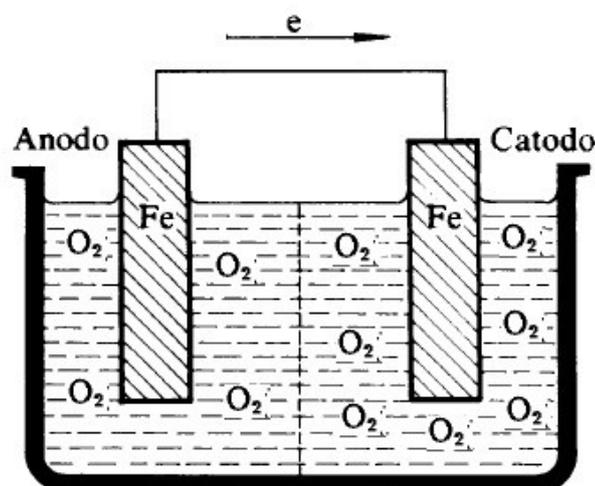


Figura 11 - Pilhas de aeração diferencial  
Fonte: Gentil (2012)

### 3.5. Formas de corrosão

Segundo Gentil (2012), a corrosão pode ter diferentes formas e o conhecimento destes tipos é bastante importante no estudo dos processos corrosivos. Os tipos ou formas de corrosão são apresentados conforme sua aparência, forma de ataque, as causas e também os mecanismos. Desta maneira, pode ocorrer corrosão conforme:

- a morfologia: Uniforme, por placa, alveolar, puntiforme (ou pites), intergranular (ou intercrystalina), intragranular, filiforme, esfoliação, grafítica, dezinificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio.
- Causas ou mecanismos: aeração diferencial, corrente de fuga (ou eletrolítica), galvânica, por solicitações mecânicas, em torno de cordão de solda, grafítica e dezinificação.
- Fatores mecânicos: sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada a erosão.
- Meio corrosivo: pelo solo, atmosférica, microrganismos, pela água do mar águas naturais.

As principais formas de corrosão mais comuns que são apresentadas nas principais literaturas são as seguintes:

### 3.5.1. Corrosão uniforme

Também conhecida como corrosão generalizada (figura 12), na qual acontece em toda extensão da superfície, resultando em perda de massa em sua espessura. É comum em metais que não criam a película de óxido protetora (OLIVEIRA, 2012).

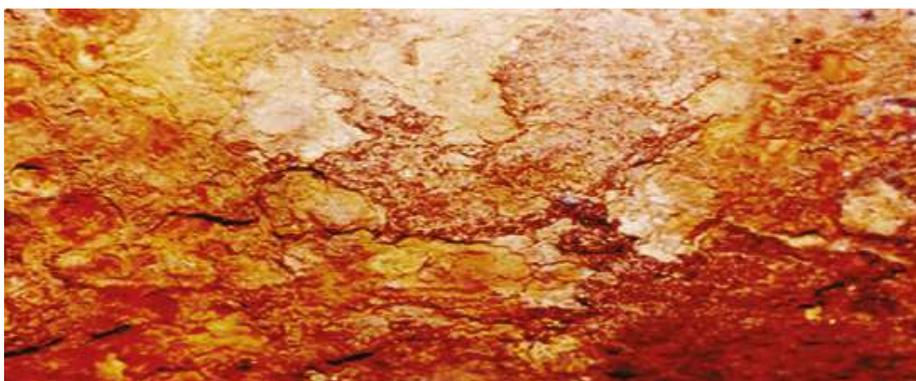


Figura 12 - Corrosão uniforme em chapa de aço – carbono  
Fonte: Gentil, 1996.

### 3.5.2. Corrosão por placas

A corrosão fica localizada em determinadas áreas da superfície (figura 13), não em toda extensão, formando placas com escavações. É comum ocorrer em metais em que as películas inicialmente protetoras fraturam e perdem a aderência, deixando o metal sujeito ao ataque (GENTIL, 2012).



Figura 13 - Corrosão por placas  
Fonte: ABRACO, 2006

### 3.5.3. Corrosão alveolar

Corrosão que progride na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações iguais a alvéolos (figura 14), apresentam fundos arredondados e o diâmetro é maior que sua profundidade. É frequente em metais que formam películas semi protetoras (OLIVEIRA, 2012).

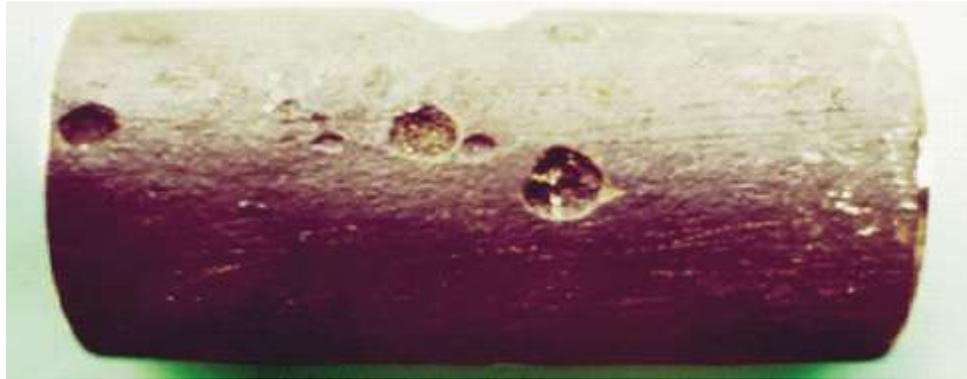


Figura 14 - Corrosão alveolar  
Fonte: Gentil, 1996

### 3.5.4. Corrosão puntiforme ou por pites

Esta corrosão (figura 15) acontece em pontos ou pequena áreas da superfície da peça produzindo pites, geralmente sua profundidade é maior que seu diâmetro (RAMANATHAN, 1987).



Figura 15 - Corrosão por pites  
Fonte: ABRACO, 2006

### 3.5.5. Corrosão intergranular

O ataque acontece nos contornos dos grãos (figura 16), entre as redes cristalinas do material. Assim, perdem suas propriedades mecânicas, estando sujeitos à fratura (RAMANATHAN, 1987).



Figura 16 - Corrosão intergranular  
Fonte: Gentil, 1996

### 3.5.6. Corrosão por esfoliação

Este tipo (figura 17) se processa em diferentes camadas, na qual o produto de corrosão que se localiza entre a estrutura de grãos alongados, e assim separa as camadas, dando uma aparência de inchamento da superfície metálica (OLIVEIRA, 2012).



Figura 17 - Esfoliação em tubo de aço-carbono  
Fonte: Gentil, 2012

### 3.5.7. Corrosão galvânica

Segundo Gemelli (2001), a corrosão galvânica acontece quando há o contato entre dois materiais metálicos diferentes, onde estão expostos ao mesmo eletrólito, assim ocorre uma diferença de potencial entre eles, fazendo com que o metal menos nobre, seja a área corroída. Enquanto o metal mais nobre seja a área protegida. Este tipo de corrosão causa profundas perfurações no material anódico.

Gentil (2012) complementa que, a determinação para conhecer o metal que sofrerá corrosão em relação a outro, é arranjada a partir de uma série galvânica. Na qual, esta série foi feita conforme nas observações na água do mar e assim verificar se o material é mais nobre ou mais ativo. Pode-se visualizar novamente esta série na figura 8.

### 3.5.8. Corrosão em fresta

Este tipo de corrosão é localizada (figura 18), em que ocorre a formação de pites ou alvéolos. Acontece na junção de peças metálicas, por rebites ou parafusos, na qual proporcionam a existência de pequenos interstícios que facilitam esta forma de corrosão. Pois nesses pequenos espaços a aeração é pequena, fazendo com que tenha menor concentração de oxigênio, enquanto que na parte externa há maior concentração. Desta forma, surge o mecanismo eletroquímico denominado pilha de aeração diferencial, em que a área com menor concentração de oxigênio acontece à corrosão (RAMANATHAN, 1987).



Figura 18 - Corrosão por fresta  
Fonte: Eletrobras Cepel

### 3.6. Meios corrosivos

Segundo Amorim (2012), o processo de corrosão acontece a partir da relação entre o metal e o meio que o material está exposto, em que se formam os eletrólitos, sendo a solução condutora formada por água podendo ser: sais, ácidos ou bases.

Desta maneira, será visto os principais meios de corrosão que afetam diretamente as estruturas metálicas.

#### 3.6.1. Atmosfera

De acordo com Nunes (2007), a atmosfera é um dos principais meios que facilita a propagação e aparecimento do produto de corrosão. No ar é encontrada certa umidade, sais em suspensão, gases das fábricas, poeiras, dentre outros. Dessa forma, a água que funciona como o eletrólito, se torna mais densa na superfície metálica, devido estes componentes.

Sheir (1978) descreve a corrosão atmosférica em três partes, dependendo do seu grau de umidade. Na corrosão atmosférica seca, não há a presença de umidade, sem presença do eletrolítico na superfície metálica. Na corrosão atmosférica úmida, acontece em atmosfera com umidade relativa abaixo de 100%, na qual a velocidade de corrosão depende desta umidade. Enquanto a corrosão atmosférica molhada, a umidade relativa está próxima de 100%.

#### 3.6.2. Solos

Segundo Ramanathan (1987), o solo é outro meio importante em que é favorável à corrosão, pois possuem vários fatores que influenciam diretamente a degradação do material, tais como: a resistividade do solo, aspecto que apresenta a facilidade de fluxo dos elétrons; a composição química do solo, onde varia sua composição ao longo do percurso funcionando como ponto propício para formação da pilha eletroquímica; microrganismo, a umidade do solo; dentre outros.

### 3.6.3. Águas naturais

Nunes (2007) apresenta que nos lagos e rios podem existir sais minerais, substâncias industriais, poluentes, gases dissolvidos. O eletrólito será formado por água e sais dissolvido, assim o processo de corrosão será acelerado pelo outros componentes.

### 3.6.4. Águas do mar

De acordo com Ramanathan (1987), a água do mar é uma solução aquosa, em que é composta por cloretos de sódio e outros sais. Possuem alta condutividade e são capazes de absorver íons cloretos, tornando o meio altamente corrosivo.

## 3.7. Fatores que influenciam a corrosão

### 3.7.1. Geometria da peça

Nas estruturas metálicas, as configurações de geometria das peças que a compõe tem grande relevância na formação do produto de corrosão. Segundo Nunes (1987), a drenagem é essencial para evitar a corrosão, pois quando acumuladas em contato da superfície metálica aceleram os processos corrosivos. Os pontos em que favorecem o acúmulo de água e também a retenção de impurezas servem como eletrólitos, em que dão início à deterioração do material. Diante disso, como medida de prevenção se faz necessárias mudanças nas formas geométricas para facilitar o escoamento da água. Assim na figura 19, pode-se notar o efeito da geometria da peça.

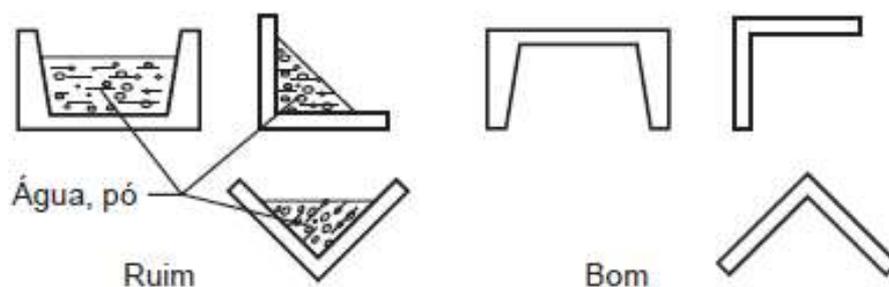


Figura 19 - Pontos de acúmulo de água e impurezas  
Fonte: GERDAL

### 3.7.2. Soldas

De acordo com Gentil (2012), as soldas nas estruturas metálicas devem ser bem acabadas, sem asperezas, sem crateras e contínuas. Pois soldas com imperfeições serão áreas propícias ao acúmulo eletrólitos e também dificultarão o processo de revestimento de proteção anticorrosiva.

### 3.7.3. Pares galvânicos

De acordo com Ramanathan (1987), devem-se evitar contatos entre materiais metálicos de potenciais diferentes, pois como já explicado na corrosão galvânica, o material menos nobre tende a se corroer. Assim, é preciso a colocação de materiais de vedação para evitar o contato entre essas superfícies. Pode-se ver esse caso na figura 20.

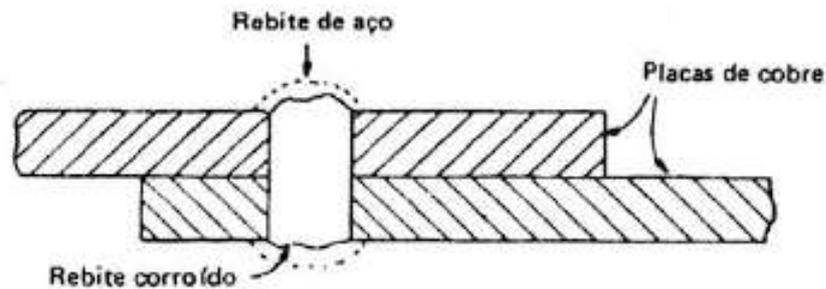


Figura 20 - Corrosão galvânica  
Fonte: Ramanathan, 1987

### 3.7.4. Fresta

Segundo Ramanathan (1987), as frestas provocam a corrosão por pilha de aeração diferencial, assim devem ser evitados diferença de concentração de oxigênio entre as áreas internas e externas da fresta.

### 3.8. Métodos de proteção anticorrosiva

De acordo com Gellings (1885) cada vez mais se procura meios de inibir ou desacelerar a deterioração do material. Os métodos utilizados tentam eliminar algum componente que fazem parte da pilha eletroquímica (eletrólito, cátodo, ânodo ou a ligação entre os componentes) para assim impedir o processo da corrosão. Esta proteção resulta na adição de uma camada protetora, com aderência e resistência necessária para suportar os meios corrosivos que o metal está submetido, isolando a superfície do eletrólito ou para que outro material corra no lugar do metal a proteger. Desta forma, existem diferentes formas para proteger o metal dos meios corrosivos e assim garantir a vida útil desejada.

#### 3.8.1. Proteção catódica

Segundo Gentil (2012), este método é capaz de controlar a corrosão em metais (tubulações e estruturas). O princípio de funcionamento é fazer com que o elemento metálico esteja protegido, tornando-se o cátodo da célula de corrosão. Desta forma, a perda de elétrons da estrutura para o meio, que se caracteriza a corrosão, é compensada a partir da presença de um anodo de sacrifício, na maioria das vezes são usados eletrodos de cobre e zinco, pois seus potenciais eletroquímico de redução devem ser menor que o do metal, em geral, são aços comuns.

Polito (2006) apresenta que a utilização do zinco como anodo de sacrifício é mais vantajosa, pois possui bom rendimento teórico em relação às massas consumidas.

Outro método utilizado é por corrente impressa. De acordo com Gentil (2012) esta forma tem o mesmo princípio da proteção por anodo de sacrifício, porém a proteção não ocorre de forma espontânea, é preciso uma fonte geradora de corrente contínua (retificador, bateria ou gerador) para que as correntes fluam dos anodos especiais. Os tipos de anodo dependem dos meios corrosivos que o metal terá influência.

#### 3.8.2. Revestimentos

Segundo Bravim (2009), o revestimento é a técnica contra a corrosão mais aplicada no combate à corrosão, assim dar a entender que esse método não seja complexo, mas seu desempenho devem atender requisitos de qualidade, a partir das execuções, como: limpeza da

superfície, preparação para conferir a rugosidade, verificação da qualidade da aplicação do revestimento.

Frauches–Santos et al (2013) apresenta que este meio protetor são aplicados devido à formação de películas de óxidos, hidroxilos e outros componentes pela reação entre os metais como alumínio, zinco, cromo, níquel com o meio corrosivo.

De acordo com Nunes (2007), os revestimentos são películas interpostas entre o metal e o meio corrosivo, ampliando assim a resistência à corrosão. Esta película dar ao material um comportamento mais nobre, sendo o caso das películas metálicas mais catódicas que as do material a proteger.

### 3.8.3. Galvanização

Segundo Gentil (2012), este método foi o que mais demonstrou ser eficaz, principalmente na aplicação de estruturas metálicas em contato com a atmosfera.

De acordo com Amaral et al (2008), essa forma foi criada pelo o químico francês P. J. Melouin, em 1741, na qual descobriu que uma camada de zinco sobre o aço poderia proteger contra a corrosão.

Hoffmann (2005) complementa que galvanização é a interação entre o aço e o zinco, sendo que em contato com o meio úmido, é originada uma diferença de potencial elétrica entre os metais e ocorre o fluxo de elétrons, assim esta corrente galvânica protege o aço dos processos corrosivos. Desta forma o metal protegido funciona como catodo e o zinco é o anodo, sendo consumido pela oxidação, ou seja, o metal de sacrifício.

Segundo Gentil (2012), a galvanização da estrutura se dá a partir da imersão das peças em um banho de zinco e alumínio fundido. O tempo de vida do revestimento depende da massa ou peso da camada de zinco.

## 3.9. Ensaio de corrosão

Segundo Gentil (2012), para observar o grau de agressividade de um ambiente corrosivo e encontrar métodos básicos de controle a degradação, é preciso realizar ensaios de corrosão.

De acordo com Tridapalli (2011) os ensaios de corrosão selecionam e verificam o desempenho de materiais como aço e revestimentos. Assim, estes ensaios podem ser classificados como acelerados e não acelerados.

Alvarenga (2001) explica que os ensaios não acelerados são realizados no ambiente de serviço que as estruturas se encontram, na qual os corpos prova ficam expostos a condições reais de trabalho, ou seja, estão sujeitos a variação de fenômenos que levam a corrosão.

Segundo Tridapalli (2011) os testes acelerados são realizados nos laboratórios utilizando equipamentos específicos para simular as condições em que o material se encontrará. Este ensaio é muito utilizado por sua rapidez e simplicidade, resultando em tempo curto de teste em comparação aos não acelerados.

### 3.9.1. Teste por imersão

De acordo com Tridapalli (2011) o ensaio de imersão é o mais simples e o mais usado nos teste acelerados de corrosão. Esse método consegue um maior grau de corrosão em menor tempo, assim são usados para obter respostas rápidas, porém o ideal é sempre avaliar amostras comparativas para evitar erros nos resultados. Desta forma, existem normas que regem a condução destes experimentos, tais como: ASTM, NACE e ISO. Estes ensaios são bastante flexíveis e podem ser aplicados em inúmeras situações em que a estrutura metálica se encontra.

Tridapalli (2011) complementa que os equipamentos são configurados para de acordo com o tipo de exposição que os corpos de provas estarão expostos, como: líquido, vapor, condensado, etc.

A ASTM G31-72, é conhecida como prática padrão para Testes de Corrosão por imersão em laboratório, na qual descreve a prática experimental, através de procedimentos, para obter a perda de massa do material sujeito a uma solução. As etapas para realização do teste envolve preparação de amostras e aparelhos, condições de teste, métodos de limpeza do corpo de prova, avaliação de resultados e cálculo de taxas de corrosão. Assim, devem-se ter bastante cuidado com cada etapa de execução do teste para evitar ruídos durante o experimento.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Ensaio visual

Foram realizadas inspeções visuais em uma torre de telecomunicação, a fim de verificar o estado da torre, as causas que leva a degradação e pontos que são propícios e facilitadores da ocorrência da corrosão.

A visita técnica aconteceu nas proximidades da Vila Maranhão, em São Luís do Maranhão e assim foram feitos registros fotográficos para analisar os fatores que levam a deterioração do material. Podem-se visualizar as informações sobre a torre de telecomunicação visitada na figura 21.



Figura 21 - Informações da torre

Fonte: Autor do trabalho

Vale lembrar que houve bastante dificuldade para liberação da visita técnica. Pois, entrou-se em contato com várias operadoras responsáveis pelas torres de São Luís, como: OI, VIVO e EMBRATEL, mas não se obteve respostas das empresas. A oportunidade para a inspeção visual aconteceu a partir de funcionários da área elétrica, onde estavam realizando manutenção preventiva na estrutura.

A estrutura de telecomunicação em estudo pode ser vista na figura 22. Sendo composta por tubos em suas extremidades, grande parte de sua estrutura é feita de cantoneiras (perfil L),

foram utilizados parafusos com porca para fixar suas peças e sua base é fixada no concreto através de flange.



Figura 22 - Torre de telecomunicação da vivo  
Fonte: Autor do trabalho

#### 4.2. Ensaio de campo

O material utilizado para realização deste ensaio foi o aço A-36, mais conhecido como aço comum. A escolha deste aço foi através da inspeção visual, onde se verificou que este material constituía a torre de telecomunicação visitada. Os materiais foram disponibilizados pela empresa Poçostec-MA e os corpos de prova foram colocados em exposição no bairro Pedrinhas.

Esses corpos de provas têm formato retangular com espessura de 1,5 mm, comprimento de 110 mm e largura 45 mm, como ilustra a figura 23. Desta forma, foram cortados 10 amostras para observar a propagação do produto de corrosão ao longo do tempo.



Figura 23 – Corpo de prova com as dimensões: 110 mm x 45 mm x 1,5mm.  
Fonte: Autor do trabalho

O suporte (figura 24) foi feito com o mesmo material dos corpos de prova, na qual se procurou fazer sua forma de modo que as peças cortadas ficassem inclinadas, para que assim a água da chuva escoasse com facilidade na superfície do metal. Como o suporte e as peças entram em contato, foi preciso aplicar uma camada de tinta no suporte para evitar que os corpos de prova sofressem influência da corrosão galvânica.



Figura 24 – Suporte para os corpos de prova  
Fonte: Autor do trabalho

Desta maneira, os corpos de provas foram organizados no suporte e inumerados em ordem crescente de 1 a 10 (figura 25) e assim foram colocados no local da observação em contato com os meios corrosivos atmosféricos, simulando as condições reais que estão sujeitas as torres de telecomunicações.



Figura 25 – Organização dos corpos de prova  
Fonte: Autor do trabalho

O método para observar os resultados, foi feito a partir da retirada dos corpos de prova a cada 5 dias no ambiente, ou seja, a primeira peça foi retirada nos primeiros 5 dias corridos, a segunda retirada em 10 dias corridos, a terceira em 15 dias corridos e assim sucessivamente. Desta forma, foi possível verificar o novo estado da peça a cada tempo de exposição.

### 4.3. Ensaio por imersão

Este experimento foi realizado no departamento de mecânica e materiais do Instituto Federal do Maranhão – IFMA, no laboratório de corrosão, na qual foi possível proceder com o teste acelerado de corrosão por imersão.

O material utilizado foi o aço A 36, na qual foi utilizado no experimento um corpo de prova, sendo uma peça sem proteção. Desta forma, foi cortada em forma retangular, em que a peça tinha as seguintes dimensões: 1.5 de espessura, 44.3 de comprimento e 31.5 de largura. O corpo de prova sujeito ao teste pode ser visualizado na figura 26.



Figura 26 – Corpo de prova para o experimento  
Fonte: Autor do trabalho

O procedimento do experimento foi feito baseado na norma ASTM G31-72, em que consiste na simulação do material pela imersão em uma solução.

A preparação do experimento aconteceu primeiramente a partir da limpeza da peça, depois foi pesada em uma balança digital para registrar o valor da massa antes do ensaio. Logo em seguida, foi preparado o béquer de 250 ml, onde foi colocado o corpo de prova em sua borda, através de palito e nylon para que as peças ficassem imóveis dentro da solução do béquer. Esta preparação está ilustrada na figura 27. Logo após, preparou-se uma solução de 3% de NaCl (cloreto de sódio) e colocada dentro do béquer deixando o corpo de prova submerso a solução, como mostra a figura 28. E por fim, todo aparato foi deixado em uma estufa à temperatura entre 50 °C e 60 °C, como mostra a figura 29.



Figura 27 – Preparação dos materiais  
Fonte: Autor do trabalho

Vale lembrar que o tempo estimado de contato entre a solução e o corpo de prova foi de 48 horas, pois a ASTM G31-72 rege que o intervalo de tempo deste experimento é entre 2 a 7 dias.



Figura 28 – Peça submersa na solução de NaCl  
Fonte: Autor do trabalho



Figura 29 – Aparato na estufa aquecedora  
Fonte: Autor do trabalho

Depois do término do ensaio, o corpo de prova foi retirado e submetido a uma limpeza superficial. Logo após, a peça foi pesada para verificar sua nova massa. E assim, determinou-se a taxa de corrosão através da equação 2.

$$T_c = \frac{PM \times 365 \times 1.000}{A \times t \times \rho}$$

Equação 2 – Cálculo da taxa de corrosão  
Fonte: ASTM G31-72

Onde  $T_c$  é a taxa de corrosão em mm por ano,  $PM$  é a perda de massa em gramas do corpo de prova,  $A$  sendo a área da peça em  $\text{mm}^2$ ,  $t$  tempo do experimento em horas e  $\rho$  sendo a densidade do aço em  $\text{g/cm}^3$ .

## 5. RESULTADO E DISCURSÕES

### 5.1. Resultado do Ensaio Visual

De acordo com a realização da inspeção visual foi possível verificar a situação e o estado em que a torre visitada se encontrava. Desta maneira, através das figuras 30 e 31, pode-se visualizar a forma em que a estrutura foi montada e também uma provável análise em relação à possibilidade de ocorrência de corrosão.



Figura 30 - Situação da base  
Fonte: Autor do trabalho



Figura 31 Montagem da estrutura  
Fonte: Autor do trabalho

Assim, a partir da análise visual foi observado que a torre de telecomunicação da VIVO se encontrava em bom estado de conservação e livre de qualquer forma de corrosão. Porém, verificaram-se algumas áreas e formas geométricas que são pontos primordiais que facilitam a ocorrência de corrosão.

Um desses pontos facilitadores de corrosão se encontra na base da torre. Conforme a figura 32 pode-se notar que existe a possibilidade do flange reter pó e água, assim este arranjo deve ser evitado. Segundo Gentil (2012), deve-se evitar a estagnação da água ou solução corrosiva, pois funcionam como eletrólito dando início ao processo de corrosão, assim é recomendado facilitação da drenagem de líquidos evitando danos.

Outro ponto que merece bastante atenção é o da solda. Porém na estrutura em estudo não foi observado este tipo de problema, pois a partir da figura 33 pode-se perceber que o cordão de solda se encontra bem acabado. Gentil (2012) afirmar que é necessário que todos os locais que possuem soldas na estrutura devem estar bem acabados para evitar acúmulo de água e pó e também optar por solda contínua para evitar aparecimento de corrosão.



Figura 32 – Flange sujeito a acúmulo de água  
Fonte: Autor do trabalho



Figura 33 - Cordão de solda  
Fonte: autor do trabalho

Verificaram-se também locais na estrutura que são facilitadores da corrosão e fazem parte da montagem de toda a torre de telecomunicação, essas áreas são pequenos interstícios que são originados pelo contato entre duas superfícies, como: peças metálicas rebitadas ou parafusos. De acordo com Ramanathan (1987) esta áreas são denominadas de frestas, na qual possuem diferentes áreas aeradas e assim facilita o aparecimento da corrosão. Na estrutura visitada foram encontrados vários desses pontos que podem ocorrer corrosão por frestas, conforme ilustra a figura 34.



Figura 34 - Contato entre parafuso e cantoneira  
Fonte: autor do trabalho

## 5.2. Resultado do ensaio de campo

Através do ensaio realizado no ambiente atmosférico, na qual foi retirada os corpos de prova a cada 5 dias, pode-se notar visualmente o grau de propagação da corrosão nos corpos de prova, assim é possível simular a influência da corrosão nas estruturas das torres de telecomunicação.

É notado que quanto mais tempo as peças sem proteção estavam sujeitas aos meios corrosivos, mais eram deterioradas pela corrosão. Desta forma, a figura 35, mostra a intensidade de corrosão ao longo do tempo a cada amostra retirada do campo. Assim, pode-se analisar o produto de corrosão, desde a peça livre de corrosão até a amostra 7, que é a ultima amostra retirada do ambiente corrosivo.



Figura 35 - Propagação da corrosão nos corpos de prova  
Fonte: Autor do trabalho

Pode-se perceber através de uma inspeção visual que a permanência por mais tempo dos corpos de prova no ambiente atmosférico, provavelmente levaria a uma perda de massa considerável. É notado que o tipo de corrosão característico nos corpos de prova foi a uniforme. Segundo Oliveira (2012), este tipo de corrosão se processa em toda a extensão da superfície do metal, acontecendo perda uniforme de espessura. A visualização da peça após 32 dias do início do ensaio pode ser vista na figura 36.



Figura 36 – Peça com 32 dias no ambiente  
Fonte: Autor do trabalho

Foi verificado também que a parte inferior do corpo de prova retirada no último dia de exposição, apresentou uma propagação de corrosão muito menor do que a superfície superior da peça. Isso se deu pelo fato de que a área inferior não estava sujeita a ação da chuva, diferentemente do outro lado em que a água escoava pela sua superfície. A área inferior do corpo de prova pode ser visto na figura 37.



Figura 37 – Parte inferior do corpo de prova após 32 dias  
Fonte: Autor do trabalho

### 5.3. Resultado do ensaio de corrosão por imersão

Após o ensaio acelerado por imersão, pode-se observar na figura 38 o estado do corpo de prova quando foi submetido a uma duração de 48 horas, em uma solução de 3% de NaCl. É notado também que a coloração da solução apresentou uma alteração se mostrando amarelada. Essa alteração de cor se deve a solubilização dos produtos de corrosão na solução.

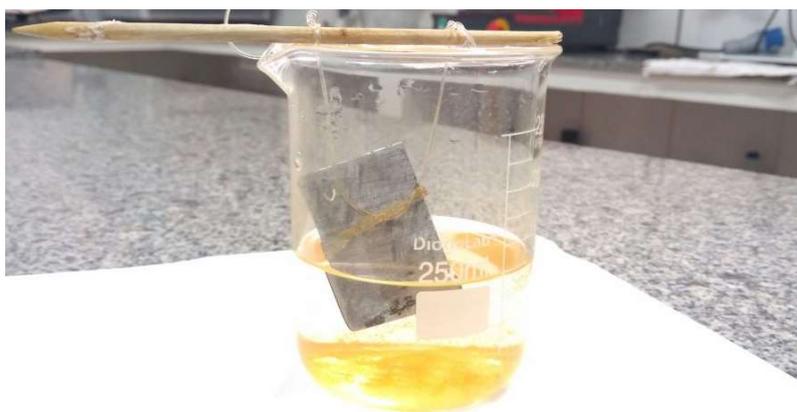


Figura 38 – Estado do corpo de prova após o ensaio  
Fonte: Autor do trabalho

E a situação da peça logo depois da limpeza superficial está sendo ilustrada na figura 39. É possível perceber que a peça após a realização do ensaio apresentou uma corrosão em forma de filamentos, não sendo tão profundos e se propagando a partir de finas escavações na peça.



Figura 39 – Estado do corpo de prova após o ensaio e da limpeza superficial  
Fonte: Autor do trabalho

Desta forma, a partir da realização do ensaio foi possível verificar que ocorreu uma perda de massa considerável no corpo de prova. Na qual, foi verificado que a peça perdeu 1,0071 gramas de massa. Isto foi obtido a partir da diferença entre a pesagem do material antes e depois do ensaio. As figuras 40 e 41, respectivamente, ilustram as diferentes massas do corpo de prova antes e depois do teste.



Figura 40 – Pesagem do corpo de prova antes do ensaio  
Fonte: Autor do trabalho



Figura 41 – Pesagem do corpo de prova depois do ensaio  
Fonte: Autor do trabalho

Diante da obtenção da perda de massa, foi determinada a taxa de corrosão a partir dos parâmetros que a peça esteve sujeita. Desta forma, através da utilização da fórmula chegou-se à conclusão que a taxa de degradação para o aço A-36 foi 0,3228 mm/ano. A norma NACE RP 0775/87, estabelece uma classificação da corrosividade em relação à taxa de corrosão, conforme a figura 42. Desse modo, foi diagnosticado que o grau de corrosividade desse ensaio é severo, pois sua taxa de corrosão é maior que 0,25.

<b>Taxa de corrosão uniforme (mm/ano)</b>	<b>Taxa de pite (mm/ano)</b>	<b>Corrosividade</b>
< 0,025	< 0,13	Baixa
0,025 a 0,120	0,130 a 0,200	Moderada
0,130 a 0,250	0,210 a 0,380	Alta
> 0,250	> 0,380	Severa

Figura 42 - Classificação do grau de corrosividade  
Fonte: NORMA NACE RP 0775/87

Para efeito de informação foi encontrado o Ph da solução sem o metal, através da utilização de uma fita calorimétrica. Assim a medição de acidez no meio resultou em 6, não sendo uma solução ácida.

## 6. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos através da realização das pesquisas bibliográficas, da inspeção visual e do experimento, é possível perceber que as torres de telecomunicações estão sujeitas a deterioração, devido aos meios corrosivos que afetam diretamente essas estruturas.

Desta maneira, verificou-se através da análise por inspeção visual que a torre visitada encontrava alguns pontos propícios e facilitadores da ocorrência de corrosão, pois foram encontrados locais estratégicos que são capazes de reter pó e água, sendo meios agressivos e primordiais para darem início ao processo de corrosão. Desta forma, é recomendável que se evite estes locais que proporcionam a degradação do material e também uma aplicação de proteção anticorrosiva eficiente que iniba tal processo, principalmente nas frestas e cordões de soldas.

Através da realização do ensaio não acelerado de campo pode-se notar que ao passar do tempo à propagação uniforme da corrosão nos corpos de prova só aumentava. Pois estavam em contato direto com ambiente de serviço, simulando as condições que estão expostas as torres de telecomunicações. Assim, pode-se perceber que houve uma rápida propagação da corrosão no material, em pouco tempo de exposição.

O ensaio acelerado por imersão mostrou ser muito eficiente na aceleração da corrosão, precisando apenas de 48 horas para proporcionar uma diferença de massa entre as amostras. Assim, através desta simulação em ambiente marítimo diagnosticou que o teste, conforme os parâmetros adotados possui alta corrosividade. Desta maneira o aço utilizado não suportaria por muito tempo as condições imposta no experimento.

Como proposta de trabalhos futuros, seria interessante para complemento deste projeto, a verificação do comportamento da corrosão utilizando diferentes tipos de materiais. E também submetê-los, através de ensaio por imersão, em maiores tempos de testes ou até mesmo simulando condições de frestas, para que assim obtivesse os resultados de perda de massa.

Enfim, com os resultados obtidos, pode-se perceber que o material A-36 que é o mais utilizado na fabricação das torres de telecomunicações, possui pouca resistência à corrosão, pois foi verificado a partir dos testes que a propagação do produto de corrosão é bastante relevante. Desta maneira, é essencial a aplicação de um método de proteção anticorrosiva no material das torres.

## REFERÊNCIAS

ABDALLA, H. A. **Assessment of damages and repair of antenna tower concrete foundations**. Construction and Building Materials, 2002.

Alvarenga, E. A.; Carneiro, R. A.; Miranda, F. J. F.; **Ensaio de Corrosão para a Indústria Automobilística**, Society of Automotive Engineers, Inc., 2001.

AMARAL, Cristiano torres et al. **Corrosão em estruturas metálicas: uma breve discussão acerca da prevenção em torres de Telecomunicações**, 2008: 7f. Centro Universitário de Belo Horizonte, Belo Horizonte, 2008. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.18674/exacta.v1i1.211>> Acesso em: 09 de setembro de 2016.

AMORIM, Simone Cezar de. **O foco na corrosão**. 2012. 43f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, 2012.

ANATEL – AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, 2014. Disponível em: < [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br)>. Acesso em: 16 de março de 2017.

ASTM –American Society for testing Materials. ASTM G 31 – 72 - Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. In: Annual Book of ASTM Standards,1999.

BATISTA, S. R. F. et al. **Resistência à corrosão de aços inoxidáveis duplex conformados por spray. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Caxias do Sul - RS. 2011.

BRAVIM, Eduardo C. **Estudo da aplicação de materiais orgânicos em meios corrosivos do o processamento primário do petróleo**. 2009. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Estadual do Rio grande do Sul, Porto Alegre, pp. 30-33.

DUTRA, A.C. e NUNES, L.P. **Proteção catódica - Técnica de combate à corrosão**. Rio de Janeiro: Editora Técnica, 1987.

FRAUCHES-SANTOS, C. et al. A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 2, p. 293-309, 2013.

GELLINGS, P. J. **Introduction to Corrosion Prevention and Control**. Delft University Press, 1985.

GEMELLI, Enori. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos editora, 1996.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4ª Ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos editora, 2003.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6ª Ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos editora, 2012.

HOFFMAN, João Nelson. **Proteção contra corrosões nas fundações das torres de telecomunicações Utilizando energia induzida pelo cabo elétrico da linha de transmissão**. In: Espaço e energia, ed.2. Curitiba: COPEL, 2005.

LOMBARDI, C. C. M., **Estudo comparative da influência da fase ferrita sobre o comportamento de corrosão de aços inoxidáveis austeníticos**. Tese de M.c, IPEN, São Paulo, Brasil.

NACE Standard TM-01-69, National Association of Corrosion Engineers. March, 1969.

NUNES, L.P. e LOBO, A.C.O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1987.

NUNES, Laerce de Paula. **Fundamentos de resistência à corrosão**. Rio de Janeiro: Interciência: IBP: ABRACO, 2007

OLIVEIRA, Antônio Roberto de. **Corrosão e tratamento de superfícies**. Belém: IFMA; Sanra Maria: UFSM, 2012. 104 p.

POLITO, Giulliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 2006. 191f. Monografia ( Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

POURBAIX, M. **Lições de corrosão eletroquímica**, 3º ed., CEBELCOR, Bruxelas, 1987, pp. 1-5, 250 – 360

RAMANATHAN, L.V. **Corrosão e seu controle**. São Paulo: Hemus Editora Ltda, 1987.

SERRA, Eduardo Torres. **Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2014.

SHREIR, L. L. **Corrosion**, vol. 1, “Metal/Environment Reactions”, Newnes-Butterworths, London, 1978, pp. 2-7.

TRIDAPALLI, Claudia Wagenfuhr. **Estudo comparativo de metodologias de ensaios acelerados de corrosão por frestas nas ligas de aço inox AISI 430 e AISI 304**. 2011. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

ZAMPIRON, I. **Avaliação das características e desempenho de estruturas para telecomunicações visando o projeto de novo modelo de torre autoportante**. Tese (Mestrado em engenharia) - PPEC/ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.