

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ FELIPE COSTA MENDES

**ANÁLISE E DIAGNOSE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVOS
MAIS EFETIVOS APLICADOS ÀS TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES**

São Luís

2017

ANDRÉ FELIPE COSTA MENDES

**ANÁLISE E DIAGNOSE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVOS
MAIS EFETIVOS APLICADOS ÀS TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES**

Projeto de trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Estadual do Maranhão, para o curso de graduação em Engenharia Mecânica, como requisito para a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso.

**Orientador: Prof. MSc. Francismar
Rodrigues de Sousa**

São Luís

2017

Mendes, André Felipe Costa.

Análise e diagnose dos sistemas de proteção anticorrosivos mais efetivos aplicados às torres de telecomunicações. / André Felipe Costa Mendes. – São Luís, 2017.

65 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. 4. Ensaio por imersão. I. Título.

CDU 621:693.8

**ANÁLISE E DIAGNOSE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVOS
MAIS EFETIVOS APLICADOS ÀS TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES**

ANDRÉ FELIPE COSTA MENDES

Monografia aprovada em: 26 de junho de 2017.

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

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

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

Dedico a Deus, aos meus pais Marco André e Kátia Cristina, pois sempre forneceram todas as condições necessárias para minha formação, a minha esposa Jenneffer Mendes por todo carinho e motivação, aos meus irmãos Jhonny e Andressa, a meus avós Raimundo Lima e Maria da Conceição.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e pela capacitação durante todos esses anos de estudo. Sem Deus eu não conseguiria alcançar nenhum dos meus objetivos, sem Ele eu não seria ninguém.

Agradeço aos meus pais, por sempre depositarem confiança em mim, por sempre estarem ao meu lado e por nunca medirem esforços para me ajudar de todas as formas possíveis. Todo carinho e expectativas postas sobre mim teve grande valência, se hoje estou bem próximo da conclusão do curso de engenharia mecânica é graças aos meus pais Marco André e Kátia Cristina.

Agradeço a minha esposa Jenneffer Mendes por sempre me motivar a nunca desistir e sempre ir à luta para conquistar os meus objetivos. Sou grato a Deus por ter me dado esta esposa linda e incrível.

Agradeço a todos meus familiares, em especial, aos meus irmãos Jhonny e Andressa, aos meus avós Maria da Conceição e Raimundo Lima, ao meu cunhado Herberth Brandão, aos meus sobrinhos Victor e Ághata, ao meu primo Márcio Mendes por toda ajuda e por confiar sempre em mim, aos meus sogros Agnólia e Miguel por todo carinho e credibilidade depositada sobre mim em todos esses anos.

Agradeço ao meu orientador professor Me. Francismar Rodrigues de Sousa pelos ensinamentos e confiança depositada para este projeto de conclusão de curso e pela bolsa de iniciação científica como voluntário concedida através do PIVIC.

Agradeço ao professor Thiago Aguiar Santos pelo apoio e pela disponibilização do seu tempo para realização dos ensaios para obtenção dos resultados finais desse projeto. Deu grande apoio para que pudesse finalizar este T.C.C.

Agradeço aos meus amigos da minha turma da UEMA, que me acompanharam durante esses 5 (cinco) anos de curso, por todas as horas de estudos e pelas grandes amizades criadas durante esse tempo.

Agradeço ao amigo de turma Diego Silva por termos desenvolvidos em parceria o projeto de iniciação científica e o projeto desse T.C.C.

Agradeço a UEMA por todos esses anos de aprendizados e vitórias conquistadas. Apesar de não possuímos uma grande estrutura temos grandes educadores.

Agradeço a equipe bumba-meu-baja da UEMA pelos anos que participei do projeto, pelos conhecimentos adquiridos e pelo aprendizado de como trabalhar em equipe.

Agradeço a todos que me ajudaram de forma direta ou indireta a alcançar os meus objetivos. Serei sempre grato a todos vocês.

“Não temas, porque eu sou contigo; não te assombres, porque eu sou teu Deus; eu te fortaleço, e te ajudo e te sustento com a destra da minha justiça”.

Bíblia Sagrada

RESUMO

As torres de telecomunicações são estruturas utilizadas para facilitar a propagação de ondas sonoras através de longas distâncias, facilitando assim a divulgação de sinal sem interferências. Estas estruturas são construídas geralmente de metais e esta escolha ocorre devido as suas propriedades, como por exemplo, boa soldabilidade, alta resistência mecânica e por simples manutenções periódicas. Entretanto, os metais estão sujeitos ao fenômeno da corrosão em sua estrutura e se não for controlada poderá causar grandes prejuízos. Entender o que é a corrosão e como ela se propaga traz grande benefício para se determinar qual proteção anticorrosiva é a mais adequada para cada situação e se tratando de torres de telecomunicações as principais proteções são através dos processos de galvanização e de pinturas industriais. Com a realização de inspeções visuais encontrou-se pontos propícios para o surgimento da corrosão na torre de telecomunicação avaliada da VIVO e a partir da aplicação do ensaio de corrosão acelerado por imersão pôde-se determinar a efetividade do uso da proteção por esmalte sintético *standard* no aço A-36 e assim validar o uso desse tipo de proteção.

Palavras-chave: Torres de telecomunicações. Corrosão. Proteção anticorrosiva. Ensaio por imersão.

ABSTRACT

Telecommunication towers are structures used to facilitate the propagation of sound waves over long distances therefore facilitating the signal disclosure without interference. These structures are generally constructed of metals and this choice occurs because of their properties, such as good weldability, high mechanical strength and for simple periodic maintenance. However, metals are subject to the phenomenon of corrosion in their structure and if not controlled can cause great damage. Understanding what is corrosion and how it spreads brings great benefit to determine which anticorrosion protection is most appropriate for each situation and in the case of telecommunications towers the main protections are through the processes of galvanization and industrial paints. By performing visual inspections, it was found favorable points for the appearance of corrosion in the telecommunication tower evaluated at VIVO and with the application of the accelerated corrosion test by immersion it was possible to determine the effectiveness of the use of the protection by *standard* synthetic enamel in the A-36 steel and thus validate the use of this type of protection.

Keywords: Telecommunications towers. Corrosion, Corrosion protection, Immersion test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Torres em Telecomunicações: Autoportante (esquerda) e Estaiada (direita)	20
Figura 2 – Corrosão Generalizada em uma torre metálica	21
Figura 3 – Processo Metalúrgico	23
Figura 4 – Esquema de pilha eletroquímica.	25
Figura 5 – Corrosão galvânica entre o tubo de aço carbono e a válvula feita de latão	27
Figura 6 – Pilha de concentração iônica.....	29
Figura 7 – Esquema de pilha de aeração diferencial	30
Figura 8 – Corrosão Uniforme.....	33
Figura 9 – Corrosão Galvânica.....	33
Figura 10 – Corrosão Puntiforme	34
Figura 11 – Corrosão em Ranhuras	35
Figura 12 – Corrosão por Frestas	36
Figura 13 – Corrosão em torno do Cordão de Solda	37
Figura 14 – Proteção Catódica Galvânica	39
Figura 15 – Proteção Catódica por Corrente Impressa.....	40
Figura 16 – Processo de passivação do aço inox.....	41
Figura 17 – Esquematização da Proteção Anódica	41
Figura 18 – Galvanização: Camadas de zinco.....	42
Figura 19 – Representação das tintas que compõem um esquema de pintura.....	44
Figura 20 – Fluxo de desenvolvimento do projeto	47
Figura 21 – Especificações da torre de telecomunicação da VIVO	48
Figura 22 – Estrutura Atual da Torre 1.....	49
Figura 23 – Estrutura Atual da Torre 2.....	49
Figura 24 – Condição Atual da Torre 3 - Uma das Bases	50
Figura 25 – Condição Atual da Torre 4 - Parte Central.....	50
Figura 26 – Condição Atual da Torre 5 - Cantoneiras e parafusos	50
Figura 27 – Condição Atual da Torre 6 - Base Total	50
Figura 28 – Dimensões do corpo de prova.....	52
Figura 29 – Balança de precisão - Peso do corpo de prova.....	52

Figura 30 – Corpo de prova no béquer	53
Figura 31 – Corpo de prova submerso com solução aquosa com 3% de NaCl.....	53
Figura 32 – Estufa utilizada para o ensaio.....	54
Figura 33 – Parte interna da estufa com o corpo de prova	55
Figura 34 – Acúmulo de água em uma das bases.....	56
Figura 35 – Frestas 1 - contato superfície com superfície.....	56
Figura 36 – Frestas 2 - contato superfície com superfície.....	56
Figura 37 – Cordão de Solda	56
Figura 38 – Escala de pH.....	58
Figura 39 – Nível de pH - (esquerda) Meio sem metal; (direita) Meio com metal	58
Figura 40 – Resultado após o ensaio	59
Figura 41 – Volume e coloração após o ensaio	59
Figura 42 – Corpo de prova após a realização do ensaio	60
Figura 43 – Peso final da chapa após a realização do ensaio	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ligas de aço utilizadas em torres	22
Tabela 2 - Tabela Prática em Água do Mar	26
Tabela 3 – Composição do Aço A-36	51

LISTA DE SÍMBOLOS

C	- carbono
Cu	- cobre
Fe	- ferro
fem	- força eletromotriz
g	- grama
h	- hora
m	- metro
mm	- milímetro
Mn	- manganês
NaCl	- cloreto de sódio
OH ⁻	- hidroxila
P	- fósforo
pH	- potencial hidrogeniônico
S	- enxofre
V	- volts
%	- por cento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos.....	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	Justificativa	18
2	TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES.....	20
2.1	Metais utilizados para construção das Torres de Telecomunicações	21
3	CORROSÃO	23
3.1	Íons, oxidação, redução.....	24
3.2	Pilha Eletroquímica	24
3.2.1	Pilha de Eletrodos Metálicos Diferentes	27
3.2.1.1	Pilha ativa-passiva	28
3.2.1.2	Pilha de ação local	28
3.2.2	Pilhas de Concentração	28
3.2.2.1	Pilha de concentração iônica	28
3.2.2.2	Pilha de aeração diferencial.....	29
3.3	Meios corrosivos em Torres de Telecomunicações.....	30
3.3.1	Atmosfera	30
3.3.2	Águas naturais	31
3.3.3	Solo.....	31
3.4	Formas de Corrosão	32
3.4.1	Uniforme	32
3.4.2	Galvânica.....	33
3.4.3	Sobre tensão	34
3.4.4	Puntiforme ou por pite.....	34
3.4.5	Em Ranhuras	35
3.4.6	Por frestas	35
3.4.7	No cordão de solda.....	36
4	PROTEÇÕES ANTICORROSIVAS.....	38
4.1	Proteção Catódica.....	38
4.1.1	Proteção Catódica Galvânica.....	38

4.1.2	Proteção Catódica por Corrente Impressa	39
4.2	Proteção Anódica.....	40
4.3	Galvanização ou zincagem por imersão a quente.....	42
4.4	Pinturas	43
5	ENSAIOS DE CORROSÃO ACELERADOS	45
5.1	Ensaio de resistência a corrosão por névoa salina.....	45
5.2	Ensaio de resistência a corrosão por imersão	46
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
6.1	Etapa 1 – Revisão bibliográfica.....	47
6.2	Etapa 2 – Escolha da Torre de Telecomunicação.....	48
6.3	Etapa 3 – Inspeção visual da Torre de Telecomunicação	49
6.4	Etapa 4 – Realização do Ensaio de Corrosão Acelerado – Por imersão ...	51
6.4.1	Passo 1: Material a ser utilizado como corpo de prova.....	51
6.4.2	Passo 2: Preparação do corpo de prova para o ensaio	52
6.4.3	Passo 3: Inserindo uma solução aquosa	53
6.4.4	Passo 4: Inserido na estufa	54
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
7.1	Inspeções Visuais	56
7.2	Nível de acidez da solução.....	57
7.3	Ensaio por imersão.....	59
8	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, a transmissão de sinal a longas distâncias tornou-se fundamental para divulgar ou receber informações. E para ter essa divulgação de forma “limpa”, ou seja, sem que haja interferências, foi necessário utilizar estruturas metálicas de grande porte com alta elevação. As antenas para transmissão são fixadas na parte superior das torres metálicas, possibilitando assim uma melhor troca de dados. Através dessas grandes estruturas pode-se trocar informações por intermédio das ondas eletromagnéticas de forma eficiente, pois dessa maneira as ondas não encontram obstáculos físicos significativos.

As torres de telecomunicações estão diretamente envolvidas com o nosso dia-a-dia, pois através delas pessoas escutam à rádio, assistem à televisão, falam ao celular além de utilizarem o meio de comunicação mais popular atualmente, isto é, a internet.

Além de possuírem alturas elevadas, as torres de telecomunicações devem ser postas em locais privilegiados topograficamente, ou seja, devem possuir uma visão direta tanto para receber quanto para enviar informações. Por portarem grandes alturas e por terem um peso elevado, essas estruturas geralmente são feitas de metais, pois estes fornecem uma boa resistência mecânica, facilidade para montagem, além de fornecerem uma alta taxa de confiabilidade, durabilidade e um baixo custo em manutenções (Hoffmann, 2005).

Entretanto as estruturas metálicas ficam expostas ao meio ambiente, ficando sujeita as variações climáticas ao longo dos anos. A partir dessa exposição surge um fator adverso que visa diminuir a durabilidade das torres, isto é, a estrutura começa a sofrer o fenômeno corrosivo.

A corrosão trata-se de um processo espontâneo e dessa forma se faz necessário o emprego de mecanismo protetores visando aumentar a vida útil da estrutura metálica. E se não existissem as proteções anticorrosivas, a deterioração iria atingir 100% da estrutura trazendo assim um enorme prejuízo as empresas.

As causas mais significativas para o surgimento da corrosão em estruturas metálicas são a atmosfera, principalmente pela presença de poeira, a constante variabilidade da umidade do próprio meio ambiente e os gases corrosivos, como o gás carbônico (CO_2), anidrido sulfuroso (SO_2), anidrido sulfúrico (SO_3) e outros gases NO_x . Outros fatores também devem ser levados em consideração, como o tempo de vida da estrutura, se está sendo ou não

empregado uma proteção anticorrosiva, se a medida protetiva está sendo efetiva, se existem ferro-bactérias e aeração diferencial (Brink, 2004).

Sabendo que a corrosão, geralmente, é um fenômeno de superfície faz supor que ela possa ser controlada pelas propriedades do produto da corrosão. Dessa forma, o composto metálico formado atuará como uma barreira protetora entre o meio corrosivo e o metal, diminuindo assim a velocidade de corrosão do metal. (Gentil, 2012)

No mundo, um quinto da produção mundial de aço tem como finalidade repor as perdas geradas pela corrosão. No Brasil, estipulam um prejuízo de US\$ 10 bilhões, tendo como alvo principal a indústria petrolífera e isso se dar pelo fato das estruturas navais estarem em contato diretamente com o mar, ou seja, a salinidade é um grande agravante para a propagação da corrosão. Gentil (2012) menciona que as perdas econômicas referentes ao fenômeno da corrosão podem ser classificadas como diretas e indiretas. As perdas diretas estão relacionadas com o custo de substituição de peças ou equipamentos que sofreram corrosão, sendo incluso nesse custo a mão de obra e a energia utilizada para essas substituições. Já as perdas indiretas abordam principalmente o desgaste excessivo das nossas reservas de recursos minerais causado pela dependência de se fabricar novas peças para construir e substituir estruturas que foram deterioradas pelo processo corrosivo.

Para reduzir os prejuízos oriundos da corrosão, ao longo do tempo, buscam-se constantemente proteções anticorrosivas eficientes. Uma possibilidade de aumentar a resistência a corrosão é utilizar metais mais resistentes para a fabricação das estruturas, mas em contrapartida os metais que apresentam essa maior resistência possuem um custo elevado, fazendo com que assim se torne uma medida inviável.

Após a finalização deste projeto, entender-se-á como acontece a corrosão e quais são os fatores que aumentam a sua propagação. Entretanto, buscar-se-ão dentre todas as proteções anticorrosivas existentes as mais efetivas para estruturas metálicas, visando assim obter uma maior vida útil para estrutura. Utilizando-se o ensaio de corrosão acelerada por imersão determinar-se-á a efetividade do uso de proteção anticorrosiva imposta sobre um corpo de prova de aço A-36.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

- Analisar as principais causas da corrosão em estruturas metálicas e estabelecer o sistema ou sistemas de proteções anticorrosivos mais efetivos para os metais componentes das torres de telecomunicações.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar os fatores que propiciam o surgimento da corrosão;
- Determinar os tipos de corrosão existentes;
- Analisar e classificar os vários métodos de proteção dos metais sob o efeito da corrosão;
- Realizar ensaio para validar o uso de proteção anticorrosiva;
- Comparar os resultados encontrados com os da literatura.

1.2 Justificativa

O projeto abordará os procedimentos básicos necessários para garantir a prevenção dos processos corrosivos em estruturas metálicas utilizadas em torres de telecomunicações. Para tanto, é evidente a importância de se estudar reações de oxidações e redução nos metais, bem como seus reflexos na sociedade moderna. Trata-se de um campo de pesquisa que pode ser explorado em trabalhos futuros, contribuindo de maneira mais relevante para redução de custos com o projeto, montagem e manutenção das estruturas metálicas que compõe as torres de telecomunicações.

Para que as estruturas metálicas proporcionem uma longa durabilidade e ofereça desempenho satisfatório, se faz necessário entender os processos corrosivos e como eles agem. Dessa forma, ao utilizar proteções anticorrosivas efetivas nas estruturas metálicas evitará o surgimento possíveis danos a estrutura, gerando assim um maior tempo de vida, resultando em menor investimento ao se tratar de reparos e manutenções.

Espera-se, com este projeto, que haja uma modificação no perfil de acompanhamento comportamental das estruturas metálicas das torres de transmissão instaladas

na ilha de São Luís, contemplando as três variáveis abordadas, ou seja, aspectos econômicos, ambientais e sociais. Esta melhoria, poderá ser quantificada dentro de uma visão de sustentabilidade, a qual poderá ser ampliada com as pesquisas de novos produtos e novas utilizações.

2 TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES

As torres de telecomunicações são criadas em função de vários aspectos técnicos, tendo como finalidade de fixar as antenas na parte superior da sua estrutura. Além disto, ficam expostas ao meio ambiente e sujeitas a variações climáticas por um longo período de tempo (Amaral, 2008).

As ondas eletromagnéticas, utilizadas com frequência em telecomunicações, possuem algumas limitações físicas, principalmente em frequências elevadas, as quais dificultam sua passagem por obstáculos físicos expressivos. Esse fenômeno trata-se de um princípio físico conhecido como radiovisibilidade (Barradas, 1978).

Para Amaral (2008), as antenas que possuem a fonte emissora das ondas de rádio necessitam “enxergar” as antenas receptoras de seus sinais. As torres mais comuns utilizadas em telecomunicações são às autoportantes e as estaiadas, estas podem ser vistas, respectivamente, na Figura 1.



Figura 1 – Tipos de Torres em Telecomunicações: Autoportante (esquerda) e Estaiada (direita)

Fonte: TOWER TELECOM (esquerda) e JBT TELECOM (direita)

As torres ficam exposta ao meio ambiente, sujeitando-se às situações climáticas ao longo do tempo e está interferência possibilita o surgimento da corrosão em sua estrutura, conforme pode ser observado na figura 2.



Figura 2 – Corrosão Generalizada em uma torre metálica

Fonte: Portal Alerta Burití

Conhecido popularmente como “ferrugem”, a corrosão causa danos as estruturas metálicas das torres de telecomunicações, causando imensuráveis prejuízos para o setor. Neste processo, as torres podem sofrer com abalos em sua estrutura física, agravados pela ação dos ventos, ou mesmo com a mudança dos ângulos de irradiação das antenas pelo seu entortamento, ou seja, propiciando um déficit no seu rendimento final (Amaral, 2008).

2.1 Metais utilizados para construção das Torres de Telecomunicações

Para fabricar torres de telecomunicações utilizam-se, geralmente, ligas de aço especiais e esta escolha ocorre devido as inúmeras vantagens encontradas, como por exemplo, alta resistência mecânica, baixo peso, economia em relação a utilização dos materiais componentes das torres, entre outros. As várias diferenças nas composições das ligas de aço têm por objetivo principal buscar qual liga se apresentará de forma mais eficiente, ou seja, qual será mais resistente a corrosão.

A tabela 1 mostra a composição das ligas de aço comumente utilizadas em torres de telecomunicações.

Tabela 1 – Ligas de aço utilizadas em torres

	COR-TEN A	COR-TEN B	COR-TEN C	NTU-SAC-50-1	Aço Carbobo
C	0,12 (máx)	0,10- 0,19	0,12- 0,19	0,12 (máx)	0,16
Mn	0,20-0,50	0,90- 1,25	0,90- 1,35	0,90	0,63
P	0,07-0,15	0,040 (máx)	0,040 (máx)	0,06- 0,12	0,012
S (máx)	0,050	0,050	0,050	0,035	0,031
Si	0,25-0,75	0,15- 0,30	0,15- 0,30	0,15- 0,35	0,012
Cu	0,25-0,55	0,25- 0,40	0,25- 0,40	0,25- 0,50	0,01
Cr	0,30-1,25	0,40- 0,65	0,40- 0,70	-	0,03
Ni	0,65 (máx)	-	-	-	0,01
V	-	0,0,2- 0,10	0,04- 0,10	-	-
Ti	-	-	-	0,15 (máx)	-

Fonte: (Amaral, 2008)

Como forma preventiva, após a escolha da liga de aço a ser utilizada para construção da torre, utiliza-se como processo de proteção anticorrosiva a galvanização, e este processo consiste em revestir todas as peças da torre por zinco. A galvanização atualmente é uma das técnicas mais utilizada devido a seu elevado grau de eficácia (Amaral, 2008).

Se fossem utilizados aços sem nenhuma forma de revestimento ou proteção, a velocidade de corrosão ao longo de sua estrutura aumentaria drasticamente. Dessa forma, ao submeter um metal ao processo de galvanização sua resistência a corrosão irá aumentar de maneira bem acentuada.

Devido ao seu baixo custo e por proporcionar ótimos benefícios, o aço A-36 tem sido utilizado comumente para a fabricação das torres de telecomunicações e para aumentar ainda mais seu rendimento, esse aço tem sido submetido ao processo de galvanização.

3 CORROSÃO

Num aspecto muito propagado e aceito em todo mundo, pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associado ou não a esforços mecânicos (Gentil, 2012).

Os metais nobres como ouro, platina e prata são encontrados na natureza na forma estável, ou seja, com grande tendência a permanecer em seus estados naturais (forma metálica), os demais metais são encontrados na forma de minério, e necessitam passar por um processo de recebimento de energia para se transformarem na forma de um metal (Helene, 1993).

De forma geral, Gentil (2007) menciona que em alguns casos pode-se entender a corrosão como a perda de energia do metal, retornando desta forma para o seu estado mais estável, o minério. Um esquema para melhor compreensão pode ser observado na figura 3.

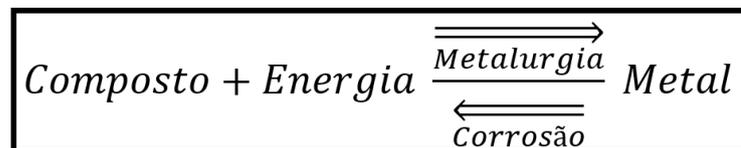


Figura 3 – Processo Metalúrgico

Fonte: Gentil (2007)

Como no fenômeno da corrosão estão envolvidos conhecimentos eletroquímicos, é de grande importância ter noções básicas sobre oxirredução. Gentil (2012) menciona que em uma reação de oxirredução, observa-se que o elemento oxidado perde elétrons e age como redutor, já o elemento reduzido ganha elétrons e age como oxidante.

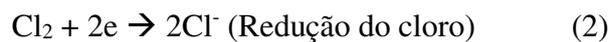
Entender a corrosão é fundamental para poder controlá-la, ou seja, através desse entendimento pode-se controlar a corrosão em materiais que se deseja proteger adotando outros materiais como proteção.

Existem três tipos de corrosões (química, eletroquímica e eletrolítica), que podem ou não ocorrer em metais, ocorrendo também com concreto e com polímeros. Fogaça (2017) cita que na corrosão química ocorre um ataque de um agente químico sobre o material, sendo que este material pode ou não ser de metal. Um fato importante é que na corrosão química não

se faz necessário a presença de água e não existe transferência de elétrons. A corrosão eletroquímica é a mais comum, ocorrendo com os metais geralmente na presença de água. E por fim, a corrosão eletrolítica é um processo que ocorre mediante a aplicação externa de uma corrente elétrica, ou seja, trata-se de um processo não espontâneo.

3.1 Íons, oxidação, redução

Nos átomos estáveis o número de prótons é igual ao de elétrons, quando os números forem diferentes o sistema ficará eletricamente carregado, se ele ganhar elétrons será um íon negativo, ou seja, um ânion. Quando existir a perda de elétrons ele será um íon positivo, ou seja, um cátion. Dessa forma, Gentil (2012) classifica a oxidação como um processo de perda de elétrons e a redução como um processo de ganho de elétrons. A seguir temos dois exemplos, um representa o processo de oxidação (1) e o outro o processo de redução (2).



3.2 Pilha Eletroquímica

Entender as pilhas eletroquímicas é de grande importância quando se trabalha com corrosão, pois através desse entendimento pode-se identificar os elementos envolvidos e assim poder modificar a corrosão de um determinado material para outro (Gentil, 2012). O metal mais ativo na tabela potencial de eletrodo funcionará como anodo da pilha, ou seja, irá ceder elétrons e assim será corroído.

Basicamente para ocorrer a formação de uma pilha eletroquímica tem que possuir os seguintes componentes:

- a) Anodo: eletrodo em que há oxidação, ou seja, é o material que perde elétrons;
- b) Eletrólito: responsável para conduzir a corrente elétrica do anodo para o catodo, ou seja, ele é condutor que contém íons;

- c) Catodo: eletrodo que sofre a redução pelos elétrons oriundos do eletrólito;
- d) Circuito metálico: nele ocorre os deslocamentos dos elétrons por intermédio de uma ligação metálica entre o anodo e o catodo.

Nesse sistema, se algum dos quatro componentes forem omitidos eliminar-se-á a pilha, diminuindo assim a possibilidade de ocorrer a corrosão. A figura 4 mostra a esquematização da pilha eletroquímica.

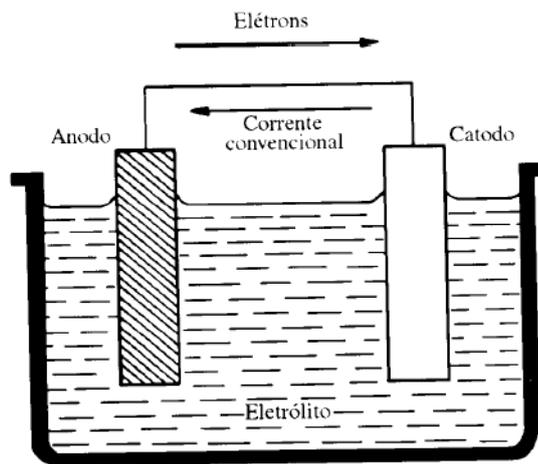


Figura 4 – Esquema de pilha eletroquímica.

Fonte: Gentil (2007)

Na representação de uma pilha, utiliza-se o anodo à esquerda e o catodo à sua direita (Fig. 4). Segundo Gentil (2007) a força eletromotriz (fem) é representada pela convenção de sinais da IUPAC, igual a:

$$E_{\text{pilha}} = E_{\text{catodo}} - E_{\text{anodo}}$$

Onde E_{catodo} e E_{anodo} são os potenciais de redução dos eletrodos.

A tabela 2 mostra os principais metais e ligas usados em ordem do maior ao menor em relação a sua tendência a sofrer corrosão.

Tabela 2 - Tabela Prática em Água do Mar

Extremidade anódica menos nobre (corrosão)		
1. Magnésio	16. Aço AISI 304	31. Cupro-Níquel 70/30 (alto teor de ferro)
2. Ligas de magnésio	17. Aço AISI 316 (ativo)	32. Níquel (passivo)
3. Zinco	18. Chumbo	33. Inconel (passivo)
4. Alclad 38	19. Estanho	34. Monel
5. Alumínio 3S	20. Níquel (ativo)	35. Hastelloy C
6. Alumínio 61S	21. Inconel (ativo)	36. Aço AISI 410 (passivo)
7. Alumínio 63S	22. Metal Muntz	37. Aço AISI 430 (passivo)
8. Alumínio 52	23. Latão Amarelo	38. Aço AISI 304
9. Cádmio	24. Latão Almirantado	39. Aço AISI 316 (passivo)
10. Aço doce	25. Latão Alumínio	40. Titânio
11. Aço baixo teor liga	26. Latão Vermelho	41. Prata
12. Aço liga	27. Cobre	42. Grafite
13. Ferro fundido	28. Bronze	43. Ouro
14. Aço AISI 410 (ativo)	29. Cupro-Níquel 90/10	44. Platina
15. Aço AISI 430 (ativo)	30. Cupro-Níquel 70/30 (baixo teor de ferro)	Extremidade Catódica mais nobre (proteção)

Fonte: Gentil (2012)

Gentil (2012) menciona que baseado em *Nernst* observa-se uma diferença de potencial entre dois eletrodos quando:

- Os eletrodos são de substâncias diferentes, portando com potenciais diferentes;
- Os eletrodos são da mesma substância, porém com soluções de concentrações diferentes;
- Os eletrodos são da mesma substância, soluções de mesma concentração, porém submetidos a diferentes pressões de gases;
- Os eletrodos estão em diferentes temperaturas.

Dentro os tipos de pilhas eletroquímicas existentes destacam-se as pilhas de eletrodos metálicos diferentes e as pilhas de concentração.

3.2.1 Pilha de Eletrodos Metálicos Diferentes

Chamada também de pilha galvânica, ela ocorre quando dois metais ou ligas diferentes estão em contato e imersos em um mesmo eletrólito. Como já mencionado, o metal mais ativo na tabela de potencial de eletrodo irá desempenhar o papel de anodo desta pilha (Abraco, 2017).

Como um caso, pode-se citar uma tubulação de aço-carbono em contato com uma válvula de latão (liga de cobre e zinco). Sabe-se que como o tubo de aço apresenta um potencial de eletrodo mais elevado agirá como anodo da pilha eletroquímica criada e como consequência se corroerá primeiro (Gentil, 2012). Este exemplo pode ser visualizado na figura 5.

A explicação para que a corrosão galvânica ocorra geralmente a partir do contato de dois metais pode ser dada da seguinte maneira:

“Processos mais severos de corrosão galvânica ocorrem próximos do contato anodo/catodo, pelo fato deste processo ser eletroquímico, o que significa dizer que o fluxo da corrente elétrica será caracterizado pelo comportamento da condutividade do eletrólito. Logo, quanto mais dificuldade tiver a corrente para circular, mais resistência haverá, resultando em menos corrosão na região crítica de contato” (Rocha, 1999, p. 14).

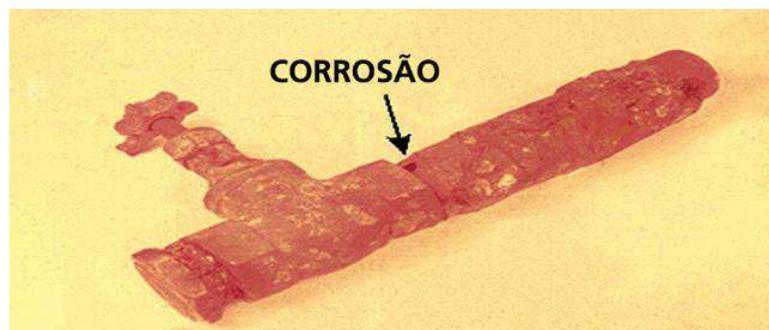


Figura 5 – Corrosão galvânica entre o tubo de aço carbono e a válvula feita de latão

Fonte: Gentil (1996)

3.2.1.1 Pilha ativa-passiva

Existem alguns metais ou ligas que possuem a tendência de se tornarem passivos em razão da formação de uma película de óxido ou algum composto insolúvel em sua superfície. Como exemplo temos o alumínio, chumbo, titânio, ferro e cromo. A passivação faz com que o material aja como área catódica. Contudo, íons como o de cloreto penetram e destroem a película e eliminam a passivação. Esta destruição não ocorre em toda a extensão da película e sim em pequenos pontos de metal ativo (anodo) circundados por grande área de metal passivado (catodos), apresentando assim uma diferença de potencial da ordem de 0,5V (Gentil, 2012).

3.2.1.2 Pilha de ação local

Ocorre a partir do contato direto entre os anodos e os catodos na presença de um eletrólito, gerando corrosão. As causas determinantes da pilha de ação local são: inclusões, segregações, bolhas, trincas, estados diferentes de tensões e deformações, acabamento superficial, diferença no tamanho e contorno de grão, tratamento térmicos diferentes, materiais de diferentes épocas de fabricação e ao gradiente de temperatura (Abraco, 2017).

3.2.2 Pilhas de Concentração

3.2.2.1 Pilha de concentração iônica

Esta pilha ocorre quando se tem um material metálico de mesma natureza, mas em contato com diferentes concentrações de um mesmo eletrólito. Abraco (2017) conclui que a parte do metal que estiver imerso na solução mais diluída será o anodo e a parte do metal que estiver imerso na solução mais concentrada será o catodo. O esquema desta pilha pode ser visualizado na figura 6.

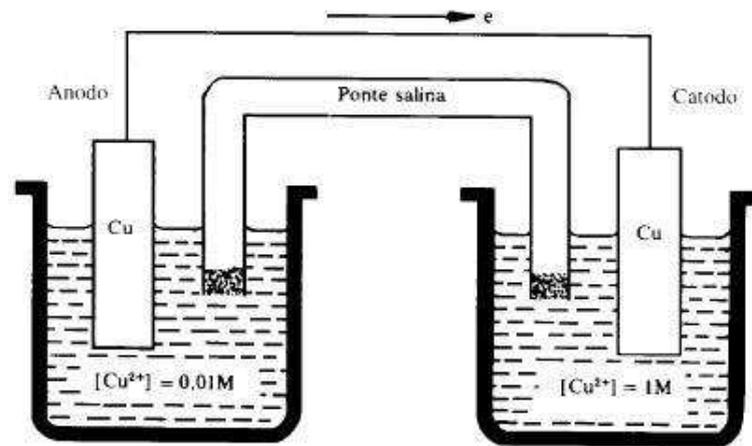


Figura 6 – Pilha de concentração iônica

Fonte: Gentil (2007)

3.2.2.2 Pilha de aeração diferencial

Esta pilha ocorre quando se tem um material metálico de mesma natureza em contato com o mesmo eletrólito, mas em locais que apresentam diferentes teores de gases dissolvidos. Ocorrendo com mais frequências em regiões diferentemente aerada, a concentração de oxigênio se origina a partir de uma diferença de potencial, sendo que, o eletrodo mais aerado funcionará como catodo e o menos aerado funcionará como anodo (Gentil, 2012).

Para Gentil (2003), as pilhas de aeração diferencial não ocorrem em metais inertes, mas sim em metais ativos como ferro, zinco, alumínio etc. O esquema desta pilha pode ser visualizado na figura 7.

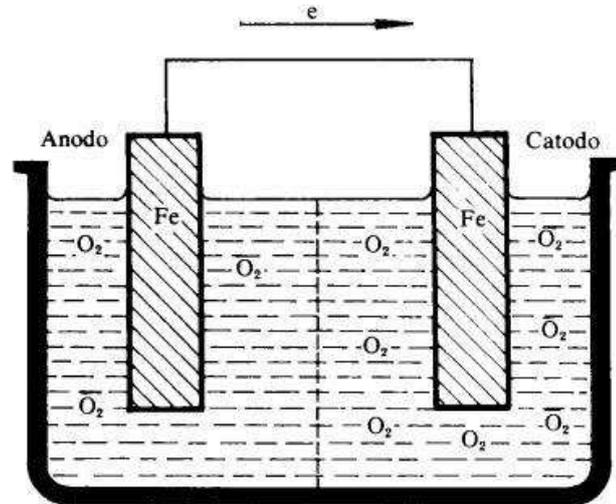


Figura 7 – Esquema de pilha de aeração diferencial

Fonte: Gentil (2003)

3.3 Meios corrosivos em Torres de Telecomunicações

A corrosão em estruturas metálicas ocorre em função das condições em qual estão submetidas. Dispostas em vários lugares, com condições climáticas variantes ao longo do tempo, destacam-se três meios mais propensos para o surgimento da corrosão: atmosfera, águas naturais e solos.

3.3.1 Atmosfera

Devido ao elevado custo com a corrosão proveniente da ação atmosférica tem-se intensificado o estudo nessa área visando encontrar um mecanismo de proteção cada vez mais eficiente. Massucatto (2012) estabelece que a ação corrosiva da atmosfera depende fundamentalmente dos fatores referentes a umidade relativa, temperatura, substâncias poluentes (particulados e gases) e do tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica.

Gentil (2012 apud Sheir, 1978 p. 2-27) classifica a corrosão atmosférica, em função do grau de umidade na superfície metálica, em seca, úmida e molhada. A **corrosão atmosférica seca** ocorre em atmosferas sem umidade, neste tipo de corrosão percebe-se uma lenta oxidação com formação do produto de oxidação. A **corrosão atmosférica úmida** ocorre em atmosferas com umidade relativa menor que 100%, neste tipo tem-se um filme de eletrólito depositado na

superfície metálica, sendo que a velocidade da corrosão depende da umidade relativa e poluentes atmosféricos. E por último, a **corrosão atmosférica molhada** ocorre em atmosferas onde a umidade relativa está próxima a 100% e ocorre condensação na superfície metálica.

3.3.2 Águas naturais

É notório que quando se coloca um material metálico na água o índice para o surgimento da corrosão cresce drasticamente. E este índice varia de acordo com as substâncias dissolvidas presentes nas águas naturais. Para Abraco (2017) as substâncias mais frequentes são: os gases dissolvidos (oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, amônia), sais dissolvidos (cloretos de sódio, de ferro e de magnésio), matéria orgânica de origem animal ou vegetal, bactérias, limos, algas e sólidos suspensos.

Considerando o caráter corrosivo que a água apresenta devem ser levados em considerações também o pH, a temperatura, a velocidade e a ação mecânica.

3.3.3 Solo

Entender o comportamento do solo agindo como meio corrosivo é de grande valia, hoje, por exemplo, existem enormes extensões de tubulações enterradas, como oleodutos, gasodutos, adutoras, entre outros. Segundo Gentil (2012), a velocidade de corrosão no solo não é muito influenciada por pequenas variações na composição ou estrutura do material metálico, sendo mais influente a natureza do solo. E essa natureza pode ser influenciada por diversas variáveis, tendo como destaque:

- Tomada de amostra – variabilidade
 - Aeração, umidade, pH;
 - Potencial redox, micro-organismos;
 - Condições climáticas.
- Características físico-químicas
 - Presença de água, sais solúveis e gases;
 - Acidez;
 - pH;

- Resistividade elétrica.

3.4 Formas de Corrosão

As formas (ou tipos) de corrosão podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos. Gentil (2007) classifica a corrosão segundo:

- A morfologia – uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular (ou intercrystalina), filiforme, por esfoliação, grafítica, dezinficação, em torno do cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- As causas ou mecanismo – por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a sollicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno de cordão de solda;
- Os fatores mecânicos – sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- O meio corrosivo – atmosférica, pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar, por sais fundidos etc.;
- A localização do ataque – por pite, uniforme, intergranular, transgranular etc.

A partir de pesquisas e por meios de inspeções visuais, as formas de corrosão mais frequentes em metais e no caso em torres de telecomunicações são as do tipo:

3.4.1 Uniforme

Denomina de generalizada, a corrosão uniforme ocorre em toda a superfície do material e provoca a deterioração da superfície uniformemente (Cascardo, 1997). A corrosão acontece quando o aço carbono é exposto em um meio agressivo e há ausência de um mecanismo protetor, tendo como principal característica a redução de massa uniforme e como resultado tem-se a redução da secção transversal do material (CESEC, 2017). A corrosão uniforme pode ser visualizada na figura 8.



Figura 8 – Corrosão Uniforme

Fonte: Portal Metálico

3.4.2 Galvânica

Ocorre a partir da utilização de metais diferente e isso resulta na formação de uma pilha eletrolítica. A diferença de potencial tem então origem no contato entre dois ou mais materiais diferentes ou nas heterogeneidades químicas de um material metálico. (Gemelli, 2014). Os metais podem agir como eletrodos e propiciar os efeitos químicos de oxidação e redução. Na figura 9, observa-se que a corrosão galvânica foi causada a partir do contato de telhas galvanizadas com a estrutura de suporte das telhas.



Figura 9 – Corrosão Galvânica

Fonte: Portal Metálico

3.4.3 Sobre tensão

Ocorre a partir da adição da tensão de tração com o meio corrosivo. As tensões são oriundas de encruamento, solda, tratamento térmico, cargas, etc. Geralmente, áreas tensionadas atuam como anodos em comparação aos outros elementos e tem uma tendência de concentrar a cessação de elétrons. A tensão tende a criar microfissuras, podendo assim causar uma fratura na peça antes detecção do problema (CESEC, 2017).

3.4.4 Puntiforme ou por pite

A corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente maior que o seu diâmetro (Gentil, 2012, p. 45).

Esse tipo de corrosão ataca materiais metálicos que formam películas protetoras passivantes, ocorrendo nos pontos frágeis dessa película. A corrosão por pite pode ser observada na figura 10.



Figura 10 – Corrosão Puntiforme

Fonte: Portal Metálico

3.4.5 Em Ranhuras

Ocorre em locais que contenham cantos vivos, em locais que possibilitam o acúmulo de solução aquosa ou exposição do material não protegido. Por apresentar um pequeno tamanho, as ranhuras são poucas observadas em manutenções e são percebidas apenas quando o material oxidado surge na superfície (CESEC, 2017). Percebe-se na figura 11 a corrosão originada nos cantos vivos de uma estrutura metálica.



Figura 11 – Corrosão em Ranhuras

Fonte: Portal Metálico

As próximas corrosões a serem citadas, a por frestas e no cordão de solda, são as mais frequentes em torres de telecomunicações. Contudo, pode-se perceber também o surgimento de todas as corrosões mencionadas até momento.

3.4.6 Por frestas

Acontece em locais quando duas superfícies estão em contato ou muito próximas (0,025 a 0,1 mm). As corrosões em frestas podem ser originadas a partir de: placas sobpostas, do contato entre metais com não metais e a partir do acúmulo de sujeiras ou produtos de corrosão que está sobre a superfície metálica (Ramanathan, 1997).

A região externa à fresta tem um maior acesso ao oxigênio, sendo que isto ocorre por meio de convecção (natural ou forçada) ou por difusão. Enquanto isso, a região interna da fresta tem um limitado acesso ao oxigênio e essa diferença de concentração tende a causar pilhas de aeração diferencial, onde a concentração de oxigênio na parte externa é superior à concentração da parte interna da fenda, fazendo dessa uma região anódica. Como consequência, o processo de corrosão se concentra na parte mais profunda da fresta, dificultando o acesso e o diagnóstico desse problema (CESEC, 2017). A corrosão por frestas pode ser observada na figura 12.



Figura 12 – Corrosão por Frestas

Fonte: Inspeção de Equipamentos: Estudo de caso

3.4.7 No cordão de solda

Essa forma de corrosão ocorre em aços inoxidáveis não estabilizados ou com teores de carbono maiores que 0,03%, havendo a precipitação de carbonetos de ferro e cromo, o que torna o aço suscetível à corrosão em torno do cordão de solda, sob a forma intergranular ou intercrystalina (Gentil, 2012). É de grande importância que na hora da soldagem utilizem cordões de soldas contínuos, pois se forem descontínuos podem ocasionar o aparecimento da corrosão devido à presença de fresta. A corrosão em torno do cordão de solda pode ser visualizada na figura 13.



Figura 13 – Corrosão em torno do Cordão de Solda

Fonte: Engquimicasantosp

Caracterizar inicialmente a corrosão segundo a morfologia é de grande importância, pois através da caracterização desse mecanismo pode-se estabelecer medidas protetivas eficientes.

4 PROTEÇÕES ANTICORROSIVAS

A corrosão é, em geral, um processo espontâneo, e, não fora o emprego de mecanismo protetores, ter-se-ia a destruição completa dos materiais metálicos, já que os processos de corrosão são reações químicas e eletroquímicas que se passam na superfície do metal e obedecem a princípios bem estabelecidos (Gentil, 2012).

4.1 Proteção Catódica

A proteção catódica tem por objetivo combater a corrosão em instalações metálicas enterradas, submersas e em contato com eletrólitos. Por apresentar uma alta eficiência, esta técnica vem sendo utilizada com sucesso em todo o mundo. A partir desse mecanismo, pode-se manter instalações metálicas livres de corrosão por um longo tempo.

As reações anódicas e catódicas ocorrem simultaneamente sobre a superfície metálica, sendo que as reações anódicas são responsáveis pelo surgimento da corrosão. Dessa forma, a proteção catódica visa eliminar todas as áreas anódicas das estruturas aplicando um potencial catódico no metal e como consequência aumenta-se a velocidade da reação catódica diminuindo-se a velocidade de reação anódica, ou seja, a velocidade de corrosão diminui (Ramanathan, 1997).

A aplicação da proteção catódica se divide em dois tipos: a proteção catódica galvânica e a proteção catódica por corrente impressa.

4.1.1 Proteção Catódica Galvânica

Neste caso o fluxo de corrente elétrica fornecido origina-se da diferença de potencial existente entre o metal a proteger e o outro escolhido como anodo e que apresenta um potencial mais negativo. Os materiais mais utilizados nesse processo como anodos são as ligas de magnésio, zinco ou alumínio, e isso se dar justamente por esses materiais apresentarem um potencial de corrosão consideravelmente negativo, possuindo uma alta eficiência como anodo e terem um estado ativo para que o anodo seja corroído uniformemente (Ramanathan, 1997). A figura 14 mostra a esquematização desse processo.

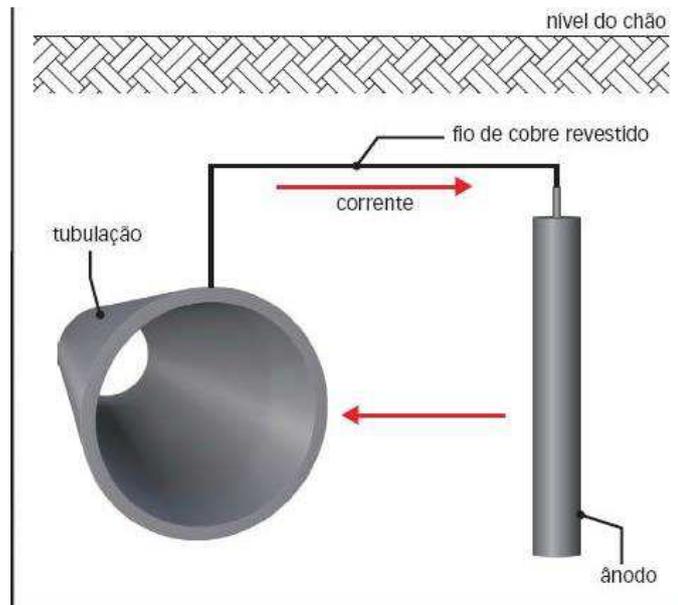


Figura 14 – Proteção Catódica Galvânica

Fonte: Infraestrutura Urbana

4.1.2 Proteção Catódica por Corrente Impressa

Este processo possui todas as características do processo de proteção catódica galvânica, exceto que o fluxo de corrente que será fornecido origina-se da força eletromotriz de uma fonte geradora de corrente elétrica contínua sendo utilizado com mais frequência os retificadores (Corsini, 2011). A figura 15 mostra a esquematização desse processo.

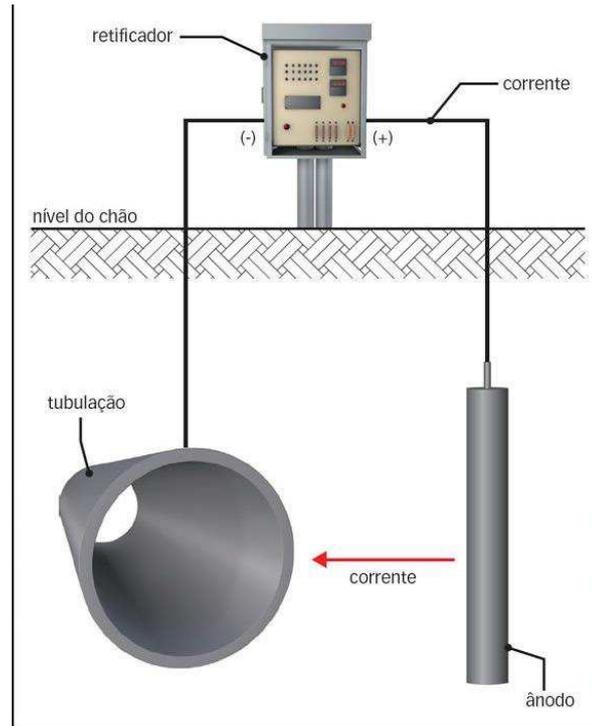


Figura 15 – Proteção Catódica por Corrente Impressa

Fonte: Infraestrutura Urbana

4.2 Proteção Anódica

Esse método tem como finalidade aplicar um potencial anódico na estrutura que será protegida, aplicando-se apenas em materiais formadores de películas protetoras, ou seja, materiais passivantes. Sua aplicação está diretamente associada a meios altamente agressivos, como por exemplo, tanques ácidos, permutador e digestores (Gentil, 2012).

Um caso bem interessante de se observar é o fenômeno de passivação no aço inox, ele possui no mínimo 10,5% de cromo, elemento que fornece ao material elevada resistência à corrosão. Aonde a passivação ocorre a partir de uma reação química entre os componentes do inox e o meio ambiente que geram uma camada protetora, ou seja, sem precisar da imposição de correntes (Metálica, 2017). A figura 16 mostra que em (1) existe uma barreira protetora de óxido de cromo formada automaticamente no aço inoxidável; em (2) tem-se a barreira protetora danificada, deixando a superfície exposta à atmosfera; e em (3) a barreira protetora é restaurada através da reação entre cromo do aço inoxidável e o oxigênio do meio circundante.

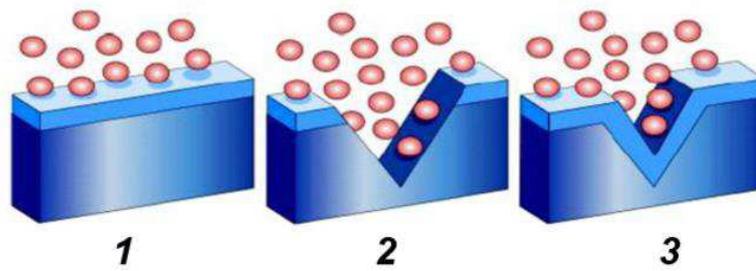


Figura 16 – Processo de passivação do aço inox

Fonte: Portal Metálica

Para se usar proteção anódica, isto é, a passivação anódica como meio de proteção, deve-se estabelecer e manter o potencial passivo em todo o material metálico colocado no meio corrosivo. Para ter essa condição, é necessário o emprego de instrumento que proporcione corrente adequada para passivar o metal e deixa-lo na faixa do potencial de passivação. Isto se consegue usando instrumentos eletrônicos, como o potenciostato, que mantém automaticamente o potencial de passivação. A figura 17 mostra a esquematização desse processo.

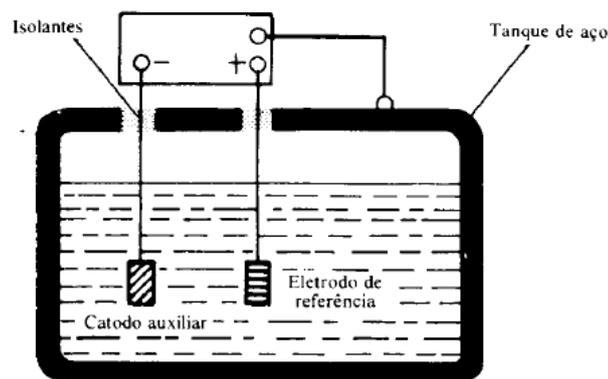


Figura 17 – Esquematização da Proteção Anódica

Fonte: (Gentil, 2007)

As proteções anticorrosivas através da galvanização e pinturas são mais aplicáveis as torres de telecomunicações tendo como fatores: baixo custo, alta taxa confiabilidade, durabilidade e de fácil empregabilidade.

4.3 Galvanização ou zincagem por imersão a quente

Este processo consiste em um revestimento metálico obtido por meio da imersão do material metálico através de um banho de metal fundido. No caso a galvanização consiste em revestir o material metálico por zinco. No processo de zincagem por imersão a quente, após a fundição do zinco, formam-se várias camadas de zinco-ferro e uma camada de zinco puro, as espessuras destas camadas irão variar de acordo com o tempo, temperatura, composição do aço e composição do banho. Este processo irá aumentar a capacidade de resistência a corrosão além de garantir uma vida útil mais duradoura (Ramanathan, 1997).

A temperatura normal de zincagem é de 445° a 455°C, a velocidade da reação é muito rápida a princípio, formando-se durante esse período inicial a maior parte da espessura da camada. Em seguida, a reação passa a ser mais lenta e a espessura não aumenta muito, mesmo que a peça permaneça imersa por longo período (ICZ, 2017).

A figura 18 mostra a micrografia do processo de galvanização no Ferro, ampliada 200 vezes, percebe-se, como mencionado, o surgimento de várias camadas Fe-Zn formadas no processo de fundição.

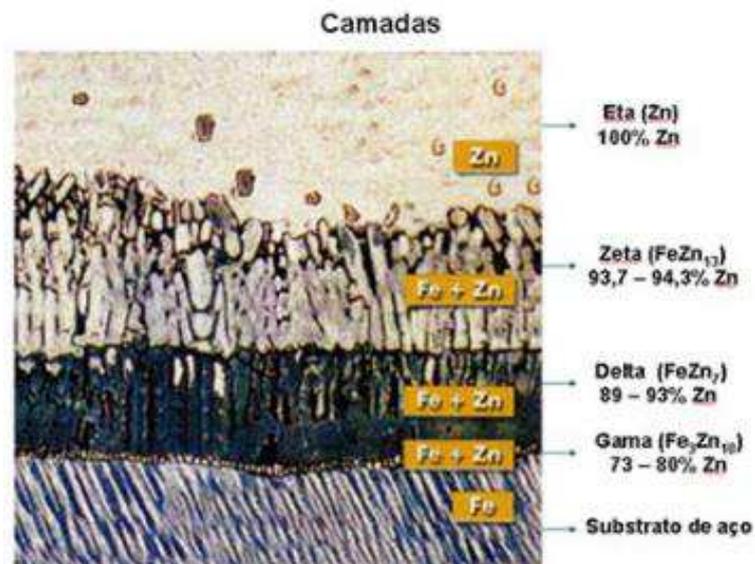


Figura 18 – Galvanização: Camadas de zinco

Fonte: ICZ

4.4 Pinturas

A proteção anticorrosiva por pinturas, dentre todas as existentes, é a mais utilizada no mundo. Isso se dá pelo fato de apresentar uma facilidade de aplicação e manutenção, uma ótima relação custo/benefício, além de proporcionar diversas propriedades em paralelo, como: finalidade estética, sinalização, impermeabilização, entre outros.

Gentil (2012) classifica em três ramos da atividade humana que a pintura pode ser aplicada:

- **Pintura artística:** tem como finalidade expressar uma arte, especialmente, nas criações de quadros e murais;
- **Pintura arquitetônica:** tem como finalidade na construção civil para fins estéticos e tornar o ambiente agradável;
- **Pintura industrial:** tem como principal finalidade agir como uma barreira de proteção anticorrosiva.

A preparação para o processo de pintura deve seguir uma ordem estabelecida para que assim ocorra uma proteção com maior eficiência possível. Para Gentil (2012) as etapas são:

- **Limpeza da superfície:** essa limpeza é feita através de técnicas de escovamento, aplicação de solvente ou jateamento;
- **Aplicação de tintas de fundo ou primárias (*primers*):** esta tinta é aplicada diretamente ao material metálico que irá ser revestido. Contendo na sua composição pigmentos ditos anticorrosivos, necessitam estar em contato direto com o substrato (metal a ser revestido) para assim exercer sua função de proteção. Essa camada também garante uma maior aderência nas camadas subsequentes;
- **Tintas intermediárias:** esta camada tem como finalidade fornecer espessura de revestimento, aumentando assim o índice de proteção à corrosão;
- **Tintas de acabamento:** atua como a primeira barreira protetora, pois são elas que estão em contato direto com o meio corrosivo. Possuem finalidades estéticas aos metais protegidos.

As camadas aplicadas para a execução completa do sistema de proteção através de tintas podem ser visualizadas na figura 19.

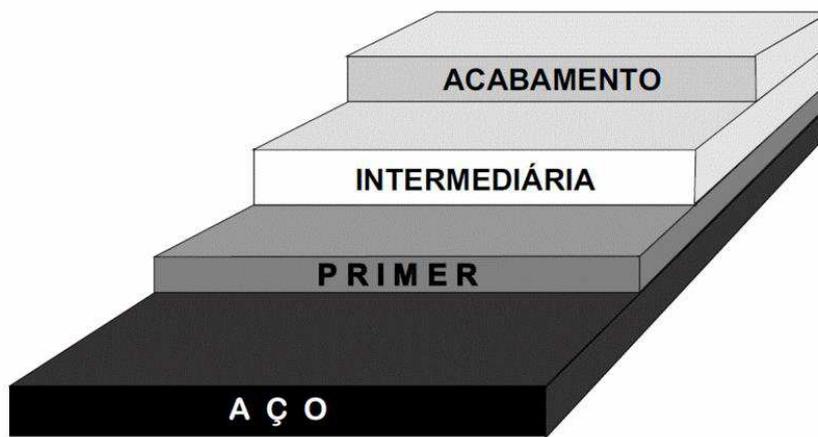


Figura 19 – Representação das tintas que compõem um esquema de pintura.

Fonte: Revestimentos Industriais

5 ENSAIOS DE CORROSÃO ACELERADOS

Atualmente existe uma grande procura por materiais que possam suportar condições adversas sem provocar perdas significativas. Tratando-se de corrosão, ter um metal com um alto índice de resistência a corrosão é muito interessante para as indústrias, pois assim atendem aos requisitos de qualidade, eficiência, versatilidade, durabilidade e reduzem custos.

Para evitarem riscos utilizando um novo material para uma determinada estrutura, tem-se intensificado o uso de ensaios para verificar a resistência à corrosão de vários tipos de metais ou ligas metálicas. Os metais através de ensaios são submetidos a condições severas, sendo então feito posteriormente uma série de análises para investigar a perda de massa provocada pelas condições as quais foram expostos.

Para que um ensaio de corrosão acelerado se torne confiável, é de extrema importância que os resultados obtidos correspondam com o desempenho do mundo real. Neste trabalho serão abordados dois tipos de ensaios, o ensaio de resistência a corrosão por névoa salina e por imersão.

5.1 Ensaio de resistência a corrosão por névoa salina

Trata-se de um ensaio de corrosão acelerado, ou seja, tem como finalidade duplicar em laboratórios o desempenho perante corrosão que seria encontrada em campo de um produto. Este ensaio é feito com várias finalidades, bem como para testar vários tipos de tratamentos químicos e pré-tratamentos de pinturas para utilização em chapas de aço com revestimento metálico (Center, 2011).

Basicamente, as etapas para que aconteça o ensaio por névoa salina envolve a pulverização de uma solução salina sobre os corpos de provas que serão testados. Isso é feito em uma câmara com temperatura controlada. A solução é de 5% de sal (cloreto de sódio - NaCl). Após inserir as amostras testadas na câmara a solução salina é pulverizada na forma de uma fina névoa sobre as amostras mantendo a temperatura dentro da câmara constante. As amostras ficam sujeitas a corrosão devido a pulverização ser aplicada de forma constante, ou seja, elas ficam sempre úmidas (Center, 2011).

Para Center (2011), como os resultados obtidos nunca se correlacionaram com o desempenho do mundo real, existem pessoas em comunidades científicas que falam que o ensaio tem valor limitado ou nulo.

5.2 Ensaio de resistência a corrosão por imersão

O ensaio por imersão é considerado o mais simples e o mais popular dentre os ensaios de corrosão acelerados. Este ensaio é bastante utilizado por apresentar resposta rápida, isto é, consegue-se um elevado grau de corrosão em um curto espaço de tempo.

Os testes por imersão fornecem um método bem flexível, podendo ser adaptado para atender às necessidades de uma determinada especificação. Os aparelhos utilizados para a realização do ensaio podem ser configurados a fim de conceder a exposição das amostras a várias fases de solução (líquidos, vapor, condensado, interface líquido/vapor, etc.). As amostras podem ser modificadas a fim de simular variações metalúrgicas ou físicas (tratamento térmico, acabamento superficial, revestimento, etc.) (Laboratories, 2017).

Dessa forma, mediante a todas as vantagens mencionadas, realizar-se-á o ensaio de resistência a corrosão por imersão para a obtenção dos resultados a partir da submersão do aço A-36 com proteção anticorrosiva do tipo pintura.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto se desenvolverá com base em pesquisas bibliográficas relacionadas a corrosão em estruturas metálicas e através do ensaio de corrosão acelerado por imersão. O fluxo de desenvolvimento do trabalho poder ser visualizado na figura 20.

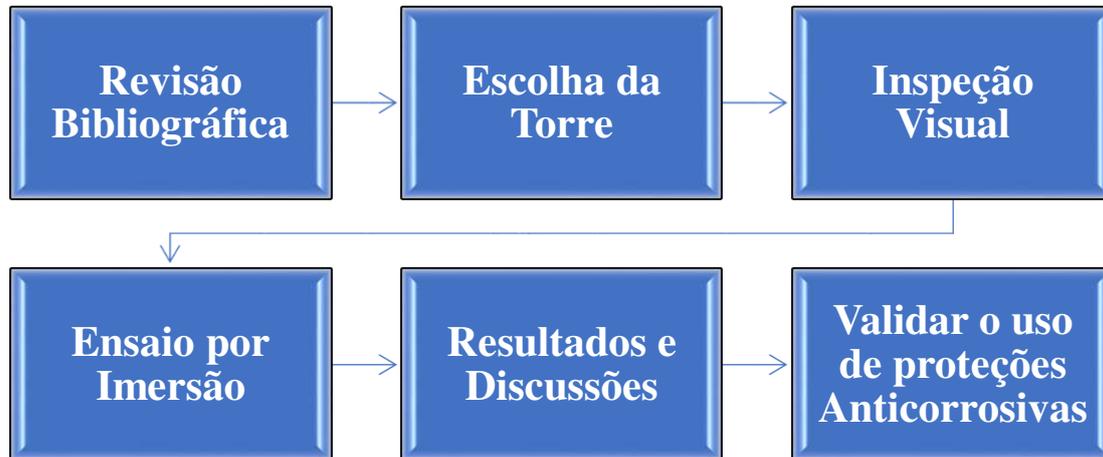


Figura 20 – Fluxo de desenvolvimento do projeto

Fonte: Autor do Trabalho

A metodologia de desenvolvimento neste tópico será dividida em 4 etapas.

6.1 Etapa 1 – Revisão bibliográfica

Concentrou-se em pesquisas bibliográficas, dessa forma pode-se conhecer os conceitos de todo o conteúdo em relação ao projeto, ou seja, o que é a corrosão, como ela se propaga e os tipos de proteções anticorrosivas mais utilizadas. Dessa forma, pode-se determinar qual proteção era mais adequada e mais viável para ser aplicada em estruturas metálicas.

6.2 Etapa 2 – Escolha da Torre de Telecomunicação

Levantou-se uma lista de torres de telecomunicações que poderiam ser analisadas para este projeto e após esta listagem entrou-se em contato com as empresas responsáveis afim de que houvesse a liberação para realização das visitas de campo com o intuito de analisar as torres. As empresas procuradas para disponibilizar suas torres foram: a Vivo, a Oi e a Embratel. Inicialmente encontraram-se bastantes obstáculos para conseguir a liberação de vistoria em alguma torre de telecomunicação, entretanto, apesar das dificuldades, visitou-se uma torre de telecomunicação da VIVO pertencente ao grupo torre sul.

A torre da VIVO fica localizada na BR 135, S/N, no Maracanã. Possui uma altura de 60 m, um peso de 9 toneladas e foi instalada no dia 23/12/2003. Sendo que essas especificações mencionadas e outras informações podem ser visualizadas na figura 21.

((GTS Grupo TorreSur			
ESTAÇÃO:	MASLS1540	ALTURA:	60 m
ENDEREÇO:	BR 135, S/N MARACANÃ	PESO:	9 t
LATITUDE:	-02° 36' 55" S	CÓD. DA TORRE:	TA60 1705
LONGITUDE:	-49° 19' 15" W	VK	{ V0 = 30 m/s S1 = 1,0 S2 = CAT. III - CL. C S3 = 1,10
ALTITUDE:	31 m	CAP.:	6 m ² (CA INCLUSO)
INSTALAÇÃO:	23/12/2003		
FABRICANTE:	SECCIONAL		

Figura 21 – Especificações da torre de telecomunicação da VIVO

Fonte: Autor do Trabalho

As figuras 22 e 23 mostram a estrutura geral que a torre de telecomunicação analisada possui.



Figura 22 – Estrutura Atual da Torre 1

Fonte: Autor do Trabalho



Figura 23 – Estrutura Atual da Torre 2

Fonte: Autor do Trabalho

6.3 Etapa 3 – Inspeção visual da Torre de Telecomunicação

No momento da visita foram vistoriados vários pontos da torre com o intuito de determinar a qualidade atual da estrutura e localizar pontos propícios para o surgimento da corrosão.

Apesar de ter sido instalada em 2003, ou seja, há mais ou menos 14 anos, sua estrutura apresenta uma boa qualidade. No momento da visita obteve-se informações importantes, a torre analisada é feita de aço A-36 e possui como proteção anticorrosiva a galvanização. Dessa forma, determinou-se que por esses motivos e por manutenções periódicas a torre está em ótimas condições. As figuras 24, 25, 26 e 27 retratam as condições atuais da estrutura da torre de telecomunicação da VIVO.



Figura 25 – Condição Atual da
Torre 4 - Parte Central

Fonte: Autor do Trabalho



Figura 24 – Condição Atual da Torre 3 - Uma das Bases

Fonte: Autor do Trabalho



Figura 26 – Condição Atual da Torre 5 -
Cantoneiras e parafusos

Fonte: Autor do Trabalho



Figura 27 – Condição Atual da Torre 6 - Base Total

Fonte: Autor do Trabalho

Após a visita, chegou-se à conclusão que era necessário a realização de ensaio para simular as condições ambientes ou verificar a resistência a corrosão de algum aço e assim poder observar a propagação da corrosão nesse material.

6.4 Etapa 4 – Realização do Ensaio de Corrosão Acelerado – Por imersão

O ensaio de imersão realizado foi baseado na norma ASTM G31-72 que descreve todo o procedimento e sugestões para execução desse tipo de ensaio (ASTM, 2004).

Para realização do ensaio por imersão seguiu-se 4 passos.

6.4.1 Passo 1: Material a ser utilizado como corpo de prova

O material do corpo de prova utilizado para este ensaio foi o aço A-36 pois é o mesmo que compõe a estrutura da torre de telecomunicação visitada. O aço A-36 possui uma boa soldabilidade e a sua composição pode ser observada na tabela 3 (Ltda, 2015).

Tabela 3 – Composição do Aço A-36

Fe	C	Mn	S	P	Cu
99%	0,26%	0,75%	Máx. de 0,05%	Máx. de 0,05%	2%

Fonte: Trimetais

Tendo como objetivo determinar uma proteção anticorrosiva efetiva, utilizou-se uma chapa revestida esmalte sintético *standard*. A dimensão do corpo de prova foi de 29,6 mm de largura, 44,35 mm de altura, 1,5 mm de espessura e com a massa de 14,7641g. Todas as medidas foram feitas com o paquímetro e uma balança de seis dígitos, ou seja, com instrumentos de precisão. As dimensões e o peso podem ser visualizados nas figuras 28 e 29.

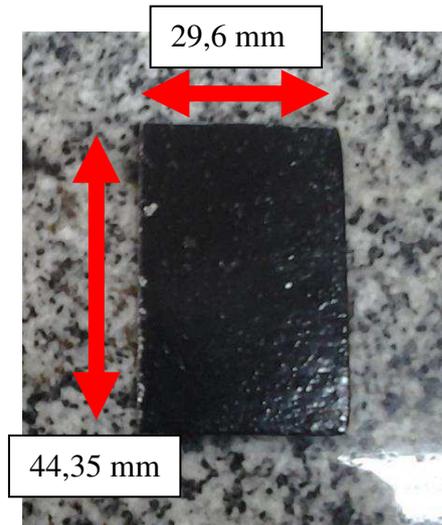


Figura 28 – Dimensões do corpo de prova

Fonte: Autor do Trabalho



Figura 29 – Balança de precisão - Peso do corpo de prova

Fonte: Autor do Trabalho

6.4.2 Passo 2: Preparação do corpo de prova para o ensaio

Para obtenção de um resultado mais preciso, amarrou-se o corpo de prova com fio de nylon em uma vareta de madeira e de maneira centralizada colocou-se o material em um béquer, como mostra a figura 30.



Figura 30 – Corpo de prova no béquer

Fonte: Autor do Trabalho

6.4.3 Passo 3: Inserindo uma solução aquosa

Para que aconteça uma corrosão de forma acelerada, foi necessário empregar uma solução aquosa composta de 3% de NaCl (Cloreto de sódio). A figura 31 mostra o corpo de prova completamente submerso nessa solução.



Figura 31 – Corpo de prova submerso com solução aquosa com 3% de NaCl

Fonte: Autor do Trabalho

6.4.4 Passo 4: Inserido na estufa

Entre os procedimentos citados pela ASTM G31-72, manter o corpo de prova a uma temperatura constante é fundamental na obtenção de resultados satisfatórios e para que isso ocorresse utilizou-se uma estufa, tendo sua temperatura variando entre 50 a 60°C.

O ensaio ocorreu no laboratório do IFMA e teve uma duração de 48 horas, a estufa utilizada pode ser visualizada nas figuras 32 e 33.



Figura 32 – Estufa utilizada para o ensaio

Fonte: Autor do Trabalho



Figura 33 – Parte interna da estufa com o corpo de prova

Fonte: Autor do Trabalho

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Inspeções Visuais

Na visita constatou-se que embora apresentasse uma ótima qualidade estrutural, a torre possui alguns pontos favoráveis para o aparecimento da corrosão. Entre esses pontos pode-se destacar o acúmulo de água em uma das bases da torre, a presença de diversas regiões com frestas e em torno do cordão de solda. Estes locais propícios para a corrosão podem ser visualizados nas figuras 34, 35, 36 e 37.



Figura 34 – Acúmulo de água em uma das bases

Fonte: Autor do Trabalho



Figura 35 – Frestas 1 - contato superfície com superfície

Fonte: Autor do Trabalho



Figura 36 – Frestas 2 - contato superfície com superfície

Fonte: Autor do Trabalho



Figura 37 – Cordão de Solda

Fonte: Autor do Trabalho

É de grande importância determinar os fatores que provocam o acúmulo de água nessa base da torre visitada, indicando se foi por decorrência de falhas humanas, por exemplo, alguma tubulação que passa por perto da base que esteja promovendo um vazamento constante ou se foi simplesmente por conta do período chuvoso durante o período da vistoria.

As diversas regiões de frestas presentes na torre podem agravar a ocorrência de corrosão, pois o contato entre duas superfícies separadas por distâncias milimétricas possibilita o acúmulo de água nas fendas disponíveis e tende a causar pilhas de aeração diferencial, ocorrendo assim uma concentração de oxigênio maior nas bordas do que na parte mais interna da fenda. Como solução para este problema, pode-se utilizar compostos duráveis para preencher as frestas evitando a umidade. Outra solução seria soldar as frestas existentes, acarretando assim na eliminação de frestas na estrutura.

Em relação ao cordão de solda, deve-se priorizar a utilização do cordão de solda contínuo, pois uma soldagem descontínua possibilita o acúmulo de água devido a presença de frestas e assim seria um fator determinante para o surgimento da corrosão como já mencionado.

Dessa forma, nas realizações das manutenções periódicas em torno desses pontos citados deverão ser observados com mais cautela, com o intuito de restringir os fatores principais que poderiam ocasionar a corrosão na estrutura metálica, aumentando assim sua vida útil e trazendo qualidade e confiabilidade para a empresa e usuários.

7.2 Nível de acidez da solução

Para verificar o nível de acidez da solução a qual foi posta sobre o corpo de prova utilizou-se uma fita calorimétrica de quatro faixas. A verificação ocorreu em dois momentos, o primeiro nível medido foi antes da realização do ensaio e o segundo nível verificado foi logo após as 48 horas de ensaio. Tendo como base que quanto menor for o pH de uma substância, maior será a concentração de íons H^+ e menor será a concentração de íons OH^- . A escala de pH varia de 1 a 14, conforme mostra a figura 38.

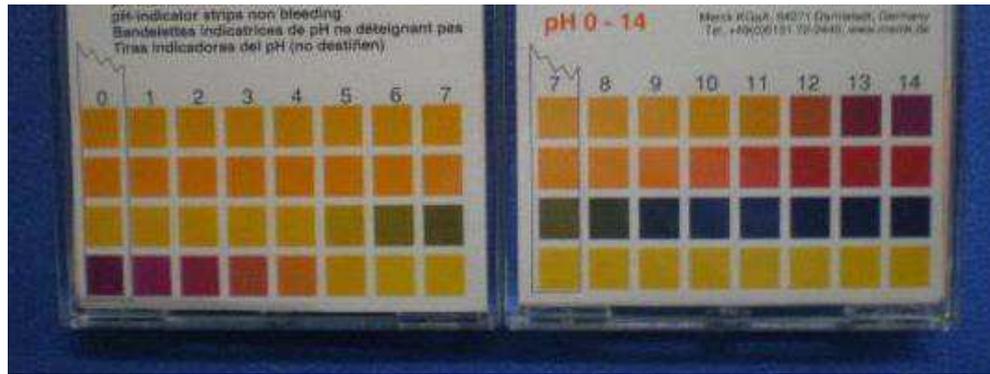


Figura 38 – Escala de pH

Fonte: CAAL – Casa Americana

O nível inicial (meio sem metal) e final (meio com metal) de acidez verificados com o uso da fita colorimétrica podem ser visualizados na figura 39.



Figura 39 – Nível de pH - (esquerda) Meio sem metal; (direita) Meio com metal

Fonte: Thiago Santos

De posse do resultado, concluiu-se que para ambos os casos o pH permaneceu constante, após comparar o resultado da figura 40 com a escala de pH da figura 39 estabeleceu-se o seu nível com o índice 6, ou seja, uma solução ácida.

7.3 Ensaio por imersão

Após 48 horas de ensaio retirou-se o béquer com o corpo de prova da estufa, a primeira instância percebeu-se a diminuição do volume da solução utilizada, sendo que inicialmente o corpo de prova estava completamente submerso na solução conforme mostrado na figura 31. Além de apresentar o volume final reduzido, a coloração da solução utilizada sofreu grande alteração, transformou-se de solução transparente para alaranjada, a redução volumétrica e a mudança de cor podem ser visualizadas nas figuras 40 e 41.



Figura 40 – Resultado após o ensaio

Fonte: Thiago Santos

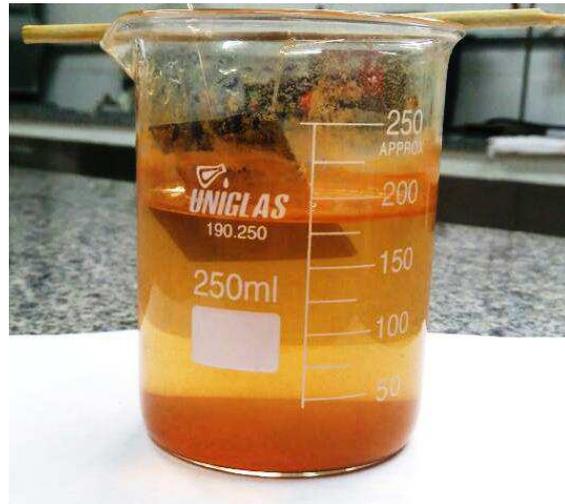


Figura 41 – Volume e coloração após o ensaio

Fonte: Thiago Santos

A próxima etapa de avaliação consistiu em retirar e limpar o corpo de prova do béquer. Após a limpeza verificou-se que a chapa ficou opaca e constatou-se que a peça visualmente continuava intacta, sendo que a solução utilizada apenas deteriorou a proteção que estava sobre a chapa, o corpo de prova após o processo de limpeza pode ser visto na figura 42.



Figura 42 – Corpo de prova após a realização do ensaio

Fonte: Thiago Santos

O seu peso inicial verificado foi de 14,7641 g (Fig. 30) e após a realização do ensaio por imersão foi de 15,6340 g, ou seja, ocorreu um aumento de 5,8920%. A utilização de proteção por pintura proporcionou o aumento de massa no fim do ensaio, pois os sais presentes na solução se depositaram no material fazendo com que ocorresse um ganho de massa, ou seja, com o uso dessa proteção ocorreu um acréscimo de massa. Para minimizar erros, verificou-se o peso inicial e final do corpo de prova com a mesma balança de precisão, conforme mostra a figura 43.



Figura 43 – Peso final da chapa após a realização do ensaio

Fonte: Thiago Santos

O uso da proteção anticorrosiva por meio do esmalte sintético *Standard* possibilitou uma maior segurança para o corpo de prova, funcionando assim como material de sacrifício pois evitou que ocorresse a corrosão na chapa se consumindo primeiro, atuando assim como uma barreira protetora.

Dessa forma, a partir do ensaio de corrosão acelerado por imersão, constatou-se a veracidade de que quando se utiliza meios protetivos, o material aumenta sua resistência a corrosão fornecendo assim uma maior vida útil para estrutura e reduzindo custos oriundos do fenômeno corrosivo.

8 CONCLUSÃO

O presente trabalho determinou com base nas literaturas e pesquisas abordadas que as proteções anticorrosivas mais efetivas aplicadas em torres de telecomunicações são através dos processos de galvanização e do uso pinturas industriais. As proteções agem como uma barreira protetora entre o metal e o meio que ele está exposto, prologando assim a sua vida útil e aumentando a confiabilidade entre o fornecedor e o usuário, essas proteções vêm sendo utilizadas com maior frequência.

A partir dos resultados obtidos por inspeções visuais percebeu-se que a torre de telecomunicação apresentava uma ótima integridade, mas também possuía uns locais propícios para o surgimento da corrosão, sendo necessário nos momentos de manutenções periódicas observar com mais cautela esses pontos. Já os resultados obtidos através do ensaio, percebeu-se que o nível de pH da solução utilizada era ácido, sendo que o corpo de prova se apresentou de forma opaca e intacta após o procedimento de limpeza. Tendo apenas a sua proteção consumida, a chapa teve acréscimo de 5,8920% em sua massa e isso ocorreu por conta dos sais presentes na solução se depositarem no corpo de prova.

Sendo assim, o ensaio de corrosão acelerado comprovou que através do uso da proteção por esmalte sintético o corpo de prova permanece intacto sendo apenas deteriorado a proteção utilizada.

Como proposta para futuros trabalhos, recomenda-se obter resultados mais precisos aumentando o tempo de ensaio, utilizando materiais de propriedades diferentes para proporcionar uma comparação e assim verificar qual metal apresentará uma maior resistência a corrosão utilizando-se o mesmo tipo de proteção anticorrosiva. Outra proposta seria verificar quanto tempo de ensaio seria necessário para ocorrer a deterioração completa da proteção utilizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abraco, A. B. (2017). *Corrosão - Uma Abordagem Geral*. Acesso em 15 de Maio de 2017, disponível em Scribd: <https://pt.scribd.com/document/343232384/Teoria-Corrosao-ABRACO>

Amaral, C. T. (2008). *Corrosão em Estruturas Metálicas: Uma breve discussão acerca da prevenção em Torres de Telecomunicações*. Belo Horizonte.

ASTM, I. (2004). Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals.

ASTM, I. (2011 de Agosto de 2011). B117 - 11. *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*.

Barradas, O. C. (1978). *Telecomunicações - Sistemas de Radiovisibilidade*. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos.

Brink, F. M. (Outubro de 2004). *Efeito da corrosão na integridade estrutural da ponte metálica Merechal Hermes*. Acesso em 08 de Junho de 2017, disponível em <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp101634.pdf>

Cascudo, O. (1997). *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*. Goiânia.

Center, G. (1 de Janeiro de 2011). *Ensaio de Névoa Salina*. Fonte: GalvInfo Center: http://www.icz.org.br/site/pdf/galvanizacao/GalvInfoNote_3_4.pdf

CESEC, C. d. (2017). *Corrosão em estruturas metálicas*. Acesso em 23 de 05 de 2017, disponível em Portal Met@lica Construção Civil: <http://wwwo.metallica.com.br/corrosao-em-estruturas-metalicas>

Corsini, R. (14 de Dezembro de 2011). *Proteção Catódica*. Acesso em 23 de Maio de 2017, disponível em Infraestrutura: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/14/artigo257602-1.aspx>

Fogaça, J. R. (2017). *Corrosão dos Metais*. Acesso em 20 de Maio de 2017, disponível em Mundo Educação: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/corrosao-dos-metais.htm>

Fogaça, J. R. (2017). *Tipos de Corrosão*. Acesso em 06 de Junho de 2017, disponível em Brasil Escola: <http://brasilecola.uol.com.br/quimica/tipos-corrosao.htm>

Gemelli, E. (2014). *Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização*. Rio de Janeiro: LCT.

Gentil, V. (2003). *Corrosão* (4ª ed.). Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.

Gentil, V. (2007). *Corrosão* (5ª ed.). Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e Científicos Editora Ltda.

Gentil, V. (2012). *Corrosão* (6ª ed.). Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos.

Helene, P. (1993). *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Hoffmann, J. N. (Abril de 2005). *Proteção Contra Corrosão Nas Fundações Das Torres Metálicas Utilizando Energia Induzida Pelo Campo Elétrico Da Linha de Transmissão*. Acesso em 08 de Junho de 2017, disponível em <http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/2/002-06.pdf>

ICZ. (26 de Janeiro de 2017). *O processo de zincagem por imersão a quente*. Acesso em 24 de Maio de 2017, disponível em ICZ - Instituto de Metais Não Ferrosos: <http://www.icz.org.br/o-processo-de-zincagem-por-imersao-a-quente.php>

Laboratories, C. T. (2017). *Corrosion, Failure analysis and materials selection specialists*. Acesso em 26 de Maio de 2017, disponível em Corrosion Testing Laboratories, Inc: <http://www.corrosionlab.com/ct/labresearch.htm#im>

Ltda, T. I. (2015). *O que é aço A36?* Acesso em 6 de Junho de 2017, disponível em TRIMETAIS: <http://trimetais.com.br/materiais/aco-a36/>

Massucato, D. (24 de 04 de 2012). *Meios Corrosivos*. Acesso em 06 de Junho de 2017, disponível em DocSlide: <http://docslide.com.br/documents/meios-corrosivos-prof-denis.html#>

Metálica, P. (2017). *Camada Passiva - A responsável pela notável resistência à corrosão do aço inoxidável*. Acesso em 6 de Junho de 2017, disponível em Portal Met@lica Construção

Civil: <http://wwwo.metallica.com.br/camada-passiva-a-responsavel-pela-notavel-resistencia-a-corrosao-do-aco-inoxidavel>

Ramanathan, L. V. (1997). *Corrosão e seu controle*. São Paulo: Hemus livraria, distribuidora e editora S.A.

Rocha, C. C. (1999). Corrosão Galvânica - Um prejuízo que poucos evitam. *Recuperar* n°27, 14.

Shreir, L. L. (1978). Corrosion. Em *Metal/Environment Reactions* (pp. 2-27). London.