

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

NELSON LUIS COSTA DOS SANTOS FILHO

**ANÁLISE DA CORROSÃO NAS COMPORTAS METÁLICAS DA
BARRAGEM DO RIO BACANGA, PARA PROPOR UM MÉTODO DE
PROTEÇÃO ANTICORROSIVO**

São Luís - MA

2016

NELSON LUIS COSTA DOS SANTOS FILHO

**ANÁLISE DA CORROSÃO NAS COMPORTAS METÁLICAS DA
BARRAGEM DO RIO BACANGA, PARA PROPOR UM MÉTODO DE
PROTEÇÃO ANTICORROSIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Francismar Rodrigues de Sousa

São Luís - MA

2016

Santos Filho, Nelson Luís Costa dos.

Análise da corrosão nas comportas metálicas da barragem do rio Bacanga, para propor um método de proteção anticorrosivo / Nelson Luís Costa dos Santos Filho. – São Luís, 2016.

51 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Me. Francismar Rodrigues de Sousa.

1. Comportas metálicas. 2. Corrosão. 3. Proteção anticorrosiva.
I. Título.

CDU 620.197:627.82(812.1)

NELSON LUIS COSTA DOS SANTOS FILHO

**ANÁLISE DA CORROSÃO NAS COMPORTAS METÁLICAS DA BARRAGEM DO
RIO BACANGA, PARA PROPOR UM MÉTODO DE PROTEÇÃO
ANTICORROSIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Francismar Rodrigues de Sousa (Orientador)

Prof. MSc. Paulino Cutrim Martins (Examinador)

Prof. MSc. Núbia Célia Bergê Cutrim (Examinador)

A toda minha família.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por ele ter me guiado até esta etapa do meu curso, me proporcionando tranquilidade, força, sabedoria para enfrentar todos os obstáculos que surgiram durante essa jornada. Toda honra e toda glória seja dada a ele.

Agradeço aos meus pais, minha maravilhosa mãe, Antonia Alcileide Sousa dos Santos, e meu pai, Nelson Luis Costa dos Santos, por sempre mostrarem que o caminho dos estudos era a melhor opção para meu futuro. Pelos conselhos, incentivo, puxões de orelha, por sempre se dedicarem ao máximo, fazendo o possível e até mesmo o impossível para contribuir com meu crescimento, sempre me incentivaram desde minha partida de Pirapemas, interior do Maranhão, para São Luís em busca de um futuro melhor.

Agradeço aos meus padrinhos, Zélia Maria dos Santos Ribeiro e José Albino dos Santos Ribeiro, por me proporcionarem a oportunidade de morar com eles em São Luís. Pelo apoio e por todo suporte dado a minha pessoa, dando-me permissão para correr atrás dos meus objetivos.

Um agradecimento também a todos meus familiares que fazem parte da família Santos, onde mesmo não me acompanhando de perto, sempre torceram por mim nessa trajetória.

Agradeço a meu orientador MSc. Francismar Rodrigues de Sousa, pelo apoio, paciência, e incentivo para a construção desse trabalho.

Um agradecimento especial a minha irmã Adrielle Karine e meus amigos Ediharly João e Thiago Santos que me ajudaram diretamente na construção deste trabalho.

Um agradecimento ao meu grande amigo Alan Gomes Silva, vivenciamos grandes momentos juntos durante toda essa trajetória desse curso.

Agradeço por fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação moral e profissional, reconhecendo o apoio e o papel fundamental de cada um deles. Todos eles souberam se fazer presentes nos momentos de conquistas, e principalmente nos momentos mais difíceis dessa caminhada.

“Tudo que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado”.

(Roberto Shinyashiki)

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo analisar a corrosão sobre as superfícies metálicas das comportas da barragem do Bacanga para propor um método de proteção anticorrosivo. De início foram feitas pesquisas bibliográficas referentes ao tema proposto. Em seguida realizaram-se inspeções visuais in loko para avaliar o grau de propagação da corrosão nas comportas e agressores causadores do fenômeno corrosivo. Logo após as inspeções visuais, foram realizados ensaios para verificar o potencial de corrosão que o material das comportas possui no seu ambiente de serviço; valor do potencial hidrogeniônico (pH), para verificar sua influência no processo de corrosão das comportas; e oxigênio dissolvido (OD) da água da barragem do Bacanga, afim de verificar suas influências nos impactos ambientais e aos bairros adjacentes. Com os resultados obtidos, conclui-se que, há necessidade de se empregar um método de proteção catódica por anodo de sacrifício, por ser um método muito eficiente para o ambiente de serviço ao qual as comportas estão expostas (ambiente marinho), com objetivo de inibir a propagação da corrosão nas superfícies das mesmas na barragem do Bacanga.

Palavras Chaves: Comportas metálicas, corrosão, proteção anticorrosiva.

ABSTRACT

The present work has the objective of analyzing the corrosion on the metallic surfaces of the floodgates of the Bacanga dam to propose a method of anticorrosive protection. Initially bibliographical researches were done referring to the proposed theme. Afterwards, visual inspections were carried out in loco to evaluate the degree of corrosion propagation in the gates and aggressors causing the corrosive phenomenon. Soon after the visual inspections, tests were carried out to verify the corrosion potential that the sluice material has in its service environment; Value of the hydrogenation potential (pH), to verify its influence on the corrosion process of the floodgates; And dissolved oxygen (OD) of the Bacanga dam water, in order to verify its influence on the environmental impacts and adjacent neighborhoods. With the results obtained, it is concluded that, it is necessary to use a cathodic protection method for sacrificial anode, since it is a very efficient method for the service environment to which the floodgates are exposed (marine environment), aiming at Inhibit the propagation of corrosion on their surfaces in the Bacanga dam.

Key Words: Metal Gates; corrosion; corrosion protection.

Lista de figuras

Figura 1 - Stop-Logs da barragem do Bacanga.	13
Figura 2 - Custo da corrosão por setor industrial.	14
Figura 3 - Aumento da passagem do fluxo de água com comporta metálica afundada.	16
Figura 4 - Esquema do processo de corrosão do aço.	17
Figura 5 - Estágio de equilíbrio da reação da passagem dos íons para a solução.	20
Figura 6 - corrosão uniforme em uma chapa metálica.	24
Figura 7 - Trecho de chapa com corrosão por placas.	24
Figura 8 - Corrosão alveolar.	25
Figura 9 - Corrosão por pites em aço inoxidável.	25
Figura 10 - Corrosão intergranular.	26
Figura 11 - Corrosão Transgranular.	26
Figura 12 - Corrosão Filiforme em superfície com película de tinta.	27
Figura 13 - Corrosão por Esfoliação em liga de alumínio.	27
Figura 14 - Corrosão Grafítica em tubo de ferro fundido cinzento.	28
Figura 15 - Processo de Dezincificação em chapas metálicas.	28
Figura 16 - Corrosão galvânica em aço inoxidável.	29
Figura 17 - Correlação entre o pH e a taxa de corrosão do ferro.	33
Figura 18 - Inspeções visuais na barragem do Bacanga.	37
Figura 19 - Amostras a serem submetidas ao ensaio eletroquímico.	38
Figura 20 - Célula eletroquímica para o ensaio de polarização.	38
Figura 21 - Ilustração dos três eletrodos.	39
Figura 22 - Fita colorimétrica.	40
Figura 23 - Procedimento ensaio pH.	40
Figura 24 - Equipamento ensaio OD.	41
Figura 25 - Procedimento ensaio OD.	41
Figura 26 - Propagação da corrosão sobre a superfície das comportas.	42
Figura 27 - Comportas em contato direto com a água.	43
Figura 28 - Cracas instaladas na parte inferior das comportas.	43
Figura 29 - Deterioração do corrimão devido ao fenômeno da maresia.	44
Figura 30 - Gráfico do potencial de corrosão do material a36.	45
Figura 31 - Princípio de funcionamento anodo de sacrifício.	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Corrosão.....	18
2.2	Mecanismos eletroquímicos.....	19
2.3	Potenciais eletroquímicos	20
2.4	Pilhas eletroquímicas.....	21
2.4.1	Pilha de eletrodos metálicos diferentes	21
2.4.2	Pilha ativa – passiva.....	22
2.4.3	Pilha de ação local.....	22
2.4.4	Pilha de concentração iônica.....	22
2.4.5	Pilha de aeração diferencial	22
2.5	Tipos de corrosão.....	23
2.5.1	Corrosão uniforme	23
2.5.2	Por placas.....	24
2.5.3	Alveolar.....	24
2.5.4	Puntiforme ou por pite	25
2.5.5	Intergranular	25
2.5.6	Transgranular	26
2.5.7	Corrosão Filiforme	26
2.5.8	Corrosão por Esfoliação	27
2.5.9	Corrosão Gráfica	27
2.5.10	Dezincificação	28
2.5.11	Corrosão galvânica.....	28
2.6	Meios corrosivos	29
2.6.1	Atmosfera	29
2.6.2	Atmosfera seca.....	29
2.6.3	Atmosfera úmida.....	30
2.6.4	Atmosfera molhada.....	30
2.6.5	Solo	30

2.6.6	Águas naturais.....	31
2.6.7	Meios marítimos	31
2.6.8	Água do mar	32
2.7	Fatores influentes na taxa de corrosão	32
2.7.1	Fatores químicos	32
2.7.2	pH.....	32
2.7.3	Fatores físicos	33
2.7.4	Fatores biológicos.....	34
2.8	Métodos de combate à corrosão.....	34
2.8.1	Manutenção	35
2.8.2	Controle através do metal – proteção catódica	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Ensaio visual.....	37
3.2	Ensaio de corrosão	37
3.3	pH, OD e condutividade	39
3.3.1	pH.....	39
3.3.2	Oxigênio Dissolvido	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	Resultado do Ensaio Visual.....	42
4.2	Resultado do Ensaio de Corrosão	44
4.3	Resultado do Ensaio do potencial Hidrogeniônico (pH).....	45
4.4	Resultado do Ensaio de Oxigênio Dissolvido.....	46
4.5	Proposta do Método de proteção anticorrosivo.	46
4.5.1	Princípio de funcionamento	47
5	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

Proporcionar maior segurança e flexibilidade às obras públicas é essencial para inibir qualquer tipo de acidente que venha causar danos ao meio ambiente e à sociedade. Em ambientes que exigem a necessidade de controlar o fluxo de água tal qual a barragem do Bacanga, é necessário determinado tipo de dispositivo para exercer essa função, para tal, foram instaladas comportas metálicas junto à estrutura de concreto armado.

Com o surgimento do porto do Itaqui, houve a necessidade de diminuir a distância centro/porto. Para solucionar essa questão, foi construída a barragem do Bacanga no final da década de sessenta pela empresa Mendes Júnior, reduzindo a distância de 50 para 8 km. No decorrer da construção da barragem, outros objetivos foram levantados, tais quais, sanear as casas dos alagados a beira do rio e de dar um lago à cidade.

A princípio, a barragem era constituída de dez comportas metálicas: seis comportas pequenas, três comportas médias e uma comporta grande. Hoje, apenas as seis comportas pequenas, conhecidas como “stop-logs” (Figura 1), estão em funcionamento.

Figura 1- Stop-Logs da barragem do Bacanga.



As comportas metálicas da barragem do Bacanga possuem importância no aspecto social e ambiental, pois regulam o fluxo de água para que não seja

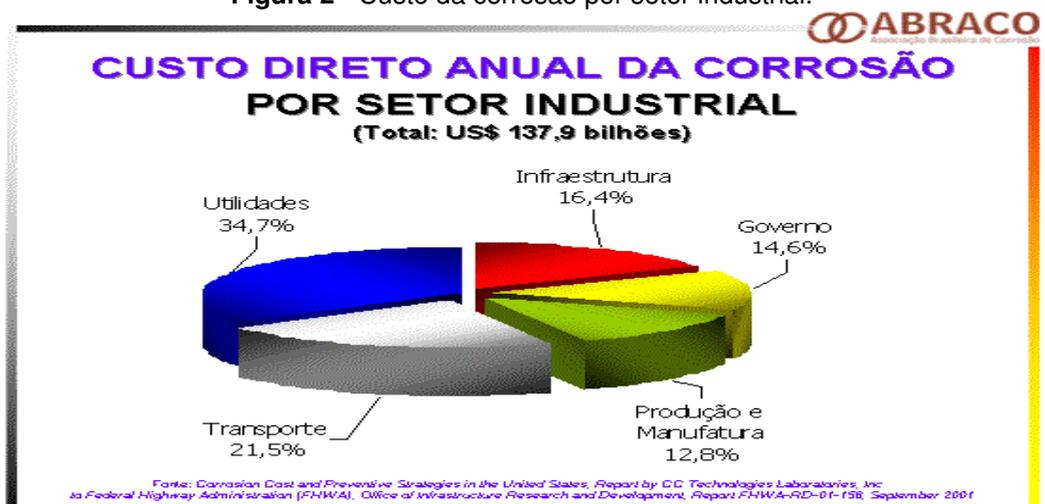
ultrapassado o nível correto do lago, evitando alagamentos aos bairros adjacentes; e renovam o oxigênio da água para sobrevivência da fauna presente no local.

O ambiente de serviço ao qual as comportas metálicas da barragem do Bacanga estão expostas é de características essenciais para o aparecimento dos fenômenos corrosivos. Portanto, se faz necessário a realização de manutenção preventivas e métodos que venham amenizar ou até mesmo acabar com a corrosão nas comportas para que não se tenham problemas futuros.

O estudo dos processos corrosivos dos materiais é de grande importância. Os problemas causados pela corrosão são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades. Além disso, em maior ou em menor grau, a grande maioria dos materiais experimenta algum tipo de interação com um grande número de ambientes diversos. Essas interações comprometem a utilidade de um material como resultado da deterioração das suas propriedades mecânicas, físicas ou da sua aparência. (CALLISTER, 2009).

Mesmo com o grande avanço tecnológico para o controle da corrosão, ainda existem muitas formas de ataque onde não se conhece a diagnose e o combate. Portanto, a corrosão é importante tanto no aspecto econômico como social. (GENTIL, 2012). A figura 2 abaixo representa os custos da corrosão por setor industrial.

Figura 2 - Custo da corrosão por setor industrial.



Fonte: (ABRACO, 2013).

Entende-se por corrosão as perdas das propriedades de um material metálico ou não metálico pelas reações químicas ou eletroquímicas do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos. A deterioração sofrida pelos materiais representam

alterações indesejáveis, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais. (GENTIL, 2012).

Em um contexto geral, a corrosão é um processo espontâneo e que para ser prevenido devem-se empregar mecanismos protetores, tais como a manutenção preventiva. Dessa forma, o fato da corrosão ser em geral, um fenômeno de superfície, ela pode ser controlada através de inspeções e pelas propriedades dos produtos de corrosão. (GENTIL, 2012).

Este trabalho de conclusão de curso tem como problema de pesquisa a proposta de um método de proteção anticorrosivo para inibir a propagação da corrosão sobre as superfícies metálicas das comportas da barragem do Bacanga. O problema da pesquisa iniciou-se a partir de um projeto de iniciação científica, cujo tema era “Diagnose da corrosão nas comportas metálicas da barragem na foz do rio Bacanga”, quando no dia 17 de setembro de 2015, um dos cabos de aço que suportavam a única comporta que funcionava na barragem rompeu, tendo como consequência o desabamento da comporta para o fundo do rio, abrindo passagem para o fluxo intenso da água (Figura 3). Uma grande preocupação, pois como mencionado anteriormente neste capítulo, às comportas regulam o fluxo de entrada e saída da água para evitar alagamentos aos bairros adjacentes.

A solução hipotética para o problema pode se dar através da execução da manutenção preventiva, aplicando uma tinta específica nas superfícies das comportas para amenizar a corrosão. Segundo relatos de moradores de bairros adjacentes a barragem do Bacanga, desde quando construída, nunca foi realizado nenhum tipo de manutenção na mesma.

A corrosão no metal é a principal manifestação patológica em estruturas metálicas. A incidência cada vez mais constante deste fenômeno aliada aos altos custos envolvidos para a recuperação do material, e o risco de comprometimento da estabilidade estrutural nos leva a pensar em uma pesquisa que mostre resultados positivos em relação à diminuição da corrosão, assim como demonstrar que a utilização de métodos anticorrosivos, podem não somente evitá-la como aumentar a vida útil da estrutura.

Ante ao exposto e sob a óptica da análise da situação estrutural estes estudos contribuirão decisivamente para o conhecimento dos avanços e controles da corrosão em obras públicas e com grande movimentação de pessoas para a implantação dos

procedimentos anticorrosivos mais convenientes para segurança dos usuários da barragem do Bacanga da cidade de São Luís do Maranhão.

Figura 3 - Aumento da passagem do fluxo de água com comporta metálica afundada.



1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Propor um método de proteção anticorrosivo para inibir a propagação da corrosão nas comportas metálicas da barragem do Bacanga.

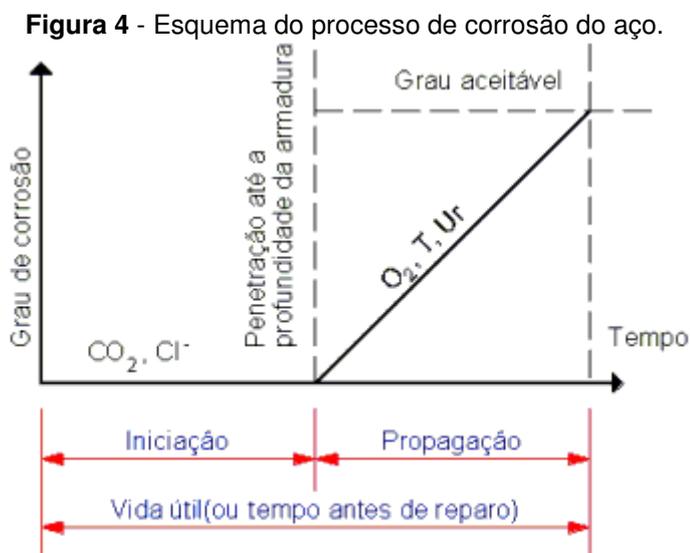
1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Verificar o potencial de corrosão do material das comportas metálicas em seu ambiente de serviço;
- ✓ Verificar os principais causadores da corrosão nas comportas metálicas da barragem do Bacanga;
- ✓ Verificar os impactos ambientais e dos bairros adjacentes à barragem;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As superfícies metálicas, quando em contato com um fluido contendo partículas de suspensão em movimento, seja ele, ar ou água, as ações de colisão, escorregamento ou rolagem dessas partículas neste encontro, podem causar desgastes superficiais. Utilizou-se por muito tempo nas estruturas metálicas às definições sobre tensões admissíveis e em obras como aterros e barragens o equilíbrio estático. Estes dois métodos analisam a segurança determinística, baseando-se em solicitações que podem ser rigorosamente determinadas (GUSMÃO FILHO, 2006).

Existe um modelo simplificado para checar a previsão de vida útil das estruturas pertinente ao ataque da corrosão nas armaduras (Figura 4), onde o tempo decorrido até a despassivação da armadura que está diretamente relacionado com a vida útil do projeto é denominado de iniciação. O acúmulo progressivo da perda de material até um alcance de nível inaceitável da deterioração é denominado de propagação. Neste ponto, torna-se obrigatório a manutenção. A junção destes dois momentos (iniciação e propagação) equivale à vida útil da estrutura (TUUTTI, 1980).



Fonte: TUUTTI (1980).

KRAKER (1982), citado por SILVA JUNIOR (2001), apresenta um dos primeiros trabalhos sobre a aplicação de métodos probabilísticos na previsão da vida útil de estruturas, com uma explanação filosófica da utilização da análise da

confiabilidade para este fim. Considera a influência do meio, as propriedades da estrutura (material e geometria), os estados limites e os critérios de segurança.

Outro ponto importante a ser considerado, é o da segurança: falhas provocadas por corrosão de equipamentos e estruturas podem acarretar acidentes de grandes proporções, como as observadas em rompimentos de adutoras de abastecimento d'água, vazamento de produtos químicos, rompimento de tubulações de combustíveis e outros tipos. Qualquer diferença de potencial entre pontos (armadura e outro metal alcalino) podem gerar uma corrente, iniciando o processo de corrosão. A corrosão tem, como consequência, uma diminuição da seção de armadura e fissuração da estrutura em direção paralela a esta. (CASCUDO, 1997).

Os motivos mais frequentes e causadores da oxidação do ferro estão diretamente relacionados à ação do tempo, ao seu contato direto ou sua exposição à água, e a ação de gases presentes na atmosfera. Estes fatores contribuem diretamente para a agressividade química. (HELENE, 1993).

Na fase de projeto, a durabilidade das estruturas, contribui para que a resistência do material deixe de ser a única característica buscada pelos projetistas de estruturas. Quando as fases de produção das estruturas metálicas são executadas de forma adequada, o tempo de vida útil das mesmas é prolongado. Contudo, ainda assim elaborado dessa maneira, ainda pode ocorrer falhas nas estruturas, em detrimento de sua durabilidade. Devem-se retirar lições destas ocorrências para controle dos fatores que afetam a durabilidade da estrutura. (HELENE, 1993).

2.1 Corrosão

Nos processos corrosivos, devem ser consideradas as variáveis dos materiais metálicos, do meio e das condições operacionais. O estudo conjunto desses fatores proporciona na escolha do material mais adequado para sua utilização em determinados equipamentos ou instalações. (GENTIL, 2012).

A manifestação da corrosão se dar através de reações químicas irreversíveis acompanhadas da dissolução de um elemento químico do material para o meio ou da dissolução de uma espécie química do meio para o material. Sempre que um elemento químico ceder um ou mais elétrons, diz-se que ele se oxida. Da outra forma, quando o elemento químico ganha elétrons, ele se reduz, ou seja, a reação de oxidação ou de redução ocorre transferência de elétrons. (GEMELLI, 2001).

As reações de corrosão envolvem basicamente ânodos, cátodos e eletrólitos. O ânodo e o catodo, também conhecidos como eletrodos, podem consistir de dois metais diferentes, ou áreas diferentes do metal. Durante a corrosão, há essencialmente dois tipos de reações ocorrendo: a reação anódica, que ocorre no ânodo, e a reação catódica que ocorre no cátodo (RAMANATHAN, 2008).

Em termos de oxigênio, oxidação é o ganho de oxigênio por uma substância e sua retirada é denominada redução. Em termos de elétrons, quando existe perda de elétrons por uma substância ocorre o processo de oxidação, e quando acontece ganho, ocorre o processo de redução. Em uma reação de oxirredução observa-se que o elemento que se oxida, perde elétrons e age como agente redutor. Quando o elemento reduzido ganha elétrons, ele age como agente oxidante. Agente redutor é a substância que contém o elemento redutor e agente oxidante é a substância que contém o elemento oxidante. (GENTIL, 2012).

2.2 Mecanismos eletroquímicos

A maioria das reações de corrosão acontece devido ao mecanismo eletroquímico. Destaca-se nesse tipo de processo, a corrosão em água ou solução aquosa, corrosão atmosférica e no solo, este último tipo em presença de umidade. A corrosão que se processa em soluções eletrolíticas nos materiais metálicos é apresentada devido ao mecanismo eletroquímico, devido ao aparecimento de pilhas eletroquímicas ou pilhas de corrosão. (GEMELLI, 2001).

O processo eletroquímico de corrosão pode ser decomposto em três etapas principais (GENTIL, 2012):

- ✓ *Processo anódico*: passagem de íons para a solução;
- ✓ *Deslocamento dos elétrons e íons*: transferência dos elétrons das regiões anódicas para as catódicas pelo circuito metálico e difusão de ânions e cátions na solução;
- ✓ *Processo catódico*: recepção de elétrons, na área catódica, pelos íons ou moléculas existentes na solução.

O mecanismo químico se dar em temperaturas elevadas, por gases ou vapores ou em materiais onde ocorre o ataque de metais por solventes orgânicos isentos de água. Neste mecanismo, ocorrem reações químicas diretas entre o meio

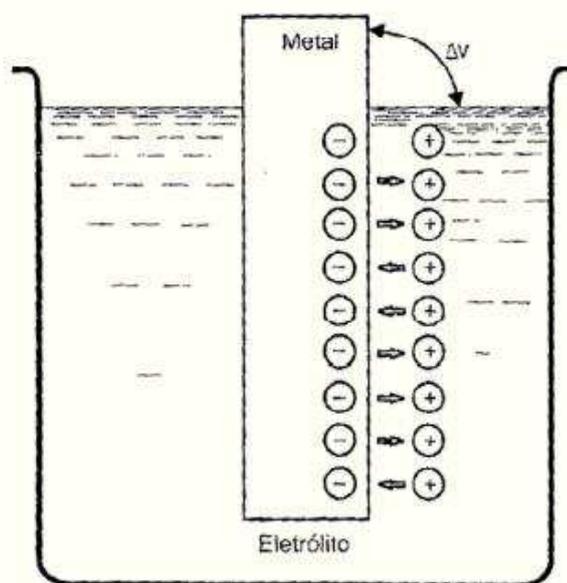
corrosivo e o material metálico, não havendo geração de corrente elétrica. A corrosão química pode acontecer também em materiais não metálicos. (GENTIL, 2012).

2.3 Potenciais eletroquímicos

Quando um metal é imerso (sob qualquer forma) em uma solução eletrolítica, é estabelecida uma diferença de potencial entre as fases (líquida e sólida). Pelo fato da fase sólida ser de natureza elétrica e a fase líquida, de natureza química, chama-se de diferença de potencial eletroquímico. Essa diferença de potencial entre a solução e o metal é observada na superfície metálica do material. A medida da facilidade com que os átomos do eletrodo perdem elétrons ou a facilidade com que os íons ganham elétron é dada pelo potencial de eletrodo. (GENTIL, 2012).

Segundo Nunes (2007, p.06), “no momento em que a energia livre de passagens de íons para a solução se anula, obtêm-se o potencial eletroquímico de equilíbrio”, representado na figura 5 a seguir:

Figura 5 - Estágio de equilíbrio da reação da passagem dos íons para a solução.



Fonte: (Nunes, 2007).

A propensão para que haja a passagem de íons para a solução varia de acordo com o metal. Aqueles metais que possuem uma maior tendência a se oxidar iram concentrar elétrons em suas superfícies e íons positivos em suas soluções. (NUNES, 2007).

2.4 Pilhas eletroquímicas

No estudo da corrosão as pilhas eletroquímicas são de grande importância. Basicamente uma pilha eletroquímica apresenta os seguintes componentes (GENTIL, 2012):

- *Anodo*: eletrodo em que há oxidação (corrosão) e onde a corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- *Eletrólito*: condutor (usualmente um líquido) contendo íons que transportam a corrente elétrica do anodo para o catodo;
- *Catodo*: eletrodo onde a corrente elétrica sai do eletrólito ou o eletrodo no qual as cargas negativas (elétrons) provocam reações de redução;
- *Circuito metálico*: ligação metálica entre o anodo e o catodo por onde escoam os elétrons, no sentido anodo-catodo.

Eliminando um desses componentes, tem-se a eliminação da pilha, e como consequência, a diminuição da possibilidade de ocorrência da corrosão. Obviamente, pode ser retirado do esquema o catodo, a ligação metálica ou o eletrólito. Por ser a própria estrutura metálica, o anodo que é quem se deseja proteger, não pode ser retirado, portanto aplica-se revestimento protetor e/ou proteção catódica nele. (GENTIL, 2012).

2.4.1 Pilha de eletrodos metálicos diferentes

Segundo GENTIL (2012, pag.35), “é o tipo de pilha de corrosão que ocorre quando dois metais ou ligas diferentes estão em contato e imersos num mesmo eletrólito: é a chamada pilha galvânica”.

Estes metais quando estão imersos em uma solução corrosiva, ocorre uma desigualdade de potencial entre eles. Se estes metais entrarem em contatos ou forem colocados em ligação elétrica, a desigualdade de potencial dará origem a um fluxo de corrente entre eles. Assim, o metal menos resistente funcionará como anodo, tendo como consequência o aumento em sua corrosão. E o metal mais resistente, torna-se catodo onde sua corrosão será diminuída. (RAMANATHAN, 2008).

2.4.2 Pilha ativa – passiva

Determinados metais possuem a característica de desenvolverem em suas superfícies metálicas uma película fina e aderente de óxido ou de outro componente que não se dissolvem. Os metais que formam essa película se tornam passiváveis e funcionam como áreas catódicas. (AMORIM, 2012).

Em certos casos, a película formada pode ser destruída ou impedida de formação pelos íons cloreto e com menos capacidade o brometo e o iodeto. (GENTIL, 2012). Acredita-se que a destruição dessa película nesses locais da acontece devido a falhas que possam ocorrer no metal. Dessa forma o metal fica exposto ao meio agressivo, e torna-se ativo (anodo) e ao seu redor grande área de metal passivado (catodos), ocorrendo uma diferença de potencial, denominada de pilha ativa – passiva. (AMORIM, 2012).

2.4.3 Pilha de ação local

Este tipo de pilha ocorre devido às impurezas dos metais, ou seja, heterogeneidades diversas na superfície. É a pilha que ocorre com mais frequência na natureza. (NUNES, 1987).

2.4.4 Pilha de concentração iônica

Segundo GENTIL (2012, pag.39), “pilha formada por material metálico de mesma natureza, em contato com suas soluções de diferentes concentrações”.

2.4.5 Pilha de aeração diferencial

Segundo AMORIM (2012, pag.17), “esta se passa em meio gasoso, onde a pilha é formada de eletrodos pertencentes a um mesmo material metálico em contato com um mesmo eletrólito, porém com teores de gases dissolvidos”.

2.5 Tipos de corrosão

Os processos de corrosão são considerados reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que ocorrem geralmente na superfície de separação entre o meio corrosivo e o metal. Considerado todas as reações químicas que cedem ou recebem elétrons como oxidação-redução, pode-se considerar os processos de corrosão como reações de oxidação dos metais, ou seja, o metal atua como redutor, cedendo elétrons, que serão recebidos por uma substância, que é o oxidante, presente no meio corrosivo. Considera-se então a corrosão como destruição do metal, progredindo através de sua superfície. (GENTIL, 2012).

As formas ou tipos de corrosão são apresentadas considerando-se a aparência, forma de ataque, as variadas causas e os mecanismo da corrosão. Existem muitas formas distintas que a corrosão se apresenta. Da mesma forma, são várias as tentativas de classificação. As mais comuns são (GENTIL, 2012):

- ✓ *A morfologia:* uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular (ou intercrystalina), intragranular (ou transgranular ou transcrystalina), filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- ✓ *As causas ou mecanismos:* por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno do cordão de solda, seletiva (grafítica e dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;
- ✓ *O meio corrosivo:* atmosférica, pelo solo, induzida por microrganismo, pela água do mar, por sais fundidos etc.;
- ✓ *A localização do ataque:* por pite, uniforme, intergranular, transgranular etc.

2.5.1 Corrosão uniforme

A corrosão uniforme (Figura 6) é a forma mais comum e a que gera mais custos à sociedade. Conhecida também como corrosão generalizada, ela provoca perda de massa do material metálico por toda superfície. (Gentil, 2012).

Figura 6 - corrosão uniforme em uma chapa metálica.



Fonte: Gentil (2003).

2.5.2 Por placas

A corrosão por placas (Figura 7) é a que se processa por algumas regiões da superfície metálica do material e não por toda sua extensão, caracterizando-se por apresentar espécies de placas com escavação. (GENTIL, 2012).

Figura 7 - Trecho de chapa com corrosão por placas.

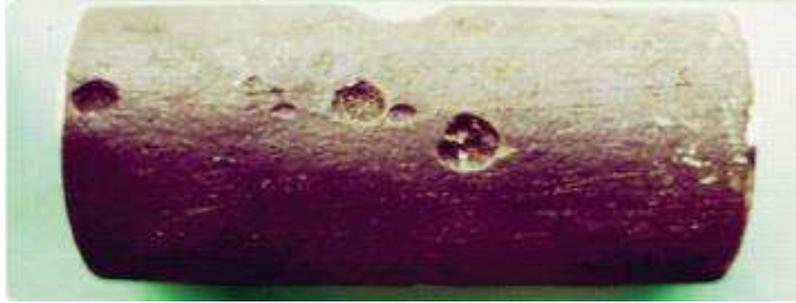


Fonte: Gentil (2012).

2.5.3 Alveolar

A corrosão alveolar (Figura 8) se processa pela superfície metálica do material provocando depressões (sulcos) ou escavações similares a alvéolos, caracterizados por ter um fundo arredondado e uma profundidade maior que seu diâmetro. (Gentil, 2012).

Figura 8 - Corrosão alveolar.



Fonte: Gentil (1996).

2.5.4 Puntiforme ou por pite

A corrosão por pite (Figura 9) se processa em determinados pontos do material metálico produzindo pequenas cavidades de profundidade consideravelmente maior que seu diâmetro e fundo em forma angulosa. (GENTIL, 2012).

Figura 9 - Corrosão por pites em aço inoxidável.

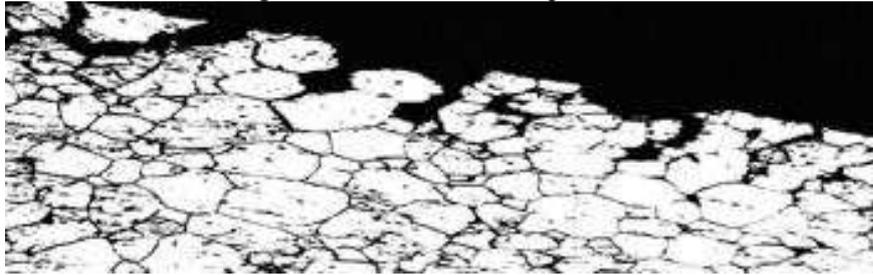


Fonte: Gentil (1996).

2.5.5 Intergranular

A corrosão intergranular (Figura 10) ocorre entre os grãos das redes cristalinas do material metálico, o que ocasiona perda das propriedades mecânicas, podendo resultar em fratura do material quando solicitado por esforços mecânicos. (GENTIL, 2012).

Figura 10 - Corrosão intergranular.



Fonte: Gentil (2003).

2.5.6 Transgranular

A corrosão transgranular (Figura 11) acontece nos grão da rede cristalina do material. Assim como a corrosão intergranular, ocorrem perdas das propriedades do material podendo fraturar quando submetido à sollicitação mecânica. (GENTIL, 2012).

Figura 11 - Corrosão Transgranular.



Fonte: Gentil (1996).

2.5.7 Corrosão Filiforme

A corrosão filiforme (figura 12) se processa sobre a forma de filamentos finos, não profundos, que se propagam em direções diferentes e que não se cruzam. (GENTIL, 2012).

Figura 12 - Corrosão Filiforme em superfície com película de tinta.

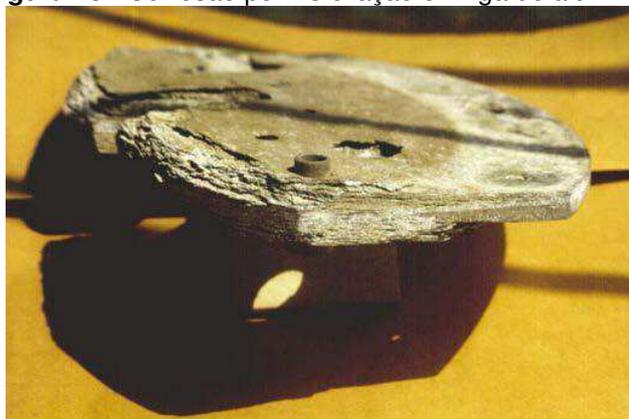


Fonte: Gentil (2003).

2.5.8 Corrosão por Esfoliação

A corrosão por esfoliação (Figura 13) se processa em diferentes camadas, apresentando um produto de corrosão que fica entre a estrutura de grãos alongados e, assim, separa as camadas, ocasionando uma espécie de inchamento do material metálico. (GENTIL, 2012).

Figura 13 - Corrosão por Esfoliação em liga de alumínio.



Fonte: Gentil (2012).

2.5.9 Corrosão Grafítica

A corrosão grafítica (Figura 14) ocorre a temperaturas ambientes, onde o ferro sofre corrosão, fazendo com que reste a grafite intacta. Este tipo de corrosão se processa no ferro fundido cinzento. (GENTIL, 2012).

Figura 14 - Corrosão Grafítica em tubo de ferro fundido cinzento.



Fonte: Gentil (2012).

2.5.10 Dezincificação

O processo de Dezincificação (Figura 15) se dar em pequenas áreas, apresentando formas do tipo alvéolo, ou em áreas maiores em forma uniforme. Observa-se neste processo nas áreas dezincificadas, o aparecimento de resíduos (brancos ou avermelhados) que se contrasta com a coloração da liga. (GENTIL, 2012).

Figura 15 - Processo de Dezincificação em chapas metálicas.



Fonte: Gentil (2012).

2.5.11 Corrosão galvânica

Corrosão que se processa quando dois materiais metálicos, com diferentes potenciais estão em contato em presença de um meio eletrólito, onde ocorre uma diferença de potencial e conseqüentemente, a transferências de elétrons (Figura 16). (GENTIL, 2012).

Figura 16 - Corrosão galvânica em aço inoxidável.



Fonte: Gentil (2003).

2.6 Meios corrosivos

Segundo AMORIM (2012, pag.19), “o tempo de avanço de corrosão de um metal depende das situações do meio no qual está se processa. O meio pode variar conforme a sua composição, seu pH, a temperatura, pressão, radiação e velocidade”.

2.6.1 Atmosfera

Segundo Gentil (2012, p.57), “A importância da atmosfera, como meio corrosivo, pode ser confirmada pelo grande número de publicações científicas relacionadas com ensaios de corrosão utilizando diferentes materiais metálicos”.

O meio ao qual os metais estão frequentemente expostos é denominado atmosfera. Sua composição é variada de acordo com o local, geografia e época do ano, assim, a atmosfera é extremamente complexa. Apesar de ser uma corrosão antiga, a corrosão atmosférica ainda não é completamente compreendida. (RAMANATHAN, 2008).

A corrosão atmosférica pode ser classificada em função do grau de umidade na superfície metálica, em seca, úmida e molhada. (Gentil, 2012):

2.6.2 Atmosfera seca

Este tipo de atmosfera é isenta de umidade, onde não existe nenhum filme de eletrólito na superfície do metal. Nesse meio, a oxidação do metal é lenta e seu

produto de corrosão é resultante de reações químicas puras, afetando propriedades físicas e químicas.

2.6.3 Atmosfera úmida

Este tipo de atmosfera se processa em umidade relativa menor de 100%, faz surgir um filme fino eletrólito que se deposita na superfície metálica. A velocidade do processo corrosivo vai depender do grau dessa umidade relativa, da presença de poluentes atmosféricos e do grau de higroscopicidade dos produtos de corrosão presente.

2.6.4 Atmosfera molhada

A umidade relativa está perto de 100% e ocorre condensação na superfície metálica, observando-se que a superfície metálica fica molhada com o eletrólito, como, por exemplo, chuva e névoa salina depositadas na superfície metálica.

2.6.5 Solo

Segundo GENTIL, (2012, pag.65), “o comportamento do solo como meio corrosivo deve ser considerado de grande importância, levando-se em consideração as enormes tubulações enterradas, como oleodutos, gasodutos, adutoras”.

De maneira geral, os solos variam de lugar para lugar e são diferenciados pela natureza de suas composições e interação com outros meios. Dentre as propriedades de um solo que determinam o controle da sua corrosividade, destaca-se, principalmente a capacidade de reter água, sua adsorção sobre a superfície metálica, sua condutividade, presença de substâncias dissolvidas na água e variações nas concentrações dos constituintes solúveis. (RAMANATHAN, 2008).

O solo contém umidade e sais minerais, alguns desses componentes apresentam características ácidas e básicas. Constituindo-se o eletrólito principalmente da água com sais dissolvidos. (NUNES, 2007).

Segundo GENTIL (2012, pag.65), “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”.

2.6.6 Águas naturais

Os materiais metálicos que tem contato com a água tendem a sofrer corrosão, corrosão essa que vai depender de substâncias que podem está contaminando a água. Dentre os mais frequentes contaminantes têm-se (GENTIL, 2012):

- ✓ Gases dissolvidos – oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, cloro, amônia, dióxido de enxofre, trióxido de enxofre e gás sulfídrico;
- ✓ Sais dissolvidos – cloreto de sódio, de ferro e de magnésio, carbonato de sódio, bicarbonato de cálcio, de magnésio e de ferro;
- ✓ Matéria orgânica de origem vegetal e animal;
- ✓ Bactérias, limos e algas;
- ✓ Sólidos suspensos

2.6.7 Meios marítimos

Segundo RAMANATHAN (2008, pag.176), “o ambiente marítimo é o mais corrosivos de todos os meios naturais, e compreende desde a atmosfera contaminada com sal do mar até as regiões mais profundas do oceano e o lodo sobre o fundo do mar”.

O meio marítimo pode ser dividido, do ponto de vista da corrosão, em cinco zonas (RAMANATHAN, 2008):

- ✓ *Zona lodosa*: pode variar dependendo do nível de sedimentação, forças das marés e da ação das hélices dos navios, próximo às regiões costeiras.
- ✓ *Zona de imersão total e entre marés*: são geralmente cobertas com acumulações espessas da fauna e flora marinha. O limite superior da zona entre marés delimita o limite inferior da zona de respingo.
- ✓ *Zona de respingo*: é exposta a ondas e borrifos de água.
- ✓ *Zona atmosférica*: é exposta ao sol, chuva e vento.

Segundo Ramanathan (2008, pag.176), “a posição destas zonas sobre qualquer estrutura depende de sua localização e variação das marés, e da estabilidade do nível do leito do mar”.

2.6.8 Água do mar

Para Ramanathan (2008, pág.177), “a água do mar é o material mais abundante e cobre dois-terços da superfície terrestre. Ela é principalmente uma solução de cloreto de sódio que contém outros sais”.

A ação corrosiva da água do mar pode ser determinada inicialmente devido sua salinidade, que é praticamente constante em oceanos, mas pode variar em mares interiores. Porém, sua ação corrosiva não se restringe apenas a uma solução salina, pois é um meio corrosivo complexo, constituído de soluções de sais, matéria orgânica viva, gases dissolvidos e matéria orgânica em decomposição, e certamente ocorre uma ação conjunta desses fatores na sua ação corrosiva. (GENTIL, 2012).

2.7 Fatores influentes na taxa de corrosão

2.7.1 Fatores químicos

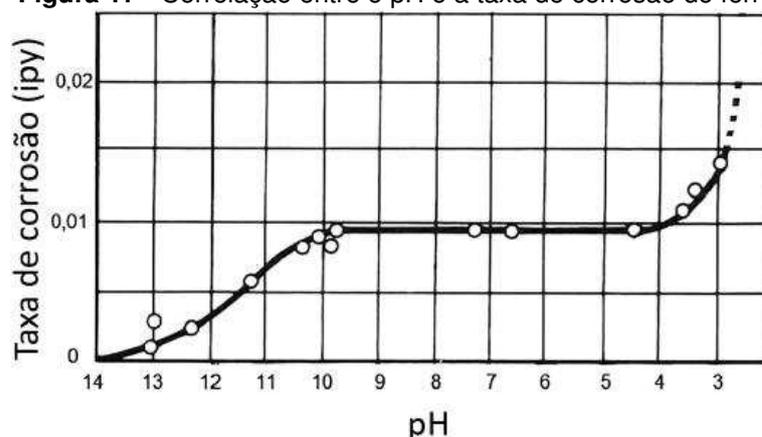
Segundo Torres (2001, pág.18), “os fatores químicos relacionados com a taxa de corrosão podem ser associados basicamente aos gases dissolvidos, à salinidade e ao pH”. Em relação aos gases dissolvidos, os que mais apresentam maior influência são o oxigênio e o gás carbônico (TORRES, 2001).

A salinidade funcionando como mecanismo do processo corrosivo é eletroquímico, os sais constituintes da água do mar a tornam um eletrólito forte, aumentando sua ação corrosiva (GENTIL, 2012).

2.7.2 pH

A influência do Ph frente à taxa de corrosão possui comportamento distinto, depende do tipo de material envolvido no processo. (GENTIL, 2012). O efeito da acidez na velocidade de corrosão do ferro, em água aerada e em temperatura ambiente, pode ser verificado na (Figura 17) a seguir (Maia et.al, 2012):

Figura 17 - Correlação entre o pH e a taxa de corrosão do ferro.



Fonte: Maia et.al, (2012).

Observa-se uma influência ainda mais positiva para o aumento da corrosão quando se tem valores de pHs abaixo de 4. Para valores entre 4 e 10, a corrosão independe do pH, dependendo apenas da rapidez com que o oxigênio difunde para a superfície metálica. Quando os valores de pHs são maiores que 10, o aumento mais pronunciado da alcalinidade do meio faz com que a taxa de corrosão diminua, onde o ferro se torna passivo na presença de álcalis e oxigênio dissolvido. (Maia et.al., 2012).

2.7.3 Fatores físicos

A velocidade com que a água do mar escoar, tem relação direta no aumento do processo corrosivo. Seu movimento pode retirar camadas de produtos de corrosão que estão aderentes à superfície metálica do material, os quais tendem a retardar o mecanismo corrosivo. Com o aumento da velocidade da água, pode-se arrastar uma maior quantidade de oxigênio para a região catódica, o que funcionará com despolarizante, acelerando o processo corrosivo. Por outro lado, quando a velocidade de circulação é pequena, pode-se ter deposição de sólidos, o que aumentará a possibilidade de corrosão por aeração diferencial. (TORRES, 2012).

Ainda segundo TORRES (2012, pag.20), “a relação da temperatura é diretamente proporcional à ação corrosiva, pois seu aumento causa diminuição da polarização e aumento da condutividade de eletrólito e da velocidade de difusão dos íons”. Por outro lado, pode se ter diminuição do processo corrosivo, pois diminui a solubilidade de oxigênio ou de outros gases na água. (GENTIL, 2012).

Quando existe um aumento na pressão, há uma possibilidade de uma maior solubilidade dos gases em água do mar e, com isso, pode acelerar o processo corrosivo. Porém, não é um fator considerável, devido em profundidade o teor de oxigênio ser pequeno. (GENTIL, 2012).

2.7.4 Fatores biológicos

Quando as estruturas metálicas são submergidas em água do mar, inicia-se um processo de incrustações devido a organismos vegetais ou animais que desenvolvem aderentes a superfícies metálicas do material. Há proliferação de algas, limos, cracas etc., que poderão formar, com o silt, depósitos extremamente sólidos e aderentes, construindo o que se denomina de fouling ou biofouling. (GENTIL, 2012).

Para Torres (2012, pag.21), “a imersão de qualquer superfície sólida em meio aquoso inicia imediatamente um contínuo e dinâmico processo com a adsorção de matéria orgânica dissolvida e crescimento de microrganismo, originando biofilme”.

Essas incrustações ou biofouling tem grande influência no desempenho da instalação ou equipamentos submerso em água do mar, como por exemplo (GENTIL, 2012):

- ✓ As instalações podem ficar com peso em excesso;
- ✓ Boias podem diminuir sua capacidade de flutuar;
- ✓ Resistência ao avanço de navios resultando em maior consumo de combustível e aumento da frequência de docagem para limpeza dos casos;
- ✓ Gastos adicionais para eliminar, periodicamente, o biofouling;
- ✓ Redução da sensibilidade e transmissão de som e decréscimo da eficiência de sonar.

2.8 Métodos de combate à corrosão

De acordo com Amorim (2012, pag.25), “para cada grupo de corrosão utiliza-se um determinado método, sendo que as práticas de proteção anticorrosiva adotadas na fase de projeto são umas das mais importantes”. Sendo que na corrosão eletroquímica, a solução mais indicada é além da utilização de medidas para um

projeto adequado, é o emprego da proteção catódica pela sua eficácia. (AMORIM, 2012).

Os métodos de proteção baseiam-se no sentido de acabar ou amenizar a formação das pilhas de corrosão, combatendo eficientemente as formas mais perigosas de corrosão. Várias medidas podem ser tomadas para retardar o processo ou para minimiza-lo, começando pela escolha de materiais e no aspecto construtivo. (AMORIM, 2012).

O controle da corrosão no estágio de projeto deve considerar aspectos tais como (RAMANATHAN, 2008):

- ✓ Seleção de matérias: o critério principal durante a seleção de materiais é a consideração da conformidade funcional dos mesmos, e a habilidade para manter sua função de uma maneira segura, por um período de tempo, a um custo razoável;
- ✓ Compatibilidade do material: durante o projeto de estruturas ou equipamentos multicomponentes, deve-se ter maior cuidado na escolha do material, pois a relação mal concebida entre materiais de componentes individuais podem arruinar o melhor projeto;
- ✓ Variações nas condições ambientais: Se, para um dado conjunto de condições de processo, o material selecionado é inapropriado devido a considerações econômicas ou outras, o problema pode ser contornado alterando-se as condições ambientais, dentro de limites aceitáveis, para capacitar a utilização de outros materiais.

2.8.1 Manutenção

A maioria das estruturas e equipamentos requer algum tipo de manutenção operacional ou preventiva, desde que isto auxilia na diminuição dos (RAMANATHAN, 2008):

- ✓ Custos de recuperação e substituição;
- ✓ Incidência de poluição;
- ✓ Destruição dos maquinários e vida humana;
- ✓ Perdas de produção entre outros.

2.8.2 Controle através do metal – proteção catódica

Existem diferentes métodos usados para o controle da corrosão, e um dos mais utilizado é a proteção catódica. Proteger uma estrutura catodicamente significa eliminar, por processo artificial, as áreas anódicas das superfícies do metal fazendo com que toda a estrutura adquira comportamento catódico. Como resultado dessa eliminação, o fluxo de corrente elétrica anodo/catodo deixará de existir e a corrosão será eliminada. (GALVÃO, 2008).

O conhecimento deste método torna-se cada vez mais necessários para engenheiros e técnicos, devido à construção cada vez maior de muitas instalações importantes tais quais cortinas metálicas para portos, camisas metálicas para poços de água e de petróleo e etc. (GENTIL, 2012).

Atualmente este método de combate à corrosão é uma técnica consagrada no mundo inteiro para combater a corrosão, e é especialmente atraente em ambientes marinhos onde a condutividade da água, devido a sua salinidade, é alta o suficiente para permissão da distribuição uniforme da corrente elétrica sobre toda a superfície metálica da estrutura a ser protegida. (GALVÃO, 2008).

Com a utilização da proteção catódica, as estruturas metálicas mantem-se completamente imunes ao processo corrosivo por um tempo indeterminado, mesmo para aquelas estruturas que estão sem qualquer tipo de revestimento e expostas às condições agressivas do meio. Contudo, a aplicação é mais vantajosa quando as superfícies metálicas estão revestidas, pois assim, a área a proteger é substancialmente reduzida, diminuindo a corrente necessária. (GALVÃO, 2008).

A grande vantagem desse método é permitir o controle seguro da corrosão em instalações que, por estarem enterradas ou submersas, não podem ser inspecionadas ou revestidas periodicamente. (GALVÃO, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Ensaio visual

Foram realizadas inspeções visuais in loco na barragem do Bacanga (Figura 18), para verificar o estado de propagação da corrosão e agressores que pudessem está contribuindo diretamente para o aparecimento do fenômeno corrosivo sobre as superfícies das comportas metálicas. Paralelo a isso, foram feitos registros fotográficos e coleta de material para realização de ensaios.

Figura 18 - Inspeções visuais na barragem do Bacanga.



3.2 Ensaio de corrosão

Neste trabalho foi utilizado o aço a36, fornecido pela “Aço Maranhão” em forma cilíndrica. O ensaio foi realizado no departamento de mecânica e materiais do Instituto Federal do Maranhão – IFMA, no laboratório de corrosão.

Para uma maior confiabilidade no resultado, foram utilizadas quatro amostras na realização do ensaio. As amostras do aço a36 foram cortadas em formas de cubo de lado igual a 8mm. Em seguida foram soldados fios elétricos de cobre e colocado resina no material como ilustra a (Figura 19).

Figura 19 - Amostras a serem submetidas ao ensaio eletroquímico.



Foi realizado o ensaio de polarização potenciodinâmica, uma técnica muito utilizada em estudos de fenômenos corrosivos, para se obter informações sobre o potencial de corrosão dos materiais. O ensaio foi realizado após as amostras serem submetidas a um meio de 3,5% de NaCl, a fim de obter condições de corrosão em meio salino. O equipamento utilizado para realização do ensaio foi o potenciômetro. A célula eletroquímica (figura 20) foi constituída por três eletrodos (figura 21). O eletrodo de trabalho foi o aço a36 (C). Como eletrodo de referência, foi utilizado o eletrodo de calomelano saturado (B), e como contra-eletrodo foi utilizado um eletrodo de platina (A).

Figura 20 - Célula eletroquímica para o ensaio de polarização.

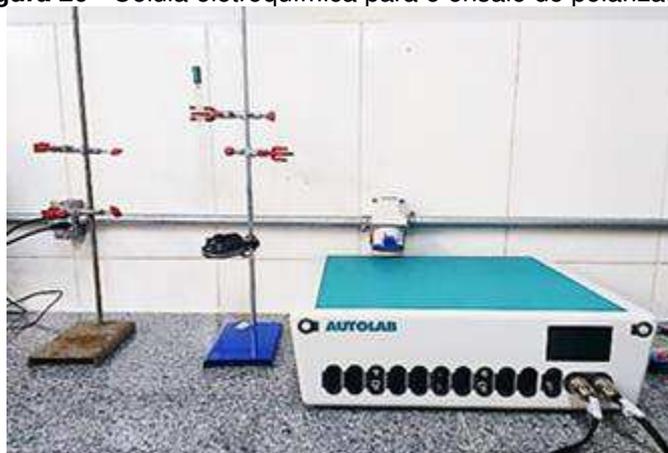
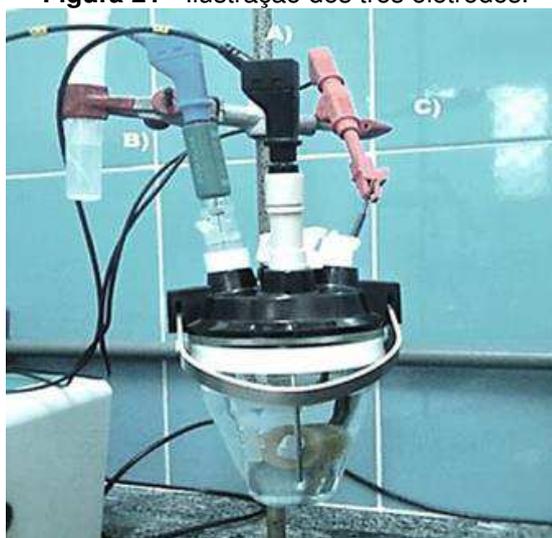


Figura 21 - Ilustração dos três eletrodos.



3.3 pH e OD

Para realização dos ensaios do potencial hidrogeniônico (pH), e oxigênio dissolvido (OD), foram coletadas amostras da água da barragem do Bacanga do lado do mar e do lado do lago. Os procedimentos para realização dos ensaios foram os mesmo para as amostras coletada (mar e lago), e a fim de se obter uma maior confiabilidade nos resultados, foi feito uma triagem para chegar a um valor final. O ensaio aconteceu no laboratório do prédio de química da Universidade estadual do maranhão – UEMA.

3.3.1 pH

Foi realizado o ensaio do potencial hidrogeniônico (pH) para verificar se o mesmo possui influência direta devido o valor de sua acidez, no fenômeno corrosivo sobre as comportas metálicas da barragem do Bacanga. A determinação do pH das amostras (mar e lago) ocorreu através do método colorimétrico, onde o valor do pH é dado em intervalos, e que consiste no uso de uma fita (Figura 22), que contém substâncias colorimétricas ligadas covalentemente com a celulose do papel reagente.

Figura 22 - Fita colorimétrica.

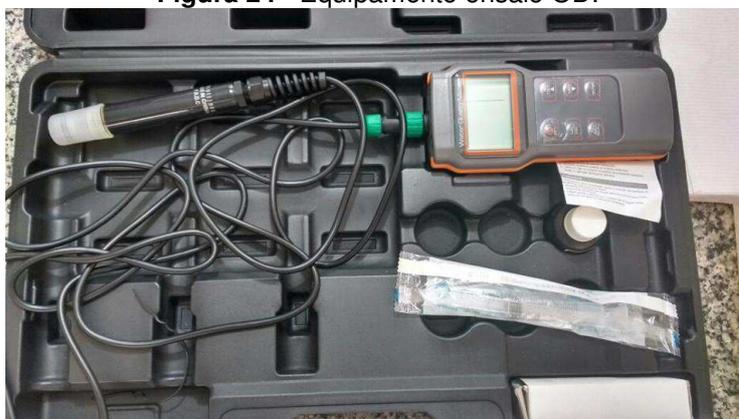
Em cada amostra (mar e lago) foi introduzida uma fita (Figura 23), após alguns segundos, através da mudança de coloração, foi possível a detecção do valor do pH por meio da comparação da cor resultante com a tabela de cores apresentada na caixa das fitas.

Figura 23 - Procedimento ensaio pH.

3.3.2 Oxigênio Dissolvido

Foi realizado ensaio de oxigênio dissolvido para se obter informações do oxigênio presente na água (mar e lago) da barragem do Bacanga, e verificar sua influência nos impactos ambientais e bairros adjacentes. O equipamento utilizado para realização do ensaio foi o Medidor multiparâmetros Wacen Quality Meter AKSO (figura 24).

Figura 24 - Equipamento ensaio OD.



Foi feito a imersão do eletrodo do equipamento dentro das amostras de águas (mar e lago) (Figura 25), para obtenção do valor de oxigênio dissolvido (OD). O valor foi exibido na tela do equipamento utilizado no ensaio.

Figura 25 - Procedimento ensaio OD.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultado do Ensaio Visual

De acordo com as inspeções visuais realizadas in loco na barragem do Bacanga, pode-se verificar que a corrosão começa a se propagar pelas superfícies das comportas metálicas, de uma maneira ainda não muito acentuada como mostra em destaque a (Figura 26).

Figura 26 - Propagação da corrosão sobre a superfície das comportas.



Verificou-se também através dos ensaios visuais que, as comportas metálicas estão diretamente em contato com a água do mar como mostra em destaque a (Figura 27). Segundo GENTIL (2012), nesse meio ocorre à redução do oxigênio por está em contato direto com as estruturas metálicas, contribuindo para o aparecimento da corrosão.

Figura 27 - Comportas em contato direto com a água.



Outro ponto identificado com a realização das inspeções visuais foi a instalação bastante acentuada de cracas nas partes inferiores das comportas (Figura 28). Segundo GENTIL (2012), esses organismos podem penetrar na película da tinta e, com o seu crescimento, as extremidades afiadas das conchas cortam a película de tinta que dão a proteção às comportas, facilitando para a ocorrência do processo corrosivo.

Figura 28 - Cracas instaladas na parte inferior das comportas.



Ainda de acordo com a realização das inspeções visuais foi verificado a deterioração de corrimãos (Figura 29) que fazem parte da estrutura da barragem do Bacanga. Que de acordo com (Reis et.al, 2007) é características do fenômeno da

maresia, uma “neblina marítima” digna de ambientes costeiros que levam as partículas da água do mar a entrarem em contato direto com as superfícies metálicas presentes no local, contribuindo para o aparecimento do processo corrosivo.

Figura 29 - Deterioração do corrimão devido ao fenômeno da maresia.



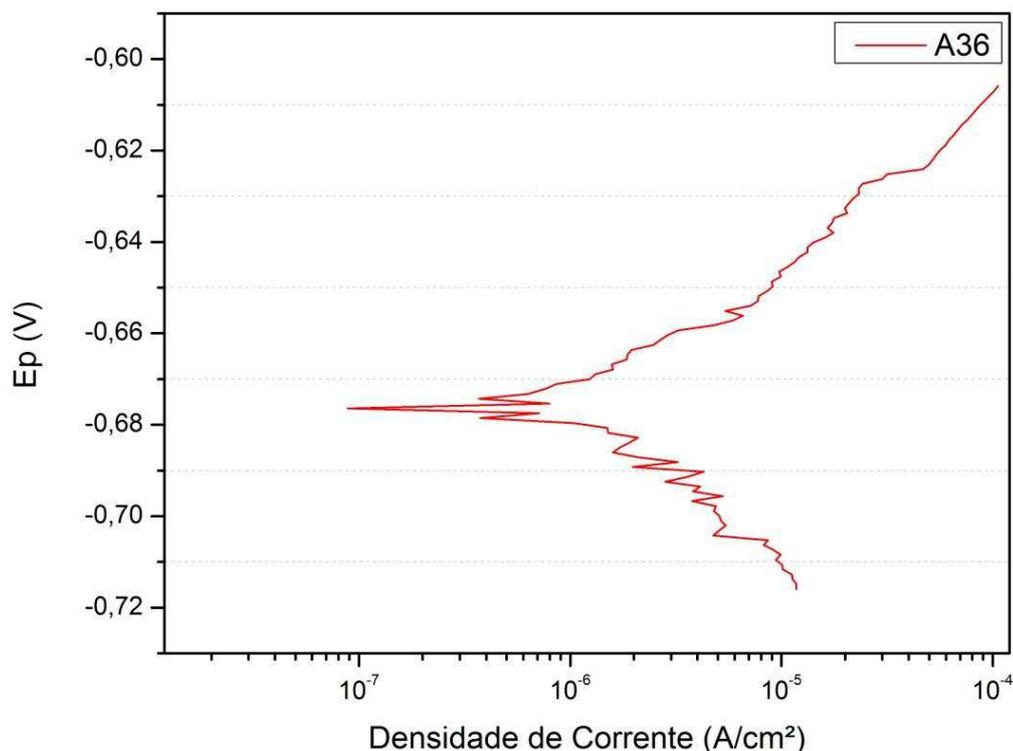
4.2 Resultado do Ensaio de Corrosão

A (figura 30) mostra o ensaio de polarização potenciodinâmica para o aço a36, onde se pode observar um potencial de corrosão (E_{cor}) em meio salino em torno de -0.677 V. O potencial de corrosão (E_{cor}) pode ser definido como aquele em que a taxa de oxidação é exatamente igual à taxa de redução, o potencial a partir do qual se inicia o processo de corrosão metálica. No (E_{cor}) as correntes catódicas (i_c) e anódica (i_a) são iguais em magnitude compondo a corrente de corrosão.

A partir do potencial de corrosão, observa-se na Figura D, à medida que aumenta (E_{cor}), a densidade de corrente também aumenta, ou seja, (a medida de densidade de corrente é diretamente proporcional à taxa de corrosão), até serem atingidos os valores potencial crítico de passivação (E_{crit}) e a de densidade crítica de passivação (i_{crit}), na qual a transição ativo-passivo ocorre. A região passiva se estende até o potencial de pite (E_p), apresentando uma densidade de corrente mínima de passivação (i_{pass}). Após atingir determinado valor de potencial, o potencial de pite

(E_p), este equilíbrio deixa de existir e o material metálico volta a apresentar dissolução devido à ruptura da película passivadora superficial.

Figura 30 - Gráfico do potencial de corrosão do material a36.



4.3 Resultado do Ensaio do potencial Hidrogeniônico (pH)

Os resultados dos ensaios do potencial hidrogeniônico das amostras (mar e lago) da barragem do Bacanga são apresentados na tabela 1:

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de pH.

Amostras	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Resultado
Lago	Entre 6 e 7			
Mar	Entre 6 e 7			

Como podemos observar na Tabela 1, todos os ensaios de pH realizados das amostras (mar e lago) obtiveram valor entre 6 e 7. Segundo o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) o valor do pH para águas salinas tem que obedecer o intervalo de 6,5 a 8,5. E para Gentil (2012), o pH da água do mar tem que apresentar entre valores 7,2 a 8,6. Logo, pode-se concluir que, os valores encontrados nos ensaios do potencial hidrogeniônico estão dentro dos valores estabelecidos pela

literatura, ou seja, não possui muita influência no processo corrosivo das comportas metálicas da barragem do Bacanga.

4.4 Resultado do Ensaio de Oxigênio Dissolvido

Os resultados do ensaio do Oxigênio Dissolvido das amostras (mar e lago) da barragem do Bacanga são apresentados na tabela 2:

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de OD.

Amostras	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Resultado
Lago	3,0 mg/L	3,4 mg/L	3,6 mg/L	3,33 mg/L
Mar	9,1 mg/L	6,4 mg/L	9,4 mg/L	8,3 mg/L

Através da tabela 2 podemos observar que, os valores finais do oxigênio dissolvido para as amostras mar e lago são respectivamente 8,3 e 3,33 mg/L. Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o valor de OD para águas salinas não pode ser inferior a 6 mg/L. Logo, pode-se concluir que o valor do OD do mar é superior ao valor estabelecido pela literatura, estando assim dentro dos padrões, não prejudicando a fauna existente do lado do mar. Enquanto o valor do OD do lago é inferior aos valores estabelecidos pela literatura, não estando dentro dos padrões, e portanto, influenciando diretamente no que diz respeito aos impactos ambientais, tal qual, o grande percentual de mortes da fauna presente do lado do lago da barragem do Bacanga e aos impactos nos bairros adjacentes, ao qual um grande número de pescadores estão ficando sem o seu principal produto.

4.5 Proposta do Método de proteção anticorrosivo.

Como mencionado anteriormente, as comportas metálicas da barragem do Bacanga tem importância no que diz respeito aos aspectos sociais e ambientais. Portanto se faz necessário a aplicação de um método de proteção anticorrosivo eficiente a fim de prolongar a vida útil das comportas, evitando assim, problemas futuros. A solução hipotética proposta no início deste trabalho para inibir a propagação da corrosão nas superfícies metálicas das comportas, de acordo com a literatura não é a mais indicada para o ambiente de serviço ao qual estão expostas,

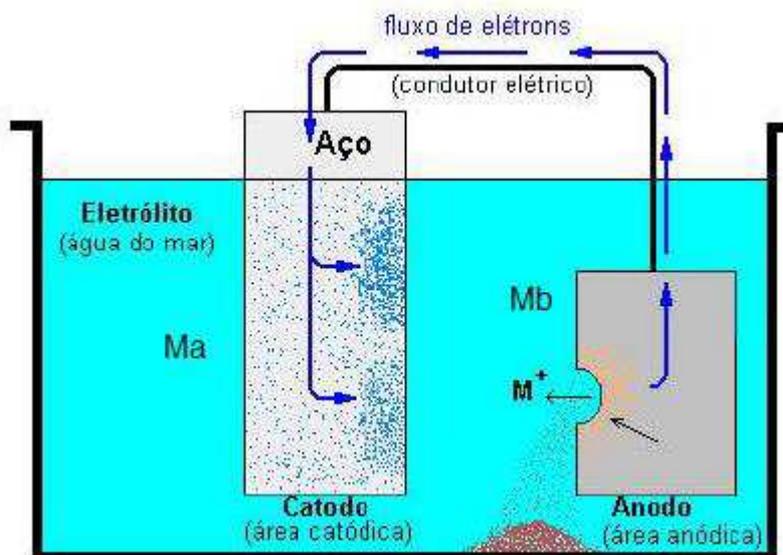
pois, a tinta ameniza a propagação da corrosão em um espaço de tempo considerado curto, mas não inibi o processo corrosivo, o que significaria um custo bastante elevado para as várias manutenções que teriam de serem feitas para o retoque da tinta.

A proposta eficiente para a proteção das comportas metálicas da barragem do Bacanga contra o fenômeno da corrosão é o método de proteção catódica galvânica, conhecido também como proteção catódica por anodo de sacrifício, pois esse método é especialmente atraente para o ambiente de serviço ao qual as comportas estão expostas, (ambiente marinho), onde a condutividade da água, por conta da sua salinidade, é alta o suficiente para permitir a distribuição uniforme da corrente sobre toda a superfície da estrutura a ser protegida.

4.5.1 Princípio de funcionamento

Sendo “Ma” as comportas metálicas da barragem do Bacanga e “Mb” o anodo de sacrifício (Zn, Mg, ou Al), em contato eletrolítico Figura 31, vai existir uma transferência de elétrons e a direção da transferência depende dos potenciais de corrosão dos dois metais no eletrólito.

Figura 31 - Princípio de funcionamento anodo de sacrifício.



Como o potencial de corrosão do metal Ma (comportas) é mais positivo que o dos metais utilizados como anodos (Mb), então a transferência de elétrons será de Mb para Ma. Esta transferência resultará no aumento do potencial de Mb e diminuição do

potencial de Ma. Em consequência disto, a velocidade de corrosão de Mb (anodos de sacrifícios) é aumentada e a de Ma (comportas) diminuída. Se o potencial de Ma for diminuído suficientemente, sua corrosão poderá ser reduzida para níveis aceitáveis, ou completamente extinta.

As vantagens da utilização do método de proteção catódica por anodo de sacrifício são listadas abaixo:

- ✓ Não requer fonte de potência externa;
- ✓ Facilidade de instalação;
- ✓ Perigo de falha no sistema de proteção é mínimo;
- ✓ Facilidade para se atingir distribuição de corrente uniforme;
- ✓ A interação devido à proteção catódica de instalações vizinhas é mínima;
- ✓ Economia por proteger sistemas pequenos;
- ✓ Requerimento de manutenção são baixos;
- ✓ Custos de manutenção são baixos e consistem de substituição de anodos.

Portando, devido ser o método mais empregado em ambientes marinhos, e possuir grandes vantagens na sua utilização, o método proposto para inibir a corrosão nas comportas metálicas da barragem do Bacanga é a proteção catódica por anodo de sacrifício.

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, verificou-se que os objetivos do trabalho foram alcançados, uma vez que verificou o potencial de corrosão do material das comportas em seu ambiente de serviço, analisaram-se as principais causas de deterioração das comportas, verificaram-se os impactos ambientais e dos bairros adjacentes à barragem, o que possibilitou propor um método de proteção anticorrosivo para as comportas metálicas da barragem do Bacanga.

Na análise feita através das inspeções visuais observou-se que as principais causas para a deterioração das comportas devido ao processo da corrosão são: o contato direto com a água; o fenômeno da maresia e a presença acentuada de cracas na parte inferior das comportas. O resultado do potencial hidrogeniônico (pH) da água da barragem, mostrou que está dentro dos padrões, não tendo influência direta para a corrosão nas comportas.

Através do ensaio de polarização potenciôdinâmica, obteve-se o potencial de corrosão do material das comportas (a36) em torno de $-0,677V$, o que significa que o material das comportas possuem uma boa resistência à corrosão em seu ambiente de serviço.

Diante dos resultados obtidos na realização do ensaio de oxigênio dissolvido (OD), verificou-se que a água do lado do mar está dentro dos padrões estabelecidos, enquanto a água do lago está fora dos padrões, com apenas $3,33 \text{ mg/L}$ de oxigênio, o que está resultando em impactos ambientais e aos bairros adjacentes devido as mortes frequentes de peixes.

Concluindo, observando os resultados obtidos, propôs-se o método de proteção catódica por anodo de sacrifício para inibir a corrosão sobre as superfícies metálicas das comportas da barragem do Bacanga, que será desenvolvido e aplicado em trabalhos futuros.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Verificar a relação custo/benefício dos materiais utilizados como anodo de sacrifício, objetivando selecionar o mais viável.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, Simone Cezar de. **O Foco na Corrosão**. 2012. 43f. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia da Produção) – Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, 2012.
- CALLISTER Jr, William. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 5ª Ed. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2009.
- CASCUDO, O. **O Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, 1997.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº357/05**. Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Brasília, SEMA, 2005.
- GALVÃO, Mariana Machado. **Efeito do potencial de proteção catódica na corrosão microbiologicamente induzida**. 2008. 118f. Dissertação (Pós-graduação em tecnologia de processos Químicos e Bio-químicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- GEMELLI, Enori. **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, c2001.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2003.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão. 6ª Ed. Revisada**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2012.
- GUSMÃO FILHO, J. **Desempenho de obras geotécnicas**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2006.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese (Docência-livre) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MAIA, D. J.; SEGRE, N.; SCATIGNO, A.C.; STELLA, M. B. Experimento sobre a influência do pH na corrosão do ferro. **Química Nova na Escola**. São Paulo, v.37, n.1, p.71-75, 2015.
- NUNES, Laerce de Paula. **Fundamentos de Resistência à Corrosão**. Rio de Janeiro: Interciência: IBP: ABRACO, 1987.
- NUNES, Laerce de Paula. **Fundamentos de Resistência à Corrosão**. Rio de Janeiro: Interciência: IBP: ABRACO, 2007.

RAMANATHAN, Lalgudi V. **Corrosão e seu Controle**. São Paulo: Hemus, 2008.

REIS, M.S; JESUS, R. M. A maresia no Ensino da Química. **Química Nova na Escola**. Erexim, v.1, n.26, p. 17-20, 2007.

SILVA JUNIOR, J.Z.R. **Argamassa de Reparo Estrutural**, Dissertação de Mestrado. São Paulo, USP, 2001.

SILVA, V.P. **Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**. São Paulo: Zigurate Editora, 1.1981.

TORRES, Eduardo da Silva. **Cinética de Parâmetros Microbiológicos na Formação de Biofilmes**. 2001. 91f. Tese (Mestrado em Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

TUUTTI, K. **Corrosion on steel in concrete**. Stockholm, CBI Forsking, Swedish Cement and Concrete Research, 1982. 486p.

VIANA, HERBERT RICARDO GARCIA. PCM- **Planejamento e Controle de Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2002.