

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
ENGENHARIA HABILITAÇÃO MECÂNICA

ALAN GOMES SILVA

**“ANÁLISE DA CORROSÃO NA ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO DA BARRAGEM DO RIO BACANGA, PARA PROPOR UM
MÉTODO ANTICORROSIVO”.**

São Luís – MA
2016

ALAN GOMES SILVA

**“ANÁLISE DA CORROSÃO NA ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO DA BARRAGEM DO RIO BACANGA, PARA PROPOR UM
MÉTODO ANTICORROSIVO”.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
junto à Coordenação do Curso Bacharelado
em Engenharia Habilitação Mecânica como
pré-requisito para conclusão de curso.

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

São Luís – MA
2016

Silva, Alan Gomes.

Análise da corrosão na estrutura de concreto armado da barragem do rio bacanga para propor um método anticorrosivo / Alan Gomes Silva. – São Luís, 2016.

37 f

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

Orientador: Prof. Me. Francismar Rodrigues de Sousa.

1. Corrosão. 2. Barragem. 3. Concreto. I. Título.

CDU 620.193:624.012.45:627.82(812.1)

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
ENGENHARIA HABILITAÇÃO MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“ANÁLISE DA CORROSÃO NA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO DA
BARRAGEM DO RIO BACANGA, PARA PROPOR UM MÉTODO
ANTICORROSIVO.”**

Elaborada por:

Alan Gomes Silva

Como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia
Mecânica.

Aprovado em: __/__/2016

Pela Comissão Examinadora

Prof. MSc. Francismar Rodrigues De Sousa-Orientador

Prof.MSc. Paulino Cutrim Martins-Examinador

Prof.Msc. Núbia Célia Bergê Cutrim-Examinadora

São Luis-MA

2016

DEDICATÓRIA

*“Dedico a todos os que colaboraram
para que este trabalho fosse realizado”*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar durante toda trajetória de minha vida, e iluminar meus passos sempre para o melhor caminho, agradeço a meus pais por terem me dado todo o suporte durante meus estudos, pelos ensinamentos que me transformaram em quem eu sou hoje, e por sempre terem acreditado em meus sonhos e objetivos. Agradeço a minha antes amiga, namorada e hoje noiva, Wyllyta, por está ao meu lado me apoiando e me motivando a nunca desistir, e por ela ter se transformado em uma de minhas motivações diante de qualquer situação.

Agradeço ao meu amigo Nelson Luis Costa Dos Santos Filho, por ter feito e ainda fazer parte dessa trajetória de aprendizado, por está sempre disposto a encarar os desafios que com sua ajuda se tornaram mais “fáceis”.

Sei que não estou citando todos que participaram dessa trajetória de aprendizado, mas quero deixar registrado aqui o meu muito obrigado a todos.

“Até aqui nos trouxe o Senhor”

Alan Gomes Silva

RESUMO

O presente trabalho visa propor um método anticorrosivo para a estrutura de concreto armado da barragem do rio Bacanga, através de uma revisão bibliográfica, sobre corrosão em estrutura de concreto armado, foi realizado também um ensaio de pH da água presente no ambiente de serviço da estrutura de concreto armado, para verificar o índice de acidez ou alcalinidade da água presente, analisado também uma das principais causas da corrosão em estrutura de concreto armado de acordo com a literatura, foi apresentado as condições operacionais reais de como está a estrutura de concreto armado no que se refere a corrosão.

Palavras-Chaves: Corrosão; Concreto; Barragem.

ABSTRACT

The presente Work aims to propose na anticorrosive method for the Bacanga river dam, through a literature review, on corrosion in reinforced concrete structure, a water pH test was also carried out in the servisse environment of the structure of reinforced concrete, to verify the acidity or alkalinity index of the presente water, also analyzed one of the main causes of the corrosion in the structure of reinforced concrete according to the literature, it was presented the actual operacional condicions of how is the structure of reinforced concrete in the which refers to corrosion.

Key Words: Corrosion; Concrete; Dam.

Lista de Figuras

Figura 1-Eschema do processo de corrosão do aço no concreto	13
Figura 2-Custo da corrosão por setor industrial.....	14
Figura 3-Barragem do rio Bacanga.....	15
Figura 4-Processo Metalúrgico.....	17
Figura 5-Corrosão Uniforme em chapa de aço carbono	18
Figura 6-Pites em tudo de aço carbono.....	18
Figura 7-Barra de aço com corrosão sob tensão fraturante.....	19
Figura 8-Tipos de corrosão em uma barra de aço em meio concreto.....	20
Figura 9-Teste de carbonatação no concreto com solução de fenolftaleína.....	24
Figura 10-Relação entre o pH e a taxa de corrosão/ano.....	25
Figura 11-Corrosão na armadura de aço do concreto.....	26
Figura 12-Tabela de cobrimento da armadura de aço.....	27
Figura 13-Representação esquemática da penetração de CO ₂ por difusão e do processo de carbonatação.....	28
Figura 14-Fluxo de desenvolvimento da pesquisa.....	29
Figura 15-Pontos de corrosão na estrutura de concreto armado da barragem do rio Bacanga.....	30
Figura 16-Desprendimento do reboco na estrutura de concreto armado da barragem do rio Bacanga.....	30
Figura 17-Equipamento utilizado no ensaio do potencial Hidrogeniônico.....	31
Figura 18-Realização do ensaio.....	31
Figura 19-Resultado para as duas amostras.....	32
Figura 20-Sistema de proteção e reparo da corrosão das armaduras das estruturas de concreto	33

Sumário

1.INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo	15
1.1.1 <i>Objetivo Geral.....</i>	15
1.1.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Definição de Corrosão.....	16
2.2 Classificações	17
2.3 Tipos de corrosão em uma barra de aço imersa em meio concreto.....	20
2.4 Meios corrosivos	21
2.4.1 <i>Atmosfera</i>	21
2.5 Umidade Relativa	21
2.6 Fratura	23
2.7 Oxidação, Redução, Íons	23
2.8 Pilha Eletroquímica.....	23
2.9 Corrosão no Concreto.....	24
2.10 Prevenção.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Pesquisa para Geração de Tecnologia Adequada	29
3.1.1 <i>Inspeções Visuais.....</i>	29
3.1.2 <i>Ensaio de Ph</i>	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 Resultados	32
4.2 Discussões	32
4.3 Método de Proteção Anticorrosivo Proposto Para a Estrutura de Concreto Armado	33
5. CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

Desde quando se começou a usar o concreto armado, em meados do século XIX, as obras estruturais, desde as obras de artes até as grandes estruturas como represas, por exemplo, vem resistindo as sobrecargas e tensões ambientais. Considerou-se por muito tempo o concreto como um material que resistisse para sempre, porém com o passar do tempo começou a apresentar manifestações de defeitos com grande frequência e intensidade, sendo nesses casos necessários grandes custos para recuperação da estrutura.

Esses defeitos sempre comprometeram o aspecto estético e diminuíram a capacidade de resistência da estrutura, gerando assim riscos de segurança, não somente a estrutura, mas também a vida de quem a utiliza.

O defeito citado neste trabalho se refere à corrosão, segundo GENTIL (2007) a corrosão é, em geral, um processo espontâneo, e não fora o emprego de mecanismos 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.

O aumento da esbeltez das estruturas, reduzindo as dimensões das peças estruturais e o cobrimento das armaduras e incrementando as tensões de trabalho, favorecem a tendência à fissuração e reduz a proteção das armaduras. A industrialização é também um fator que causa o aumento da agressividade do meio ambiente.

As obras de artes da engenharia inegavelmente são um legado econômico que pode ser transformado em danos materiais, ambientais e de vida e dentro desta expectativa é que todas as ações técnicas e gerenciais da engenharia são permeadas por responsabilidades e devem ser acompanhadas desde a sua fase embrionária da concepção, do projeto em si, da sua análise, a sua construção, o seu controle e manutenção para que a obra tenha uma estrutura estável, seja confiável no seu uso e duradoura durante a sua vida útil, enfim tenha estabilidade estrutural.

A estrutura deve ter estabilidade para suportar as mais variadas solicitações e outras possíveis influências diversificadas desde a sua construção de modo a manter a integridade estrutural. O desempenho do sistema estrutural é analisado em

termos da segurança oferecida pela estrutura em termos da ruptura dos materiais envolvidos e em função aos movimentos e deformações próprios ou induzidos, em decorrência do seu carregamento, da sua construção e do uso em determinado ambiente em relação à agressividade do meio.

Propõe-se um modelo simplificado de previsão de vida útil das estruturas relacionado com o ataque por corrosão das armaduras (figura 1). O autor chama de iniciação o tempo decorrido até a despassivação da armadura que corresponde à vida útil de projeto. A propagação compreende o acúmulo progressivo da deterioração, até que se alcance um nível inaceitável da mesma. A partir deste ponto a manutenção torna-se obrigatória. Pode-se definir corrosão como a interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica. Basicamente, são dois os processos principais de corrosão que podem sofrer as armaduras de aço para concreto armado: a oxidação e a corrosão propriamente dita. Por oxidação entende-se o ataque provocado por uma reação gás-metal, com formação de uma película de óxido (TUUTTI,1980).

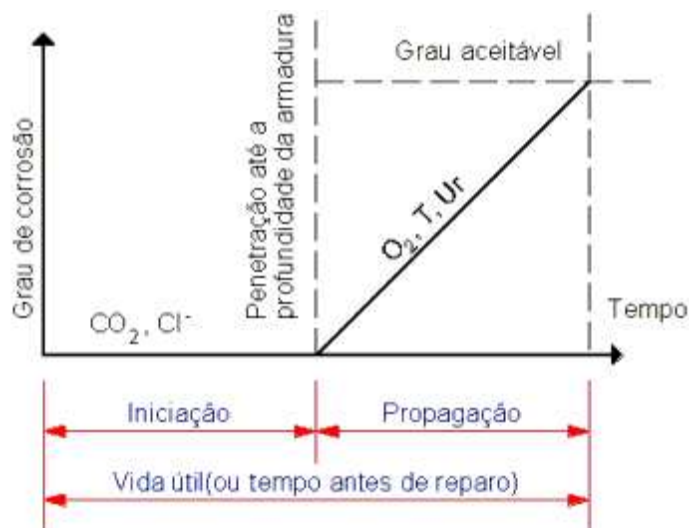


Figura 1: Esquema do processo de corrosão do aço no concreto (TUUTTI, 1980).

Este fenômeno é causador de grandes prejuízos nas mais diversas áreas (CRAMER, 2005). Os problemas de corrosão são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades, como por exemplo, nas indústrias química, petrolífera, petroquímica, naval, de construção civil, automobilística, nos meios de transporte aéreo, ferroviário, marítimo, nos meios de comunicação, assim como na odontologia

(aparelhos, restaurações metálicas), na medicina (próteses ortopédicas). Os custos da corrosão por setor industrial da indústria americana, é destacado na figura 2.

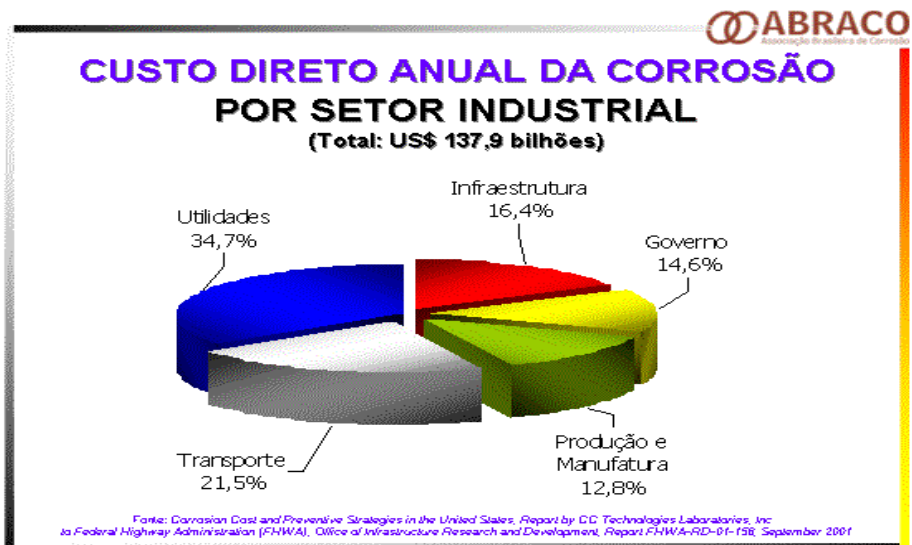


Figura 2 – Custo da corrosão por setor industrial (ABRACO, 2013)

A corrosão apresenta características externas que nos permite identificar e classificar o tipo de corrosão apresentada, sua natureza, seus mecanismos e através dos dados colhidos propor um método anticorrosivo adequado.

Uma das principais causas da corrosão em estruturas de concreto armado é a carbonatação, este dado deve ser levado em consideração para podermos tratar diretamente o problema.

A carbonatação esta relacionada diretamente com a emissão de CO₂, em grandes centros urbanos sua ocorrência é mais frequente devido a grande movimentação de veículos automotores.

Este trabalho de conclusão de curso teve motivação após a realização de um projeto de iniciação científica, que se destinou a analisar a corrosão na estrutura de concreto armado da barragem do rio Bacanga em São Luis-MA.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um método anticorrosivo para a estrutura de concreto armada da barragem do rio Bacanga- São Luís (MA)

1.1.2 Objetivos Específicos

- Fazer uma revisão bibliográfica sobre corrosão em estrutura de concreto armado, identificando suas causas e efeitos.
- Apresentar as reais condições estruturais da barragem do rio Bacanga, no que diz respeito a corrosão na estrutura de concreto armado.

A obra foi executada há mais de três décadas e os procedimentos tecnológicos adotados podem ter sido ultrapassados uma vez que para facilitar o lançamento do concreto em peças cada vez mais estreitas e mais armadas, utilizou-se concretos mais fluidos e compostos com materiais mais finos, resultando em um produto final de qualidade inferior.



Figura 3-Barragem do rio Bacanga Foto: O autor

Até o final da década de 80, a resistência à compressão ainda era, praticamente, o único parâmetro adotado para avaliar a qualidade do concreto. Em função disto, está ocorrendo uma degradação mais acelerada nas estruturas de concreto armado. Surge então um conceito até então pouco conhecido e praticamente não utilizado: a durabilidade do concreto. Este novo parâmetro é a capacidade do concreto de resistir às intempéries e aos demais processos de degradação.

A corrosão de armaduras é a principal manifestação patológica em estruturas de concreto. 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 produtos anticorrosivos, podem não somente evitá-la como aumentar a vida útil da estrutura.

Ante ao exposto e sob a óptica da diagnose 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 das pontes e barragens da cidade de São Luís do Maranhão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Definição De Corrosão

Corrosão é a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por reação química ou eletroquímica (HELENE, 1986).

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 natureza na forma de minério, e necessitam passar por um processo de recebimento de energia para se transformarem na forma de um metal (HELENE, 1986).

De forma geral podemos entender a corrosão como a perda de energia do metal, retornando desta forma para o seu estado mais estável, o minério (GENTIL, V 2003).



Figura 4 - Processo Metalúrgico
Fonte: GENTIL, 2003, p.06

O entendimento do que é corrosão é essencial para que possamos tomar medidas de controle, e através da própria corrosão podemos controlar a corrosão em materiais que desejamos proteger em detrimento de outro material, como é o caso da proteção catódica, onde um metal é posicionado propositalmente para ser oxidado e assim evitar a corrosão da estrutura principal (GENTIL, V 2003).

2.2 Classificações:

A corrosão pode ser classificada de acordo com sua morfologia, ou seja, a forma como ela se apresenta no material, ou de acordo com sua natureza, química ou eletroquímica.

A corrosão química é dita como corrosão seca, pois não há contato com a água, é um processo gás-metal, já a corrosão eletroquímica é a corrosão dita como corrosão molhada, pois se desenvolve em um processo com a presença de água (GENTIL, V 2003).

“Alguns autores afirmam que a corrosão química também é eletroquímica, embora em menor escala por apresentar menor quantidade de eletrólito, e não concordam, portanto com o termo corrosão seca, bem como diferenciam corrosão química de oxidação” (CASCUDO, 1997, p.18).

A corrosão é um processo extremamente lento e não deteriora substancialmente a superfície metálica, salvo situações em que o gás presente no ambiente é extremamente agressivo (GENTIL, V 2003).

A corrosão pode ser classificada segundo sua morfologia de várias formas, neste trabalho iremos atentar para as corrosões classificadas por: corrosão uniforme, corrosão por pite e corrosão sobre tensão fraturante (GENTIL, V 2003).

A caracterização por morfologia auxilia bastante na aplicação de medidas de controle contra a corrosão, bem como suas causas (GENTIL,V 2003).

A corrosão uniforme denominada de generalizada, ocorre em toda a superfície do material e provoca a deterioração da superfície uniformemente (CASCUDO ,1997).



Figura 5-Corrosão Uniforme em Chapa de Aço Carbono (GENTIL, V 2007)

A corrosão por pite, conhecida também por corrosão puntiforme ocorre em pontos, dando a região da estrutura uma aparência de pontilhada, os pontos são cavidades ocasionadas pela corrosão, apresentam uma profundidade característica devido a sua propagação (GENTIL, V 2007).



Figura 6-Pites em tubo de aço carbono (GENTIL, V 2007)

As cavidades apresentam um fundo anguloso e profundidade maior que o diâmetro da cavidade, o autor aconselha como forma de verificar a extensão da corrosão, verificar o número de cavidades por unidade de área, a profundidade e o diâmetro (GENTIL,V 2003).

A corrosão por tensão fraturante ocorre ao mesmo tempo que ocorre a aplicação de uma força de tração na estrutura, a corrosão gera trincas perpendiculares a direção da tensão de tração, a propagação da corrosão pode ser transgranular ou intragranular, na propagação transgranular a corrosão se propaga ao redor dos contornos de grãos da rede cristalina da estrutura (GENTIL, V 2003).



Figura 7-Barra de aço com corrosão sob tensão fraturante, Fonte: GENTIL, V 2003.

Já na corrosão intragranular a corrosão se propaga através dos grãos da rede cristalina da estrutura, esses dois tipos de corrosão fragilizam o material, e geram o risco de rompimento da estrutura quando submetida a esforços mecânicos (GENTIL,V 2003).

Este tipo de corrosão é muito perigoso, pois não há deformações significativas na estrutura, evitando desta forma a identificação do risco de rompimento brusco da estrutura. Expõe-se também que certos tipos de corrosão (pite, transgranular, intragranular), embora não cause perda significativa de massa da estrutura ela gera um risco muito grande de forma a reduzir a resistência da estrutura, pois as perfurações e as trincas geram pontos de concentração de tensões, o que favorece a diminuição da resistência da estrutura (GENTIL,V 2003).

2.3 Tipos de corrosão em uma barra de aço imersa em meio concreto

Os principais tipos de corrosão que acontecem em uma barra de aço em meio concreto são: corrosão uniforme ou generalizada, corrosão localizada (por pites, ou alveolar) e corrosão sob tensão fraturante (GENTIL, V 2003).

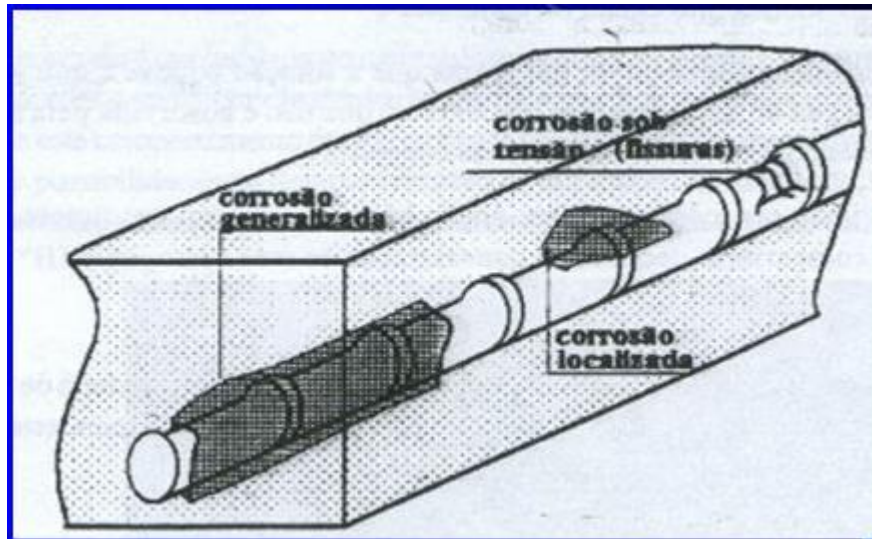


Figura 8 – Tipos de corrosão em barra de aço imersa em meio concreto (HORMIGONELABORADO.COM)

É importante destacar a corrosão no concreto, pois esta provoca não somente a deterioração, mas pode comprometer a estabilidade e durabilidade da estrutura, pode gerar trincas que com o passar do tempo podem se estender por toda a estrutura, podendo desta forma ocasionar o colapso da mesma(GENTIL, V 2003).

A armadura de aço não está suscetível a sofrer corrosão, a não ser que o concreto onde esta armadura estar imersa, sofra sua deterioração e venha desta forma deixa exposta a armadura ao meio. Permitindo assim a corrosão na armadura de aço, o que provoca a redução da área da seção transversal do aço, e com isso ocorre a falta de aderência entre a armadura e o concreto (GENTIL, V 2003).

2.4 Meios Corrosivos

Neste tópico será apresentado um dos principais meios corrosivos mais encontrados : atmosfera.

É importante destacar a natureza do meio corrosivo que se encontra na imediata proximidade da superfície metálica, para que possamos estar atentos não somente ao efeito corrosivo, mas também a sua causa.

2.4.1 Atmosfera

A ação corrosiva do meio atmosférico tem grande influência de alguns fatores, tais como: umidade relativa, substâncias poluentes, temperatura, tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica (GENTIL,V 2007).

A **corrosão atmosférica seca** ocorre em atmosferas sem umidade, neste tipo de corrosão ocorre uma lenta oxidação com formação do produto de oxidação.

A **corrosão atmosférica úmida** ocorre em atmosferas com umidade relativa menor que 100%, neste tipo de corrosão a velocidade da corrosão depende da umidade relativa, apresenta um fino filme de eletrólito na superfície metálica.

A **corrosão atmosférica molhada** ocorre em atmosferas onde a umidade relativa está próxima de 100%, e ocorre condensação na superfície metálica.

2.5 Umidade Relativa

A umidade relativa tem grande importância no processo corrosivo causado pela atmosfera, pois sabemos que o ferro em atmosferas onde a umidade relativa é baixa, quase não sofre o processo corrosivo por causa da atmosfera, por outro lado em atmosferas onde a umidade relativa é por volta de 60% o processo corrosivo é lento, mas existe, e em atmosferas acima de 70% o processo corrosivo ocorre com maior velocidade. A umidade relativa é expressa pela relação entre o teor de vapor d'água existente no ar e o teor máximo que pode existir no mesmo (GENTIL,V 2007).

2.6 Fratura

A fratura é um dos assuntos que deve observado, estudado e mapeado para evitar maiores danos ao sistema, a fratura simples é a separação de um material em duas ou mais partes, pela imposição de uma tensão, essas tensões podem ser de compressão, tração, cisalhamento ou torção. Quanto à classificação, as fraturas podem ser consideradas como dúctil e frágil o que é levado em consideração para classificar o tipo de fratura é a presença de deformação plástica acentuada ou o grau dessa deformação, seguido pela velocidade de propagação das trincas (CALLISTER JUNIOR, 2008).

A fratura frágil ocorre com propagação rápida da trinca, apresentando pouca ou nenhuma deformação plástica próxima as trincas, por outro lado a fratura dúctil apresenta propagação lenta das trincas, com presença acentuada de deformação plástica (CALLISTER JUNIOR, 2008). Ao atingir certas dimensões, as trincas são ditas instáveis, no processo de fratura frágil, pois mesmo que a tensão aplicada sobre o material não aumente as trincas irão se propagar através de toda a estrutura do material (CALLISTER JUNIOR, 2008). O vidro é um tipo de material que apresenta essa característica. A ductilidade de um material pode ser expressa em termos de alongamento percentual apresentado pelo material até a fratura ou da redução percentual de sua área (CALLISTER JUNIOR, 2008).

A fratura dúctil é quase sempre mais preferível que a fratura frágil, pois a fratura dúctil apresenta maior deformação plástica, desta forma é possível identificar previamente a fratura, necessitando também de mais energia para induzir sua propagação, já à fratura frágil não apresenta nem um sinal de alerta, pois a propagação da trinca acontece de maneira rápida, e também necessita de menos energia para induzir a propagação da trinca (CALLISTER JUNIOR, 2008).

O processo de fratura apresenta duas etapas principais – a formação da trinca e a propagação da trinca, esses dois processos são gerados pela imposição de uma tensão sobre o material (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Em processos de fratura dúctil, a trinca é dita como estável, por resistir a qualquer crescimento adicional sem o aumento da tensão aplicada (CALLISTER JUNIOR, 2008).

2.7 Oxidação, Redução, Íons

Os átomos estáveis possuem o número de elétrons igual ao número de prótons, quando o átomo perde ou ganha elétrons ele se torna um íon, se ele ganhar elétrons ele é um íon negativo, ou seja, um ânion, caso ele perda elétrons ele será íon positivo, ou seja, um cátion (GENTIL, V 2003).

O processo de oxidação é um processo de perda de elétrons, já o processo de redução é um processo de ganho de elétrons (GENTIL, V 2003).

2.8 Pilha Eletroquímica

Para o estudo da corrosão é de fundamental importância o conhecimento sobre pilhas eletroquímicas, pois através deste conhecimento podemos identificar os elementos envolvidos na corrosão e estabelecer medidas para “transpor” a corrosão de um material para o outro (GENTIL, V 2003).

- Anodo: é o material que vai perder elétrons
- Eletrólito: é o material que possui íons livres
- Catodo: é o material que sofre a redução pelos elétrons saídos do eletrólito
- Circuito Metálico: é a ligação metálica por onde passa os elétrons, ligados no anodo e catodo.

Pilha eletroquímica é um sistema que produz corrente contínua e baseia-se na tendência para ceder e receber elétrons das espécies químicas envolvidas (GENTIL, V 2003).

Quando mergulhamos uma lâmina de Zn, em uma solução contendo íons Cu^{2+} ocorre uma reação com transferência de elétrons, isto é, uma reação de oxido redução, os átomos de Zn presente na lâmina perdem elétrons, e se depositam no Cu na forma de Zn^{2+} enquanto que os átomos de Cu^{2+} perdem ganham elétrons se reduzem, e se depositam na lâmina de cobre (GENTIL, V 2003).

2.9 Corrosão No Concreto

A corrosão do concreto é um caso específico da corrosão eletroquímica em meio aquoso, no qual o eletrólito apresenta uma considerável resistividade elétrica (CASCUDO, 1997).

A inspeção visual, ou com o uso de filmadoras ou máquinas fotográficas é a técnica mais utilizada na avaliação do estado de corrosão das edificações. Este método visual, que geralmente se insere em etapas de uma avaliação preliminar, pode-se lançar mão de dispositivos como lupas, binóculos entre outros. Quando se observa o estado de corrosão pode-se constatar o surgimento de fissuras paralelas às armaduras; fragmentação e destacamento do cobrimento e no estado avançado de corrosão o lascamento do concreto. Logo, quando há indicações externas do processo corrosivo, normalmente parte da armadura já se encontra comprometida, pois, a manifestação é tão somente o afloramento deste (ROCHA, 2015). A verificação da profundidade de carbonatação é um dos testes mais usuais para constatar o fenômeno da corrosão do concreto por CO₂, carbonatação e os agentes principais são a permeabilidade e difusividade deste. No caso da carbonatação pode-se avaliar através do emprego de reagentes como a fenolftaleína, borrifando em perfis de concreto de recobrimento, Cascudo (1997), relata que este indicador é uma substância química que em contato com a solução alcalina do concreto, adquire colorações típicas a partir de um determinado pH da solução.



Figura 9-Teste de carbonatação no concreto armado com solução de fenolftaleína. (HORMIGONELABORADO.COM)

Os danos por corrosão afetam a estrutura, pois ocorre a redução da seção transversal da armadura, diminuindo desta forma a aderência entre a armadura e o concreto (HELENE, 2003,P. 45).

O concreto é um material muito poroso, com uma estrutura bastante heterogênea, suas características macro e microestruturas influenciam fortemente na durabilidade da estrutura (GENTIL, V, 2003).

O concreto apresenta uma alta alcalinidade, geralmente o pH do concreto varia entre 12,5 a 13,5 o que representa uma boa proteção corrosiva a armadura de aço (CASCUDO 1995, 2005).

O gráfico abaixo proposto por (EMMONS, 1993) demonstra a relação existente entre o pH e a corrosão do concreto em mm/ano.

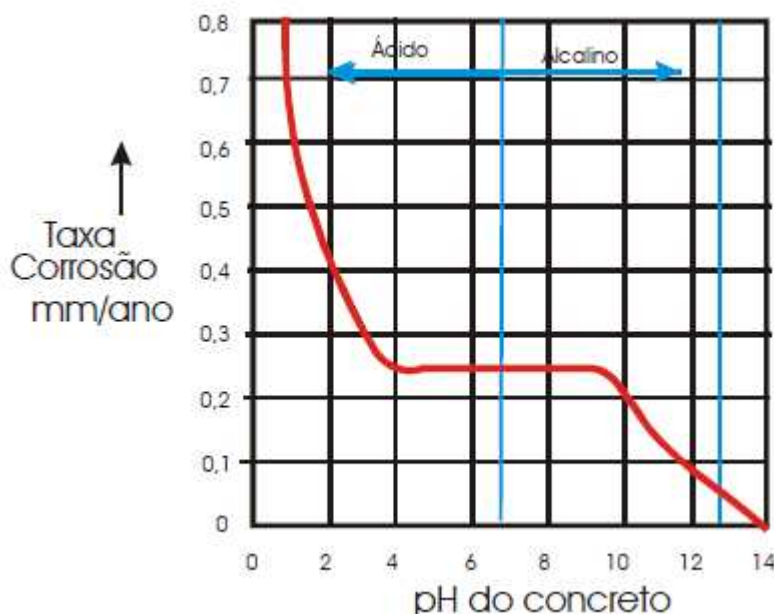


Figura 10-Relação entre o pH e a taxa de corrosão/ano

De acordo com o gráfico é fácil perceber que quanto maior for o pH do concreto, maior proteção a corrosão ele apresentará, ou seja, quanto maior for o seu teor alcalino maior sua proteção contra a corrosão, e quanto maior for o seu teor básico menor será sua proteção contra a corrosão (GENTIL, V, 2003).

É bom destacar a importância da baixa permeabilidade do concreto, a fim de reduzir a penetração de substâncias que podem favorecer a corrosão (SILVA 1995).

Existem basicamente dois tipos de degradação das armaduras de aço do concreto armado, que são a oxidação superficial da armadura e a corrosão da armadura de aço, a principal diferença entre elas está no grau de degradação da

armadura, na oxidação superficial da armadura ocorre apenas a formação de uma pequena camada de oxido sobre a armadura, ou seja, não há degradação significativa ao ponto de comprometer a estrutura de aço, já na corrosão da armadura de aço ocorre um processo químico que degrada significativamente o aço, gerando desta forma uma perda da seção transversal, comprometendo assim a estrutura de aço, e consequentemente o concreto a ela aderida (GENTIL, V, 2003).



Figura 11-Corrosão na armadura de aço do concreto

Neste processo eletroquímico que envolve um ânodo (um pedaço de metal que prontamente perde elétrons), um eletrólito (um líquido que auxilia os elétrons a se moverem) e um cátodo (um pedaço de metal que prontamente aceita elétrons). Quando um pedaço de metal corrói, é o eletrólito que ajuda a fornecer oxigênio ao ânodo (GENTIL, V 2003).

Como o oxigênio se combina com o metal, os elétrons são liberados, quando os elétrons fluem pelo eletrólito até o cátodo, o metal do ânodo desaparece levado pelo fluxo de elétrons ou convertido em cátions de metal (GENTIL, V 2003).

De maneira geral a corrosão na armadura do concreto ocorre quando a armadura entra em contato com o oxigênio mais umidade, o concreto atua na estrutura como um protetor para a armadura de aço, uma das características apresentada pelo concreto é a sua “impermeabilidade”, ou seja, o concreto evita que o oxigênio entre em contato com a armadura de aço, protegendo desta forma do

meio, outra característica do concreto é a sua alta alcalinidade, seu pH varia entre 12,5 á 13,5, o alto valor do seu pH dificulta as reações de oxidação (GENTIL, 2003).

Basicamente o concreto apresenta essas duas características que o tornam um grande protetor para a armadura de aço. Para que o concreto ofereça essa proteção a armadura de aço, é necessário que ele apresente algumas características de construção, uma delas é o cobrimento mínimo medido em mm de acordo com a norma NBR6118, de acordo com a norma é estipulado valores nominais para o cobrimento da armadura de aço de acordo com a agressividade do ambiente em que ela se encontra, essa espessura mínima é necessário pois garante a impermeabilidade do oxigênio junto da umidade.

Tipo de Estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto Protendido	Todos	30	35	45	55

Figura 12-Tabela de cobrimento da armadura de aço. Fonte: NBR6118

Outro fator atrelado ao cobrimento da armadura de aço é a questão da relação de água/cimento, deve se evitar utilizar concreto com altas relações desses dois componentes, pois concretos muito aguados se tornam muito porosos facilitando a penetração de oxigênio e impurezas e conseqüentemente a ocorrência da corrosão da armadura de aço (FIGUEIREDO, 2005).

A corrosão da armadura de aço se inicia com uma pequena fissura na estrutura de concreto, que favorece a entrada de oxigênio e de umidade até a ferragem, quando se tem a corrosão da armadura de aço esta libera o ferrugem que faz parte de uma reação química expansiva, ou seja, o seu volume aumenta e ocorre o desprendimento do cobrimento de reboco, deixando desta forma a armadura de aço totalmente exposta, a partir do agravamento desta situação a armadura de aço perde seção e a estrutura de concreto armado como um todo fica fragilizada (FIGUEIREDO, 2005).

Ambientes a beira mar, com um índice de poluição muito alto, ou com presença de esgoto favorecem quimicamente o processo de corrosão.

Segundo Gentil (2003), o processo de carbonatação ocorre preponderantemente ao longo das paredes das fissuras. Pelo fato do concreto ser um material poroso, o CO₂ presente no ar penetra, com certa facilidade, através dos poros do concreto até o seu interior. Segundo Cunha, Manoel (2014), acontece a reação do CO₂ com o hidróxido de cálcio, ocasionando a carbonatação. Na Figura 2, tem-se a representação esquemática do mecanismo de carbonatação proposto por (BAKKER, 1988).

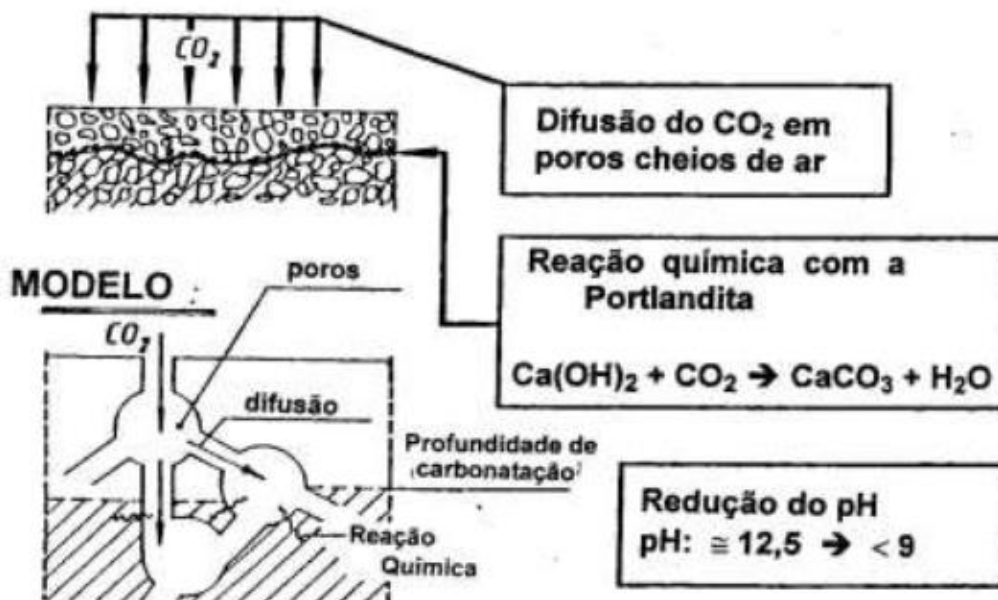


Figura 13-Representação esquemática da penetração de CO₂ por difusão e do processo de carbonatação. Fonte: Figueiredo, 2005, p.831

A consequente precipitação de carbonato de cálcio nos poros promove também, a princípio, uma redução da permeabilidade da pasta pelo fechamento parcial dos seus poros. Contudo, isso é insuficiente para evitar o avanço da reação em movimento ao interior do concreto (FIGUEIREDO, 2005).

2.11 Prevenção

Uma forma de não necessariamente corrigir, mas sim de prevenir a corrosão, é a galvanização, o processo de galvanização é feito através do

cobrimento do aço por zinco, por meio de uma reação metalúrgica entre o zinco e o aço, uma camada especial é formada impedindo o contato do aço com o ambiente, desta forma protegido o aço não sofre corrosão (GENTIL, V 2003).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Pesquisa Para Geração De Tecnologia Adequada

Este trabalho gera uma pesquisa com vistas ao desenvolvimento de uma tecnologia apropriada e economicamente viável de modo a estabelecer um método de controle e proteção anticorrosivo e oferecer um material de estudo voltado para a corrosão em estruturas de concreto. As pesquisas desenvolvidas neste sentido foram desenvolvidas com caráter científico, norteado pelos princípios modernos de Engenharia dos Materiais, Métodos de Proteção Anticorrosivos.



Figura 14- Fluxo de desenvolvimento da pesquisa

3.1.1 Inspeções Visuais

Durante a realização deste trabalho foram realizadas pesquisas in loco para verificar as reais condições operacionais da estrutura de concreto armado, destacando o grau de corrosão apresentado na estrutura.



Figura 15-Pontos de corrosão na estrutura de concreto armado da barragem do rio Bacanga -Foto: O autor

Verificou-se que em alguns pontos, onde se apresenta a corrosão na estrutura, figura 14, foi realizado o recobrimento da armadura de aço com reboco.



Figura 16-Desprendimento do reboco na estrutura de concreto armado da barragem do rio Bacanga -Foto: O autor

3.1.2 Ensaio de pH

Foi realizado o ensaio de pH da água presente no ambiente de serviço, para verificar o nível de acidez, alcalinidade, ou neutralidade presente, o ensaio foi

realizado no laboratório de química da Universidade Estadual do Maranhão , o material utilizado foi a fita colorimétrica.



Figura 17-Equipamento utilizado no ensaio do potencial Hidrogeniônico

O ensaio foi realizado inserido a fita colorimétrica dentro dos recipientes contendo as amostras de água coletadas no ambiente de serviço da estrutura de concreto armado, e em seguida foi observado a coloração apresentada e feito a comparação com a escala de cores.

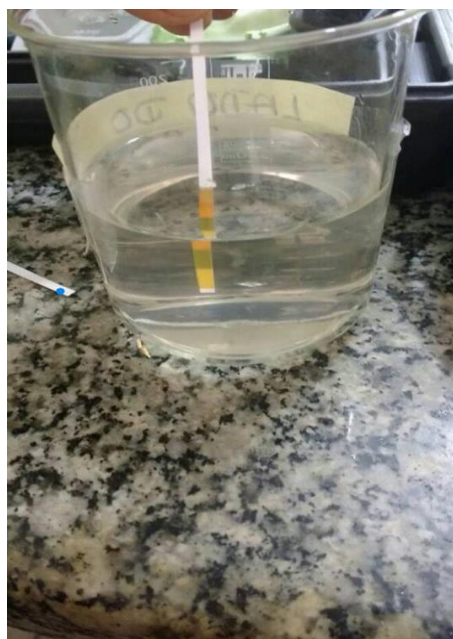


Figura 18-Realização do ensaio



Figura 19-Resultado para duas amostras

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados

Durante as inspeções visuais foi possível verificar a existência de alguns pontos de corrosão presente na estrutura de concreto armado, e deixando visível a armadura de aço presente nesses pontos.

O pH indicado no ensaio, gerou um valor de 6 a 7, o que represente de acordo com a literatura consultada, um valor neutro.

4.2 Discussões

Através desta inspeção in loco, foi possível avaliar o grau de corrosão apresentado na estrutura, a corrosão não está apresentando um grau acentuado, porém já existe a presença de corrosão em alguns pontos da estrutura, sendo

necessário a aplicação de um método anticorrosivo para evitar a propagação da corrosão e a propagação de trincas, evitando desta forma também o risco de um futuro colapso da estrutura.

De acordo a literatura consultada o recobrimento da armadura de aço com reboco citado anteriormente neste trabalho foi uma medida de controle paliativa, pois a reação química da corrosão é uma reação expansiva, ou seja, ocorre o aumento do volume da armadura de aço naquele local, que com o passar do tempo desprende todo o reboco aplicado, e deixa a armadura novamente exposta ao meio, permitindo desta forma a continuidade da corrosão na armadura.

4.3 Método De Proteção Anticorrosiva Proposto Para A Estrutura De Concreto Armado.

Com base na literatura propõe-se um método anticorrosivo para a estrutura de concreto armado, a aplicação de revestimentos epóxi, esses revestimentos funcionam como barreira física.



Figura 20-Sistema de proteção e reparo da corrosão das armaduras nas estruturas de concreto, Fonte: GONÇALVES, 2003, p.341

Segundo Manuel Cunha, (2013), resina epóxi é um dos mais importantes veículos para o combate à corrosão. Ela possui boas propriedades de aderência e resistência química, alta resistência à abrasão e ao impacto. Este revestimento pode aumentar substancialmente a vida útil da armadura de aço, sendo o revestimento de epóxi uma das técnicas econômicas mais empregadas. A resina é aplicada na armadura por meio da pintura por spray. O epóxi ao entrar em contato com a

ferragem provoca a união de cada partícula da resina entre si e à superfície da armadura (Manuel Cunha, 2013).

A camada de epóxi atua como uma barreira física entre a superfície da armadura e os agentes corrosivos presentes no concreto, tais como o cloreto e o oxigênio, paralelamente a este comportamento pode-se afirmar que o epóxi apresenta outras características importantes como uma elevada resistência elétrica, impedindo que o fluxo de elétrons possa contribuir para a corrosão eletroquímica (Manuel Cunha, 2013).

O revestimento epóxi pode também ser aplicado diretamente sobre o concreto armado para impermeabilizar a sua estrutura, impedindo a penetração de CO₂ e impurezas na estrutura, evitando desta forma a carbonatação, e consequentemente garantindo a proteção oferecida do concreto à armadura de aço.

5. CONCLUSÃO

Através deste trabalho foi possível disponibilizar um material contendo uma revisão bibliográfica sobre os aspectos da corrosão em estruturas de concreto armado, apresentando as condições operacionais da barragem do rio Bacanga, no que se refere a corrosão, propondo também um método anticorrosivo para evitar a propagação da corrosão que ainda se apresenta em estado inicial, porém necessitando de um controle, para evitar um futuro possível colapso da estrutura, de acordo com os autores consultados durante a revisão bibliográfica deste trabalho, uma das principais causas da corrosão em estruturas de concreto armado é o CO₂, que causa a carbonatação reduzindo desta forma o pH da estrutura e favorecendo a despassivação da armadura de aço.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Estruturas de Concreto** – NBR 6118 – ABNT – 2003.

BAKKER, R.F.M. Initiation period. In: Schiessl of air-cured and water-cured PC-PFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation dep. **Cement and Concrete Research**, v.32, 2002.

CALLISTER JR, W. D. Fundamentos da Ciência e engenharia dos materiais . Rio de Janeiro, LTC, 2006.

CASCUDO, O. **O Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, 1997 .

CRAMER, S.D.; COVINO JR, B. S. (Ed.). **Handbook Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection**. ASM: USA, 2005, v. 13A.

EMMONS, Peter H. **Concrete Repair and Maintenance**. Kingston: R. S. Means Company, 1993. 295 p.

GENTIL, V. **Corrosão. 5ª Ed. Revisada**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, 2007.

GONÇALVES, A.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. **Procedimientos de reparación y protección de armaduras**, Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. São Paulo: Editores Paulo Helene e Ferreira Pereira, 2003.p. 341-376

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.

MONTEIRO, E.; PIMENTEL, H.; BENÍCIO, A.; HELENE, P. **Estudo da influência do tipo de cimento em relação à frente de penetração dos íons cloretos**. In.: V Congresso iberoamericano de patologia de las construcciones. Montevideu. Anais, 1999. p.297-304.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. Trabalho de monografia. Belo Horizonte, UFMG, 2006.

ROCHA, I. **Corrosão em estruturas de concreto armado**. Goiânia, p-13, 2015.

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

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