

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**THIAGO BARROS COSTA**

**CORROSÃO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: DIAGNÓSTICO E  
TRATAMENTO**

São Luís  
2016

**THIAGO BARROS COSTA**

**CORROSÃO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: DIAGNÓSTICO E  
TRATAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Francismar Rodrigues de Sousa

São Luís  
2016

Costa, Thiago Barros.

Corrosão nas estruturas de concreto armado: diagnóstico e tratamento / Thiago Barros Costa. – São Luís, 2016.

57 f.

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

Orientador: Prof. Me. Francismar Rodrigues de Sousa.

1. Corrosão. 2. Patologias. 3. Concreto armado. I. Título.

CDU 620.193:624.012.45

**THIAGO BARROS COSTA**

**CORROSÃO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: DIAGNÓSTICO E TRATAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 13/12/16

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. MSc. Francismar Rodrigues de Sousa  
Universidade Estadual do Maranhão

---

Prof. MSc. Wellington de Assunção  
Universidade Estadual do Maranhão

---

Prof. Carlos Ronyhelton Santana de Oliveira  
Universidade Estadual do Maranhão

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Corrosão uniforme em chapas de aço.

Figura 2 – Corrosão por pite em superfície de metal.

Figura 3 – Corrosão galvânica em tubo de aço carbono em contato com válvula de latão.

Figura 4 – Representação diagramática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto.

Figura 5 – Degradação de ponte provocada pela contaminação de cloretos em Kingston, Ontario.

Figura 6 – Ilustração do processo eletroquímico de corrosão do aço no concreto úmido e permeável.

Figura 7 – Volume relativo dos produtos de corrosão em relação ao aço das armaduras.

Figura 8 – Eflorescência em estrutura de concreto.

Figura 9 – Anodo de Magnésio.

Figura 10 – Vista de estrutura de concreto armada recebendo anodos para proteção catódica por corrente impressa.

Figura 11 – Processo de realcalinização através de aplicação de um campo elétrico.

Figura 12 – Corrosão no píer velho com armadura exposta.

Figura 13 – Fissuras em viga longitudinal do píer velho

Figura 14 – Fissuras no píer novo com perda de material no canto direito

Figura 15 – Elementos do sistema de proteção catódica por corrente impressa utilizando anodos em forma de rede.

Figura 16 – Píer do Tambaú em João Pessoa.

Figura 17 – Deformação da estrutura remanescente do píer do Tambaú.

Figura 18 – Destacamento de massa de concreto em viga longitudinal paralela à armadura de aço.

Figura 19 – Perda de seção transversal nas armaduras de aço.

Figura 20 – Presença de águas Pluviais no tabuleiro danificado da ponte José Sarney.

Figura 21 – Perda de material na cabeceira da ponte José Sarney.

Figura 22 – fissuração e destacamento.

Figura 23 – Corrosão de armadura exposta ao ar.

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Composição do cimento Portland usado no Brasil

Quadro 2 – Potenciais de oxidação para o eletrodo padrão de Hidrogênio.

Quadro 3 – Tabela prática em água do mar para varia ligas em ordem maior para menor tendência a sofrer corrosão.

Quadro 4 – Fatores do meio ambiente que influenciam a carbonatação.

Quadro 5 – Classe de agressividade ambiental da NBR6118.

Quadro 6 – Resumo das patologias, mecanismos e intervenções do estudo de caso da ponte José Sarney.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais por todo o incentivo e dedicação e principalmente por terem acreditado em mim.

Ao meu orientador por toda a atenção dispensada a mim ao longo dos últimos meses até que este trabalho estivesse concluído.

Para não cometer nenhum tipo de esquecimento involuntário, gostaria de agradecer a todos os meus amigos e professores da UEMA que contribuíram de forma direta ou indiretamente para meu crescimento pessoal nessa que é uma das etapas mais importantes da vida de qualquer pessoa.

## RESUMO

O presente trabalho faz uma revisão bibliográfica dos processos corrosivos que ocorrem no concreto armado fazendo um levantamento de experiências de diversos autores e pesquisadores na área de corrosão para mapear da forma mais exata possível as patologias que afetam estruturas de concreto armado em regiões litorâneas e a melhor forma de intervenção para prevenir ou reduzir a degradação dos materiais que constituem estas estruturas. É feita uma enumeração de diversas patologias provocadas pela degradação do concreto e suas sintomatologias. Essas informações são essenciais para a discussão e escolha de quais serão os melhores métodos de intervenção. Em seguida são apresentados diversos sistemas de intervenção que visam, de acordo com a situação, a intervenção na massa de cimento ou na armadura, incluindo técnicas eletroquímicas usadas mais recentemente para recuperar o pH do concreto. Por fim são expostos casos reais de estruturas que sofrem com a corrosão provocada pela contaminação por íons cloretos e pela carbonatação e métodos de intervenção para cada caso, entre os casos citados está a ponte José Sarney, importante ponte da região metropolitana de São Luís-MA.

**Palavras-chave:** Corrosão. Patologias. Concreto armado.

## ABSTRACT

This paper aims to make a literature review of the corrosive processes in the concrete making a survey of the experiences of several authors and researchers in the corrosion area to map as accurately as possible the conditions that affect concrete structures in coastal regions and the best form of intervention to prevent or reduce degradation of the materials comprising these structures. It is made an enumeration of various diseases caused by the degradation of concrete and its symptomatology. This information is essential for discussion and choice of what will be the best intervention methods. Next are presented the different intervention systems aimed at, according to the situation, the intervention in the mass of concrete or equipment, including electrochemical techniques most recently used to retrieve the pH of the concrete. Finally are exposed real cases of structures suffering from corrosion caused by contamination by chloride ions and the carbonation and methods for each case among the cases cited is the bridge José Sarney, important bridge the metropolitan area of Sao Luis, MA.

**Key words:** Corrosion. Pathologies. Reinforced concrete.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
2.1 Objetivos Gerais.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
<b>3. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>13</b>
<b>4. CORROSÃO.....</b>	<b>14</b>
4.1 Definição.....	14
4.2 Classificação .....	15
4.3 Mecanismos.....	17
4.3.1 Oxirredução.....	18
4.3.1.1 Potencial do eletrodo padrão.....	18
4.3.2 Pilhas eletroquímicas.....	20
4.3.3 Tipos de pilhas.....	21
4.3.3.1 Pilhas de eletrodos metálicos diferentes.....	21
4.3.3.2 Pilhas de concentração.....	22
<b>5. CORROSÃO NAS ARMADURAS DE CONCRETO.....</b>	<b>23</b>
5.1 Microestrutura do concreto.....	23
5.2 Camada de passivação.....	25
5.3 Mecanismo de deterioração.....	25
5.3.1 Carbonatação como mecanismo de deterioração.....	28
5.3.2 Contaminação por cloretos.....	29
5.3.2.1 Limite para despassivar as armaduras e detecção.....	31
5.3.3 Lixiviação-Eflorescência.....	31
5.3.4 Ácidos.....	32
5.3.5 Bases-(Reações Álcali-agregado).....	33
<b>6. MÉTODOS DE PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO.....</b>	<b>34</b>
6.1 Sistemas de reparo.....	34
6.1.1 Sistemas de reparo que atuam sobre a armadura.....	35
6.1.1.1 Proteção catódica.....	35
6.1.1.1.1 Proteção catódica por anodos galvânicos.....	35
6.1.1.1.2 Proteção catódica por corrente impressa.....	37
6.1.1.2 Proteção por barreira.....	38
6.1.2 Sistemas de reparo que atuam sobre o concreto.....	39
6.1.2.1 Reparo por repassivação.....	39
6.1.2.2 Reparo por adição de polímero.....	39
6.1.2.3 Reparo por inibição.....	40
6.1.2.4 Proteção por barreira.....	41
6.1.3 Sistema de reparo que utilizam métodos eletroquímicos.....	41
6.1.3.1 Realcalinização.....	41
6.1.3.2 Dessalinização.....	42
<b>7. CASOS REAIS DE CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO.....</b>	<b>43</b>
7.1 Corrosão no píer velho e no píer novo.....	43

7.2 Píer de atracação do Tambaú.....	47
<b>8. PROCESSO CORROSIVO NA PONTE JOSÉ SARNEY EM SÃO LUÍS/MA....</b>	<b>50</b>
<b>9. CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto são projetadas e executadas para manter condições mínimas de segurança, estabilidade e funcionalidade durante um tempo de vida útil, sem custos não previstos de manutenção e de reparos (OLIVEIRA, 2015).

O concreto é constituído principalmente de cimento, areia e agregados de diferentes tamanhos. As matérias primas usadas na fabricação do cimento Portland são, principalmente, calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Essas substâncias reagem entre si, quando aquecidas, formando os principais componentes do cimento.

Os cimentos usuais no Brasil apresentam os valores médio constantes quadro 1.

**Quadro 1: Composição do cimento Portland usado no Brasil**

Composto	%
CaO	61 a 67
SiO <sub>2</sub>	20 a 23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5 a 7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 a 3,5
SO <sub>3</sub> (CaSO <sub>4</sub> )	1 a 2,3
MgO	0,8 a 6
Na <sub>2</sub> O-K <sub>2</sub> O	0,3 a 1,5
C <sub>3</sub> S	42 a 60
C <sub>2</sub> S	14 a 35
C <sub>3</sub> A	6 a 13
C <sub>4</sub> AF	5 a 10

Fonte: Gentil 2011

A corrosão do concreto é de grande importância, pois provoca não somente a sua deterioração, mas também pode afetar a estabilidade das estruturas. A armadura não é suscetível de sofrer corrosão, a não ser que ocorram contaminação e deterioração do concreto. Os constituintes do concreto inibem a corrosão do material metálico e se opõem à entrada de contaminantes. Daí, se pode afirmar que quanto mais se mantiver inalterado, mais protegida estará a armadura. Todavia, ocorrem alguns casos onde a corrosão é bastante rápida e progressiva (OLIVEIRA, 2015).

A degradação do concreto é uma combinação de alterações nas propriedades mecânicas, físicas e químicas que ocorrem tanto na superfície quanto no interior do concreto. A corrosão do concreto está entre as patologias mais frequentes e consiste na deterioração da fase metálica, que resulta na constante perda de seção transversal, nesse processo formam-se como resultado da corrosão diversos produtos que se expandem fendilhando o concreto. Para se obter sucesso nas medidas terapêuticas de prevenção e recuperação é necessário que o diagnóstico tenha sido bem feito e que se conheça bem as vantagens e desvantagens de cada

material, e para cada caso particular a melhor alternativa de solução. A terapia a ser aplicada, nada mais é do que a consequência do processo investigativo (FERREIRA, 2000).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar e analisar as influências da corrosão no colapso e deterioração das estruturas de concreto armado através da diagnose das mudanças sofridas pelo material em contato direto com o ambiente de serviço, que com o passar do tempo, sem a devida proteção pode acarretar danos maiores aos usuários e ao meio ambiente.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analisar as principais causas de deterioração das estruturas de concreto e agrupá-los em conformidade com a sua natureza
- Agrupar e determinar as técnicas de recuperação existentes na literatura;
- Analisar casos reais de estruturas de concreto armado degradadas que estão disponíveis na literatura especializada.

## **3. JUSTIFICATIVA**

Os custos diretos, no caso de reposição do material que sofreu corrosão, são de grande importância para qualquer segmento da sociedade, desde a dona de casa, preocupadas com os seus objetos, até o pessoal técnico de uma empresa, pesquisando materiais mais resistentes para estruturas e equipamentos (GENTIL, 2011).

A corrosão de armaduras é a principal manifestação patológica em estruturas de concreto, deste o final do século XX (HELENE, 1993). O grande custo provocado pela degradação acaba por nos impelir à busca de técnicas que cessem os efeitos dos processos corrosivos nas obras de arte da engenharia.

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 (CALLISTER Jr 2002). Apesar de o concreto ser o material de construção mais consumido no planeta, o conhecimento e divulgação das práticas construtivas adequadas não acompanharam o

crescimento da atividade de construção, ocasionando seguidos descuidos nas obras, e reduzindo a capacidade do concreto em proteger as armaduras contra a corrosão. Com o tempo, a tecnologia de fabricação do concreto foi avançando, com a melhoria das propriedades dos aditivos, adições e ligantes, possibilitando uma redução significativa nas seções das peças de concreto armado em função do aumento das resistências mecânicas (FERREIRA, 2000).

No Brasil, a maioria das estruturas foi, e ainda é executada com o concreto armado. Tal situação justifica o fato do concreto armado ser o material que será abordado neste trabalho e as suas patologias.

#### **4. CORROSÃO**

O presente estudo acerca da corrosão nas estruturas de concreto armado inicia-se pela definição de corrosão dada por diversos autores da bibliografia especializada encontrada nacionalmente.

##### 4.1 Definição

Para (CALLISTER, 2011) corrosão é a perda resultante da deterioração do material decorrentes de reações de dissolução no seu ambiente.

Para (HELENE, 1993), corrosão é o resultado de reações químicas ou eletroquímicas resultantes da interação com o ambiente que provocam a destruição do material.

Para (ATKINS, 2006) a corrosão é a oxidação indesejada de um metal. Ela diminui a vida útil de produtos de aço como pontes e automóveis.

Por fim (GENTIL, 2011) define a corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos.

Uma importante consideração que não pode deixar de ser feita refere-se ao aspecto energético. Sabe-se que a obtenção de um metal se faz à custa de certa quantidade de energia fornecida por meio de processos metalúrgicos, como pode-se ver na clássica expressão:



Como resultado do processo acima sabe-se que o metal se encontra em um nível energético superior ao do composto que lhe deu origem. Essa é a razão termodinâmica por trás da espontaneidade das reações de corrosão. O produto de corrosão é bem semelhante ao minério do qual é originalmente extraído. O óxido de ferro mais comumente encontrado na natureza é a hematita,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e a ferrugem é o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hidratado, isto é,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  que é o metal tendendo a retornar a sua condição de estabilidade (GENTIL, 2011).

Além da energia requerida para a transformação que conduz ao metal, uma considerável energia é perdida, tanto por irradiação quanto por convecção.

Para manter os metais protegidos contra a corrosão há necessidade de uma parcela adicional de energia, a qual pode ser aplicada de diversas formas, dependendo logicamente das condições de emprego do metal. Essa energia adicional pode ser representada por revestimentos protetores, inibidores de corrosão, proteção catódica ou proteção anódica.

Diante desse panorama, e considerando que a energia é uma entidade cada vez mais difícil nos tempos modernos, são de suma importância a prevenção e o combate à corrosão como forma de poupar energia.

#### 4.2 Classificação

A corrosão pode ser classificada segundo a natureza do processo e segundo sua morfologia. Segundo a natureza do processo, classificamos a corrosão em química e eletroquímica

A primeira é chamada corrosão seca ou oxidação e ocorre por uma reação gás-metal e forma uma película de óxido. Também é consenso entre os autores consultados que esse processo é extremamente lento e não provocam deterioração substancial das superfícies metálicas, exceto se existirem gases extremamente agressivos na atmosfera.

Já a corrosão eletroquímica ou em meio aquoso é resultado da formação de uma célula de corrosão, com eletrólito e diferença de potencial entre pontos da superfície. Se qualquer um destes elementos for retirado, ou se impedirmos a entrada de oxigênio o processo é paralisado. O eletrólito é representado pela umidade presente no interior do concreto. É uma solução carregada ionicamente que permite ocorrerem às reações e possibilita o fluxo iônico. A diferença de potencial entre dois pontos da superfície pode ocorrer por diversos fatores: por diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão no concreto e no aço, falta de uniformidade na composição do aço (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

Segundo a morfologia, a corrosão pode ter várias classificações, entretanto para o nosso estudo, focado na corrosão de estruturas de concreto, vamos nos concentrar em três tipos: Corrosão uniforme, corrosão por pite e corrosão sob tensão fraturante.

**Corrosão uniforme:** O ataque uniforme (Figura 1) é uma forma de corrosão eletroquímica que ocorre com intensidade equivalente ao longo da totalidade de uma superfície exposta, frequentemente deixando para trás uma incrustação ou um depósito (CALLISTER, 2011).

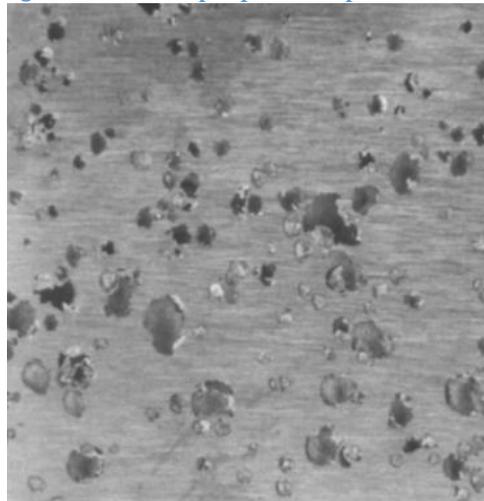
Figura 1: Corrosão uniforme em chapa de aço



Fonte: Gentil 2011.

**Corrosão puntiforme ou por pite:** A clássica corrosão por pite (Figura 2) provocada pelo colapso do filme passivo só irá ocorrer na presença de espécies aniônicas agressivas e íons cloretos que são geralmente, embora nem sempre, a causa. A corrosão ocorre de forma localizada com a dissolução do metal. O aspecto local da corrosão nesses pequenos pontos é o pH que decresce (ASM HANDBOOK, 2003).

Figura 2: Corrosão por pite em superfície de metal



fonte: ASM Handbook, 2003.

Segundo (CALLISTER Jr, 2011), supõe-se que a gravidade faça com que os pites cresçam para baixo, com a solução na extremidade do pite se tornando cada vez mais concentrada e densa conforme o crescimento do pite progride. Um pite pode ser iniciado por um defeito superficial localizado, tal como um arranhão ou uma pequena variação na composição.

**Corrosão sob tensão:** Resulta da aplicação de uma tensão de tração e de um ambiente corrosivo; ambas as influências são necessária. Pequenas trincas se formam então se propagam em uma direção perpendicular à da tensão (CALLISTER Jr, 2011).

A corrosão sob tensão frequentemente se inicia sob defeitos pré-existente ou características da superfície induzida por corrosão. Esses defeitos pré-existente podem incluir ranhuras, voltas, ou rebarbas resultantes de processos de fabricação (ASM HANDBOOK, 2003).

A corrosão por pite é uma das formas de corrosão mais prejudiciais aos materiais metálicos, pois apesar de atingir uma pequena área de material metálico causa grande perda de espessura diminuindo a resistência mecânica do material (GENTIL 2011).

Os fatores que favorecem o surgimento de ataque localizado são: a relação entre a área catódica e anódica, a aeração diferencial, a variação de pH e produtos de corrosão presentes na superfície metálica. Entretanto, heterogeneidades do metal ou do meio também podem ocasionar ataques localizados. No material pode ser oriundo de composição, impurezas, tratamento térmico ou mecânico, depósitos, galvânica, descontinuidade de películas protetoras. No meio podem ser oriundo de composição química, diferenças de concentração, temperatura, pH (FERREIRA, 2000).

#### 4.3 Mecanismos

Como a corrosão tem sua base científica bem definida, deve-se inicialmente procurar estabelecer os mecanismos dos processos corrosivos, a fim de indicar os métodos adequados de proteção ou mesmo modificações de projeto. Como no estudo da corrosão são desenvolvidos conhecimentos de eletroquímica, serão apresentadas algumas considerações básicas sobre oxidação-redução, potencial de eletrodo e pilhas, que são assuntos fundamentais para melhor compreensão dos processos eletroquímicos.

#### 4.3.1 Oxirredução

A oxidação é a remoção de elétrons de átomos ou grupos de átomos, resultando num aumento da valência, e a redução é a adição de elétrons para átomos ou grupos de átomos, resultando numa diminuição da valência (ASM HANDBOOK, 2003).

Quando os metais reagem há a tendência a perder elétrons, sofrendo corrosão. É, portanto, de grande ajuda para o estudo ou previsão de alguns processos corrosivos dispor os metais em uma tabela que indique a cessão preferencial de elétrons. Esta tabela é conhecida como tabela de potenciais de eletrodo.

Um metal quando imerso em solução eletrolítica estabelece uma diferença de potencial entre a fase sólida e a fase líquida. Essa diferença de potencial pode ser negativa, positiva ou nula dependendo da natureza do metal e das espécies químicas presentes no eletrólito, além da concentração, da pressão e temperatura. Contudo, quando fixamos as variáveis relacionadas ao eletrólito o valor do potencial será função apenas do metal (FERREIRA, 2000).

##### 4.3.1.1 Potencial do eletrodo padrão

O potencial de um eletrodo pode ser determinada apenas pela medição da tensão em uma célula electroquímica entre este eletrodo e um eletrodo de potencial constante, o chamado eletrodo padrão. O eletrodo de referência escolhido arbitrariamente para estabelecer uma escala potencial universal é o padrão de hidrogênio (Quadro 2) (ASM HANDBOOK, 2003).

O quadro de potenciais nos dá a possibilidade de uma reação processar-se mas não diz nada quanto à velocidade da reação, isto é, quanto a cinética da reação. Algumas reações possíveis pelos valores de potenciais não se realizam na prática, aparentemente pelo fato dessas reações se processarem de forma tão lenta que não é observado em um pequeno espaço de tempo (GENTIL, 20011).

As limitações do quadro de potenciais padrão é o fato de as ligas não serem incluídas no quadro 2. É sugerido então o uso de tabelas prática, nas quais os metais e ligas estão distribuídos de acordo com os potenciais, medidos em um dado meio corrosivo. (GENTIL, 2011)

Uma tabela prática bastante usada é a tabela de corrosão em água do mar (Quadro 3) onde as ligas são dispostas segundo uma maior ou menor tendência de sofrer corrosão.

**Quadro 2: Potenciais de oxidação para o eletrodo padrão de hidrogênio**

Metal	Reação no eletrodo	Potencial (volt)
Lítio	$\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + e$	+3,05
Potássio	$\text{K} \rightarrow \text{K}^+ + e$	+2,93
Cálcio	$\text{Ca} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2e$	+2,87
Sódio	$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + e$	+2,71
Magnésio	$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2e$	+2,37
Berílio	$\text{Be} \rightarrow \text{Be}^{2+} + 2e$	+1,85
Urânio	$\text{U} \rightarrow \text{U}^{3+} + 3e$	+1,80
Alumínio	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3e$	+1,66
Titânio	$\text{Ti} \rightarrow \text{Ti}^{3+} + 3e$	+1,63
Zircônio	$\text{Zr} \rightarrow \text{Zr}^{4+} + 4e$	+1,53
Manganês	$\text{Mn} \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2e$	+1,18
Zinco	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e$	+0,763
Cromo	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3e$	+0,74
Ferro	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e$	+0,440
Cádmio	$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2e$	+0,403
Cobalto	$\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2e$	+0,277
Níquel	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2e$	+0,250
Molibdênio	$\text{Mo} \rightarrow \text{Mo}^{3+} + 3e$	+0,2
Estanho	$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2e$	+0,136
Chumbo	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2e$	+0,126
Hidrogênio	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e$	0,00
Cobre	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e$	-0,337
Mercúrio	$2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2e$	-0,789
Prata	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + e$	-0,800
Platina	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2e$	-1,2
Ouro	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3e$	-1,5

fonte: Gentil 2011

**Quadro 3: Quadro prático em água do mar para varia ligas em ordem maior para menor tendência a sofrer corrosão**

Tabela prática em água do mar.	
1. Magnésio	16. Latão Almirantado
2. Ligas de magnésio	17. Cobre
3. zinco	18. Cupro-Níquel 90/10
4. Alclad 38	19. Cupro-Níquel 70/30
5. Alumínio 3S	20. Inconel (passivo)
6. Alumínio 52	21. Monel
7. Aço doce	22. Hastelloy C
8. Aço baixo teor de liga	23. Aço AISI 410 (passivo)
9. Aço liga	24. Aço AISI 430 (passivo)
10. Aço AISI 410	25. Aço AISI 304 (passivo)
11. Aço AISI 316	26. Aço AISI 316 (passivo)
12. Chumbo	27. Titânio
13. Níquel	28. Prata
14. Metal Muntz	29. Ouro
15. Latão amarelo	30. Platina

Fonte: adaptado de Gentil, 2011.

#### 4.3.2 Pilhas eletroquímicas

A corrosão é um processo eletroquímico que ocorre na interface entre um material (geralmente, mas não exclusivamente, um metal) e uma solução aquosa. Para que a corrosão ocorra, uma reação de oxidação (geralmente, dissolução do metal e ou óxido de metal) e uma reação de redução (normalmente água, ou redução de oxigênio dissolvido) deve ocorrer simultaneamente. Assim, a corrosão é o acoplamento em conjunto de duas reações eletroquímicas na mesma superfície. (ASM HANDBOOK, 2003).

No estudo da corrosão as pilhas eletroquímicas são de grande importância. Uma pilha eletroquímica apresenta os seguintes componentes básicos:

- a) Anodo: eletrodo em que há oxidação e onde a corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito;
- b) Eletrólito: condutor (usualmente um líquido) contendo íons que transportam a corrente elétrica do anodo para o catodo;
- c) Catodo: eletrodo onde a corrente elétrica sai do eletrólito ou do eletrodo no qual as cargas negativas provocam reação de redução;

- d) Circuito metálico: ligação metálica entre o anodo e o catodo por onde escoam os elétrons, no sentido anodo-catodo.

Retirando-se um desses componentes elimina-se a pilha e conseqüentemente, diminui a possibilidade de corrosão. Evidentemente, podem-se retirar o catodo, a ligação metálica ou o eletrólito. O anodo, sendo a própria estrutura metálica que se deseja proteger, não pode ser retirada, então aplica-se nela revestimento protetor e/ou proteção catódica (GENTIL, 2011).

### 4.3.3 Tipos de pilhas

#### 4.3.3.1 Pilhas de eletrodos metálicos diferentes

A diferença de potencial entre metais diferentes ou ligas faz com que haja fluxo de elétrons entre eles enquanto estão eletricamente acoplados em uma solução condutora. A direção do fluxo de elétrons e, portanto, o comportamento galvânico (Figura 3), depende de qual metal ou liga é mais ativa. O metal mais ativo ou liga torna-se anódica, e o metal mais nobre ou liga torna-se catódica no acoplamento (ASM HANDBOOK, 2003).

Na realidade, qualquer heterogeneidade da estrutura, da superfície da armadura ou nas vizinhanças das barras de aço é suficiente para justificar uma diferença de potencial de eletrodo entre regiões vizinhas, micro ou macroscópicas, da armadura (HELENE, 1993).

**Figura 3: Corrosão galvânica em tubo de aço-carbono no contato com válvula de latão**



fonte: Gentil 2008.

Nas situações onde metais diferentes devem ser usados deve-se dar prioridade a metais que estejam próximos na tabela de potenciais, objetivando haver pouca diferença de potencial entre os metais e reduzindo a velocidade de corrosão dos equipamento (GENTIL, 2011).

#### 4.3.3.2 Pilhas de concentração

Esta pilha ocorre quando temos materiais de mesma natureza mas expostos a um eletrólito com diferentes concentrações (pilha de concentração iônica) ou no caso de um mesmo eletrólito, porém em locais onde os teores de gases dissolvidos são diferentes (pilha de aeração diferencial) (GENTIL, 2011).

##### a) Pilha de concentração iônica

É provavelmente o segundo tipo em frequência e importância nas estruturas de concreto armado. Aparece como resultado de diferenças de concentração de sais nos poros capilares e fissuras do concreto, ou seja, diferentes concentrações de íons na solução intersticial (HELENE, 1993).

A presença de íons cloretos, ou outros íons agressivos, acima de determinado teor, chamado de limiar da corrosão por cloretos, é considerada uma das principais causas da falha prematura do concreto. A contaminação do concreto por íons cloreto pode dar-se durante a construção, através dos materiais empregados (agregados contaminados e aditivos de cura), ou após a construção, proveniente de ambientes agressivos e, ainda, no caso dos países sujeitos à neve, causados pelos sais aplicados para degelo (PAULO GOMES, 1995).

Podemos então fixar a natureza elétrica dos eletrodos:

- Anodo: aquele que estiver imerso na solução mais diluída
- Catodo: aquele que estiver imerso na solução mais concentrada.

##### b) Pilha de aeração diferencial

É provavelmente a mais comum nas estruturas de concreto armado e deve-se à diferença de acesso de oxigênio entre regiões contíguas da armadura. Neste caso a região típica do anodo é de oxidação do ferro, ou seja, a semi-pilha ou eletrodo do metal Fe que passa à solução liberando elétrons. No catodo onde há água aerada em meio neutro ou aquoso ocorre a redução do oxigênio dissolvido (HELENE, 1993).

Nos casos práticos as pilhas de aeração diferencial se formam com metais ativos como ferro, zinco e alumínio com a corrosão ocorrendo na região de menor concentração do gás oxigênio (GENTIL, 2011).

## 5. CORROSÃO NAS ARMADURAS DE CONCRETO

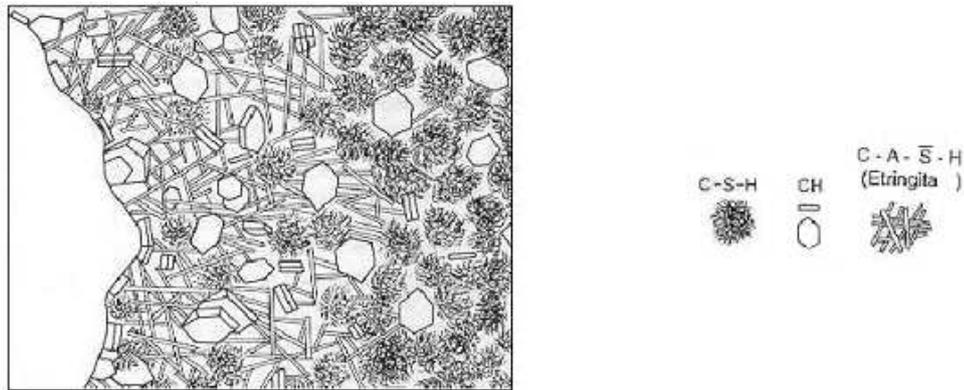
A pasta de cimento que compõe as estruturas de concreto armado são naturalmente porosas e esta característica está intimamente ligada aos processos de degradação dessas estruturas, pois permite a deposição de água em seu interior. A água funciona nesses casos como um veículo para o transporte de agentes agressivos e é ela própria uma fonte de processos químicos e físicos de degradação. Vários fatores concorrem para explicar os processos que comprometem a funcionalidade das estruturas de concreto armado, raramente se observa uma causa única. Em estágios mais avançados de deterioração é possível perceber vários fatores agindo sobrepondo-se uns aos outros (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

### 5.1 Microestrutura do concreto

A relação entre a estrutura e as propriedades físicas estão na base da ciência dos materiais. Alguns elementos estruturais podem ser observados ao olho nu como, por exemplo, os grãos relativamente grandes, exibindo diferentes texturas, sobre a superfície de lingotes de chumbo. Entretanto, os grãos que constituem os diferentes materiais precisam ser investigados através de equipamentos como o microscópio óptico para um entendimento mais aprofundado sobre suas propriedades. Essa porção aumentada das macroestruturas dá-se o nome de microestruturas (CALLISTER Jr, 2011).

No nível macroscópico ao observar uma seção transversal de concreto podemos distinguir duas fases que são as partículas de agregados e o meio ligante, composto de pasta de cimento endurecida. Nessas condições o concreto pode ser considerado um material bifásico. A nível microscópico podemos perceber uma terceira fase, a zona de transição, que representa uma interface entre as partículas de agregados e a pasta. Na figura 4 podemos observar as três microestruturas que determinam as propriedades do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

Figura 4: Representação diagramática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto



Fonte: METHA P.K; MONTEIRO P.J.K, 2005

A principal aplicação dos agregados é na produção de concretos e argamassas onde, em conjunto com um aglomerante (pasta de cimento Portland / água), constituem uma rocha artificial, com diversas utilidades na engenharia, cuja principal aplicação é compor os diversos elementos estruturais de concreto armado. Os agregados possibilitam que algumas propriedades da rocha artificial a ser formada apresentam melhor desempenho, tais como: redução da retração da pasta de cimento, aumento da resistência ao desgaste, melhor trabalhabilidade e aumento da resistência ao fogo. O conhecimento de certas características dos agregados é uma exigência para a dosagem dos concretos. A massa específica é diretamente proporcional a resistência à compressão do concreto. A forma do grão do agregado, caracterizada pela granulometria e textura, também influi nas propriedades do concreto (RIBEIRO JUNIOR, 2015).

O Cimento Portland caracteriza por ser o componente mais nobre do concreto, a mistura do cimento Portland com água gera uma pasta que envolve os agregados sendo responsável pelas propriedades de ligante que endurece sob ação da água, mesmo voltando a ação da água o cimento resiste sem se decompor (RIBEIRO JUNIOR, 2015).

Na pasta de cimento podemos encontrar várias fases sólidas que são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), Hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , Sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer não hidratado. Além dos sólidos descritos a pasta de cimento possui diversos tipos de vazios que são importantes para as propriedades do material (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

A zona de transição consiste em uma estrutura mais porosa do que na matriz da pasta de cimento hidratado devido a uma relação água/cimento elevada. A zona de transição é

a de menor resistência no concreto principalmente pela maior quantidade de vazios e microfissuras presentes nesta região (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

## 5.2 Camada de passivação

A passivação dos metais é um fenômeno que depende basicamente de suas próprias características químicas e do meio onde esse metal se encontra. Um metal é considerado passivo quando, através de uma película de óxido, ele resiste de forma satisfatória aos processos corrosivos. A película de óxido é formada por meio de uma reação eletroquímica intensa e de curta duração proporcionando ao metal uma corrosão com efeitos benéficos (HELENE, 1993).

Este fenômeno inesperado de passividade ocupa uma posição central no controle de processos de corrosão, permitindo o uso de materiais metálicos nas muitas tecnologias do século 21. Além disso, é a quebra do filme passivo que leva à incapacidade de metais e ligas em desempenharem as suas funções atribuídas por causa de modos de falha de corrosão localizada como corrosão sob tensão, corrosão intersticial e fadiga (ASM HANDBOOK, 2003).

Segundo (GENTIL, 2011), a passividade de um metal pode ser destruída por substâncias redutoras, polarização catódica e íons halogeneto, principalmente cloreto, que penetra na camada de óxido ou a dispersa sob a forma coloidal, aumentando sua permeabilidade.

Uma das grandes vantagens do concreto utilizado nas estruturas, quando bem executado, é que ele é capaz de fornecer uma proteção de natureza física na medida em que evita a entrada de agentes agressivos presentes em atmosferas industriais ou urbanas além de fornecer uma proteção química à armadura de aço decorrente da basicidade fornecida pelos componentes do cimento. A água intersticial do cimento é altamente alcalina com pH que varia de 12 a 13 (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

## 5.3 Mecanismo de deterioração

Para que ocorra a corrosão da armadura de concreto, que tem como produto óxidos e hidróxidos de ferro, algumas condições precisam ser satisfeitas:

1. A existência de um eletrólito
2. Existir uma diferença de potencial

3. Existir oxigênio
4. Podem existir agentes agressivos

Dependendo da umidade do ambiente e da sua porosidade, a pasta de cimento hidratada é capaz de reter uma grande quantidade de água (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

A água está sempre presente no concreto em quantidade suficiente para atuar como eletrólito, principalmente em regiões de clima úmido. A umidade de equilíbrio nos poros do concreto normal de relação/cimento da ordem de 0,6 a 25°C é função da umidade relativa do ambiente, podendo apresentar as seguintes variações (HELENE, 1993).

- U.R. = 40% → umidade de equilíbrio = 3% (70 litros de água/ m<sup>3</sup>)
- U.R. = 70% → umidade de equilíbrio = 4% (95 litros de água/ m<sup>3</sup>)
- U.R. = 98% → umidade de equilíbrio = 6% (140 litros de água/ m<sup>3</sup>)

Em geral haverá volume de água no concreto para que ele funcione como um eletrólito transportando os íons necessários aos processos de corrosão.

Para que ocorra uma diferença de potencial em um mesmo material metálico basta que haja diferentes concentrações de íons dissolvidos na vizinhança do aço como álcalis, cloretos e oxigênio (Figura 5). Como resultado dessa diferença uma parte do metal que se encontra na porção mais diluída do eletrólito torna-se o ânodo e o que estiver no eletrólito mais concentrado será o cátodo (GENTIL, 2011).

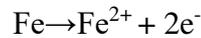
**Figura 5: Degradação de ponte provocada pela contaminação de cloretos em Kingston, Ontario**



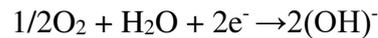
**Fonte: (Roberge, 1999)**

O mecanismo de corrosão é mostrado na figura 6 e apresenta as seguintes reações:

**Na área anódica (corrosão)**



**Na área catódica (sem corrosão)**



Os íons de ferro migram pelo eletrólito em direção ao cátodo e os íons hidroxila migram em direção ao ânodo. Em uma região intermediária forma-se como produto o Hidróxido ferroso

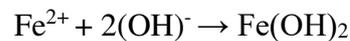
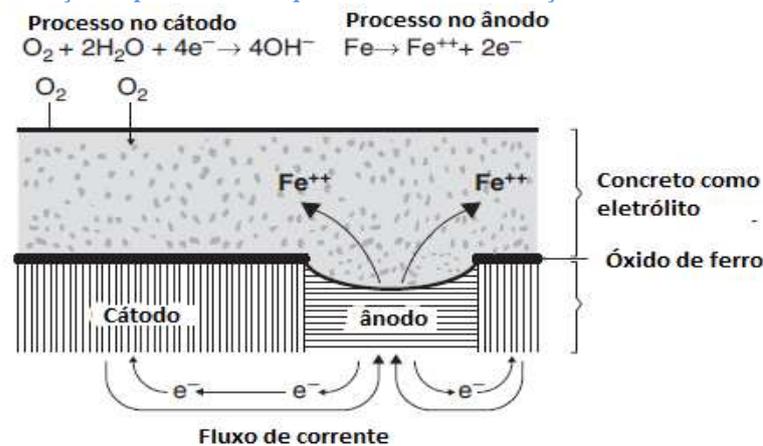


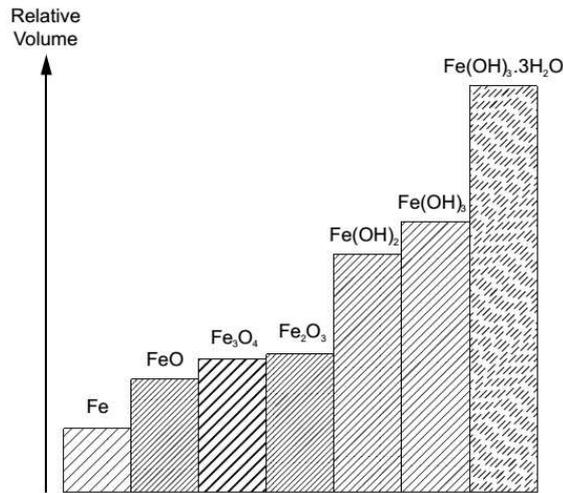
Figura 6: Ilustração do processo eletroquímico de corrosão do aço no concreto úmido e permeável



Fonte: METHA P.K; MONTEIRO P.J.K, 2005

A transformação de aço metálico em ferrugem é acompanhada por um aumento do volume. Acredita-se que este aumento de volume seja a causa principal da fissuração do concreto. Na presença de cloretos para relação  $\text{Cl}/\text{OH}^{-}$  maiores que 0,6 mesmo com um pH acima de 11,5, alcalino, proporcionado pela pasta de cimento a armadura começa um processo de corrosão (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

Figura 7: Volume relativo dos produtos de corrosão em relação ao aço das armaduras

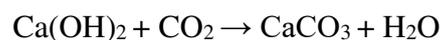


Fonte: Roberge, 1999

### 5.3.1 Carbonatação como mecanismo de despassivação

Nas estruturas de concreto armado onde o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , fornece alcalinidade à solução intersticial funcionando como barreira química às armaduras do concreto, reduz-se com o tempo devido a presença de  $\text{CO}_2$  (Gás carbônico),  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre) e  $\text{H}_2\text{S}$  (gás sulfídrico). Esses gases contribuem para a redução do pH no interior do concreto que é o processo conhecido na literatura por carbonatação (ROBERGE, 1999).

O processo de transformação por gás carbônico ocorre lentamente pela reação:



A carbonatação ocorre quando o  $\text{CO}_2$ , do ar ou em água agressivas, se combina com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , formando o carbonato de cálcio,  $\text{CaCO}_3$ , insolúvel. Este processo faz cair o pH da solução de equilíbrio de 12,5 para 9,4, que é o pH que precipita este composto (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

A carbonatação por si só não é o responsável pela degradação do concreto, mas sim o resultado do processo químico que reduz a alcalinidade diminuindo a estabilidade química da película de passivação no entorno da armadura de aço. A penetração de gás carbônico no concreto ocorre basicamente por um processo de difusão (HELENE, 1993).

A ação do  $\text{CO}_2$  sobre os constituintes do cimento hidratado é muito complexa, não se limitando apenas ao hidróxido de cálcio, atacando e decompondo todos os produtos na

hidratação do cimento. O processo ocorre em várias etapas envolvendo diversas reações secundárias, embora o carbonato de cálcio seja sempre um dos produtos finais (GENTIL, 2011).

A velocidade e a profundidade da frente de carbonatação estão diretamente relacionadas as concentrações dos gases citados e também está relacionado com as próprias características do material como a quantidade de poros que facilitam a difusão dos gases. A tabela 3 apresenta os fatores relacionados ao meio ambiente e como eles influenciam o mecanismo de carbonatação (RIZZON, 2006).

A comprovação da carbonatação pode ser feita através de difração de raios-x, análise térmica diferencial e termogravimetria. Outra forma mais simples e direta de se constatar a frente de carbonatação é a utilização de indicadores de pH, uma vez que a carbonatação está associada a queda de pH da solução intersticial do concreto armado variando a coloração do indicador conforme a faixa de acidez ou alcalinidade presente.

**Quadro 4: Fatores do meio ambiente que influenciam a carbonatação**

Fatores relativos ao ambiente de exposição	Influência sobre a carbonatação
Concentração de CO <sub>2</sub>	Quanto maior a concentração de CO <sub>2</sub> , maior a velocidade de carbonatação, principalmente para concretos de elevadas relações a/c. Esses valores variam entre: - 0,03 a 0,05% em atmosferas rurais. - 0,1 a 1,2% em locais de tráfego pesado. - até 1,8% para atmosferas viciadas, como silos de certos materiais a granel.
Umidade relativa do ar (UR)	A UR influencia na quantidade de água nos poros do concreto, controlando assim a velocidade de difusão do CO <sub>2</sub> . Com a UR em um intervalo de 50% a 65% têm-se os maiores valores de carbonatação. E para UR95% praticamente não ocorre.

fonte: Ana Carina Rizzon, página 27

### 5.3.2 Contaminação por cloretos

A corrosão provocada por íons cloreto é considerada pela literatura como um dos mecanismos mais agressivos de deterioração do concreto. Quanto maior a concentração de íons cloretos menores são as chances de passivação da armadura no concreto, mesmo que no seu interior o pH= 12,5, típico da solução intersticial do concreto, seja mantido.

Outra consequência provocada pela contaminação por cloretos é a diminuição da resistividade elétrica sendo provável o início da corrosão para valores abaixo de  $5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ . Em estruturas com ambiente de trabalho próximo a áreas marinhas a contaminação por cloretos é apontada como o primeiro causador dos processos de corrosão através dos mecanismos citados. (PAULO GOMES, 1995)

Os íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) tem a capacidade de destruir de forma localizada a película passivadora das armaduras de concreto provocando a corrosão por pite. Estas áreas acabam formando a região do anodo nas pilha de corrosão provocando a perda progressiva de material. Os íons cloretos podem chegar ao material por meio de aceleradores de pega, na forma de impurezas de agregados, atmosfera marinha, água do mar, sais de degelo e através de processos industriais (RIZZON, 2006).

Especial atenção deve ser dado aos mecanismos de transporte desse contaminante para o interior do concreto. Como cristal sólido os cloretos não representam riscos significativos às estruturas de concreto armado até que ciclos de molhagem os dissolvam transportando-os para o interior no concreto. São mecanismo de transporte a absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade sobre pressão e migração iônica (HELENE, 1993).

A absorção capilar é o primeiro mecanismo de contaminação da estrutura pois é observado logo após os ciclos de molhagem na superfície do concreto e depende da porosidade da estrutura e da viscosidade do líquido contaminante. Quanto menor forem os diâmetros dos poros maiores serão as forças capilares de sucção e quanto menos viscoso for o líquido mais facilmente o líquido poderá penetrar em seu interior (HELENE, 1993).

A difusão iônica é o principal mecanismo de movimentação dos íons cloreto no interior do concreto. A movimentação dos íons ocorre principalmente pela diferença de concentração entre as camadas externas e internas. Esta diferença de concentração motiva o movimento dos íons em busca do equilíbrio entre os vazios interconectados no interior da massa de cimento. (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

A migração iônica se dá pelo campo gerado pela corrente elétrica no processo eletroquímico e pode também ser causado por campos elétricos externos.

Como ocorre na prática uma simultaneidade de ações e mecanismos se sobrepõe e que tornam complexo prever com segurança o quanto e até onde penetrará o cloreto no concreto.

Existe na literatura três teorias para explicar os efeitos dos íons cloretos na corrosão do concreto (Helene, 1993; Gentil, 2011). São eles:

- 1) Teoria do filme de óxido: Segundo essa teoria os íons cloretos penetram mais facilmente na película de óxido responsável pela passivação do aço das armaduras do concreto. Estes íons são capazes de dispersar-se coloidalmente no filme, facilitando sua penetração.
- 2) Teoria da adsorção: Segundo esta teoria os íons de cloreto são adsorvidos na superfície metálica em competição com o oxigênio dissolvido ou hidroxilas. O cloreto promove a hidratação dos íons metálicos, facilitando sua dissolução.
- 3) Teoria do complexo transitório: Segundo esta teoria os íons de cloreto competem com os íons de hidroxila para a produção de íons ferrosos pela corrosão, formando um complexo solúvel de cloreto de ferro. Esse complexo difunde-se a partir das áreas anódicas destruindo a camada protetora de  $\text{Fe(OH)}_2$  e permitindo a continuação do processo corrosivo. Numa certa distância do eletrodo o complexo é rompido, precipitando o hidróxido de ferro e o íon cloreto se livra para realimentar o processo

#### 5.3.2.1 Limite para despassivar as armaduras e detecção

Existe um limite onde a concentração de íons cloretos despassiva as armaduras de aço. Concentrações de cloreto iguais ou superiores a 700 mg/l despassivam o aço imerso em água de cal (HELENE, 1993).

Alguns pesquisadores desenvolvem trabalhos no sentido de achar uma relação entre cloretos e hidroxilas  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  onde se inicia o processo corrosivo. Gentil, apresenta uma relação de 0,6 para o início de despassivação da armadura parecendo ter seu filme de óxido protetor instável facilitando a corrosão.

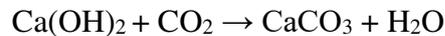
Um método possível de ser empregado para determinar a penetração por cloreto é vaporizar uma solução de  $\text{AgNO}_3$  sobre a superfície fraturada do concreto. É possível através deste método, quando ocorre a contaminação por cloretos, a observação da formação de precipitados brancos de cloreto de prata (GENTIL, 2011).

#### 5.3.3 Lixiviação – Eflorescência

Provocada quando águas puras com poucos ou nenhum íon de cálcio entram em contato com a pasta de cimento Portland; elas podem hidrolisar ou dissolver os produtos

contendo cálcio. A lixiviação do hidróxido de cálcio do concreto, além da perda de resistência, provoca agressões estéticas (DENIT, 2006).

A reação do fenômeno descrito acima é:



Como explicitado pela reação acima, o hidróxido de cálcio lixiviado ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ao entrar em contato com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), presente no ar atmosférico, reage formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), insolúvel. O carbonato de cálcio, resultado da reação, é o responsável pelo aparecimento da eflorescência e se manifesta pelos depósitos de cor branca na superfície de concretos podendo aparecer sob o formato de estalactites (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

Figura 8: Eflorescência em estrutura de concreto



fonte: <http://www.ecivilnet.com/dicionario/images/lixiviacao.jpg>

#### 5.3.4 Ácidos

O contato direto do concreto por ácidos provoca a sua deterioração pois eles reagem com diversos componentes do concreto reduzindo seus valores de pH que constitui sua principal barreira química contra o início dos processos corrosivos. Devido a esta ação agressiva sobre o concreto diversos ácidos orgânicos são apontados como os principais causadores de deterioração em pisos de fábricas como as de laticínios (ácido láctico), de vinagre (ácido acético), de sabão (ácido cítrico) etc. (GENTIL, 2011)

As reações por troca de cátions entre as soluções ácidas e constituintes da pasta de cimento geram sais solúveis de cálcio que podem ser removidos pela lixiviação, degradando o concreto (DENIT, 2006).

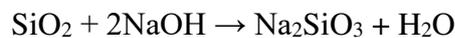
Outro ponto importante a ser destacado é a frequência cada vez maior de chuvas ácidas, fenômeno não natural provocado pelo homem, proveniente da combustão industrial e automotiva de combustíveis fósseis. Estes componentes principalmente o dióxido de enxofre são transportados pela atmosfera por longas distância atingindo estruturas situadas em regiões distantes dos centros poluidores (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

### 5.3.5 Bases – (Reação Álcali-Agregado)

Em concentrações elevadas de bases é possível observar a deterioração do concreto. Em soluções concentradas de bases fortes é possível a solubilização dos silicatos e dos aluminatos presentes na massa constituinte do cimento. (GENTIL, 2011)

As reações denominadas álcali-agregado ou álcali-sílica são reações químicas envolvendo íons alcalinos do cimento Portland, íons hidroxila e certos constituintes silicosos que podem estar presentes no agregado; resulta daí a importância da escolha do cimento, dos agregados e da compatibilidade destes materiais. Manifesta-se pela expansão e fissuração do concreto, com perda de resistência, elasticidade e durabilidade (DENIT, 2006).

No caso de silicatos ou de agregados contendo sílica haverá o ataque deste por solução de bases forte, tendo a formação de silicato de sódio conforme a reação abaixo.



Os produtos da reação álcali-sílica absorvem água e aumentam de volume, transformando-se neste processo de um gel duro e sólido a um gel mole, que, finalmente se dispersa em solução. À medida que mais água é absorvida, a fenda é propagada para o interior do concreto e torna-se mais larga. A abertura da fenda normalmente demora muitos anos e é precedida pelo destacamento da superfície do concreto. (FERREIRA, 2000)

Outra situação que pode originar deterioração do concreto é aquela no qual a solução de soda cáustica penetra no concreto e vai se concentrando. O resultado deste processo é a cristalização do carbonato de sódio hépta ou deca-hidratado conforme as seguintes reações (GENTIL, 2011).



## 6. MÉTODOS DE PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO

Uma vez identificada a deterioração do concreto armado com ação eletroquímica sobre a armadura deve-se iniciar a manutenção corretiva. Alguns procedimentos básicos devem ser seguidos para o reparo da estrutura (GENTIL, 2011):

- Caracterização do agente causador e seu mecanismo de ação.
- Retirada do material deteriorado: massa de concreto e armadura.
- Se não houver comprometimento da armadura e da massa de concreto, pode-se repor o concreto ou aplicar argamassa de base epóxi ou grautes (material constituído de cimento Portland, agregados e aditivos, fluido e autoadensável e sem retração quando endurecido) para preenchimento de cavidades.
- Se houver comprometimento da armadura e da massa de concreto, é usual soldar nova armadura e utilizar, em caso de extensão do reparo, concreto projetado. Em alguns casos é indicada a pintura da armadura e do concreto depois de recuperado.

### 6.1 Sistemas de reparo

Mesmo que as estruturas de concreto armado sejam construídos de acordo com as normas técnicas vigentes no país, existem ambientes de trabalho tão agressivos que acabam ultrapassando as barreiras físicas e químicas impostas pela massa de cimento e atacam a armadura de concreto. Nesses casos é necessário a utilização de métodos de proteção da armadura.

Para o profissional responsável por analisar os fenômenos patológicos presentes em tais estruturas é imprescindível o conhecimento de como se processam as pilhas de corrosão. O conhecimento desses processos pode inclusive indicar o melhor caminho a ser seguido no reparo das estruturas afim de corrigir os defeitos e impedir tais deteriorações, além de prolongar a vida útil das estruturas.

O objetivo básico dos reparos deve ser parar ou no mínimo reduzir os processos de corrosão através da anulação ou redução do processo anódico ou do processo catódico ou ainda do processo de condução eletrolítica que são os principais responsáveis pelo aparecimento das células de corrosão (RILEN, 1994 apud BEZERRA CABRAL, 2000).

A literatura especializada possui diversos modos de separar os sistemas de reparo nas estruturas de concreto armado, contudo este trabalho dividirá esses sistemas em duas grandes áreas distintas. O primeiro grupo serão os sistemas que atuam sobre as armaduras e o segundo grupo são os sistemas que atuam sobre a massa de cimento.

#### 6.1.1 Sistemas de reparo que atuam sobre a armadura

##### 6.1.1.1 Proteção catódica

Existem dois tipos de proteção catódica: proteção catódica galvânica e proteção catódica por corrente impressa. A proteção catódica por corrente impressa parece ser a única a interromper por completo o processo corrosivo após este ter iniciado, em ambientes úmidos, carbonatados ou altamente contaminados por cloretos. (PAULO GOMES, 1995)

A proteção catódica galvânica consiste em fornecer um metal de sacrifício com um potencial elétrico mais negativo do que a do metal a ser protegido transformando o metal, que antes corroía, em cátodo. O processo de corrosão nas armaduras é interrompido enquanto durar o metal de sacrifício, após isso o aço volta a ser corroído (GENTIL, 2011).

A proteção catódica por corrente impressa consiste em fornecer um fluxo de corrente por uma fonte geradora. A grande vantagem do método por corrente impressa consiste no fato de a fonte geradora ter a potência e a tensão de saída de que se necessita, em função da resistividade elétrica do eletrólito. (PAULO GOMES, 1995)

Estruturas de concreto normalmente contam com a proteção da camada de concreto para prevenir a corrosão do aço incorporado. Quando a corrosão do aço embutido ocorre devido a uma perda desta proteção a técnica de proteção catódica é por vezes usada para prolongar a vida útil da estrutura já deteriorada (ASM HANDBOOK, 2003).

##### 6.1.1.1.1 Proteção catódica com anodos galvânicos

A proteção catódica pode ser aplicada ligando-se ânodos de sacrifício a uma estrutura. Basicamente, o princípio é o de criar uma célula galvânica, com o anodo representando o material menos nobre que deve ser consumido na interação. A estrutura irá ser protegida como um resultado do fluxo de corrente galvânica. Em aplicações práticas, um certo número de ânodos geralmente tem que ser ligado a uma estrutura para garantir os níveis

globais de proteção. As seguintes vantagens são associadas com os sistemas de ânodo de sacrifício (ROBERGE, 1999):

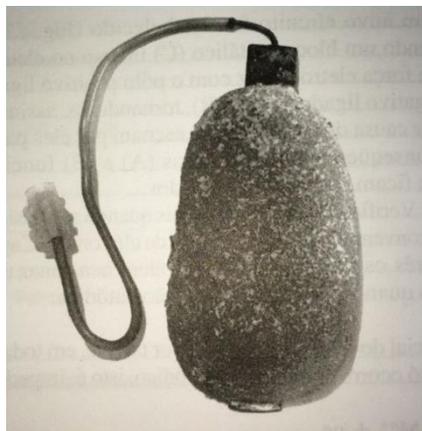
- Nenhuma fonte de alimentação externa é necessária.
- Facilidade de instalação (e custos relativamente baixos de instalação).
- Interferência catódica improvável em outras estruturas.
- sistemas de baixa manutenção .
- Sistema é essencialmente auto-regulador.

Os anodos galvânicos são geralmente enterrado envoltos em uma mistura de gesso, betonita e sulfato de sódio que funciona como condutor permitindo a diminuição da resistência elétrica entre o metal de sacrifício e o solo distribuindo de forma uniforme o seu desgaste. (PAULO GOMES, 1995)

Aplicações típicas incluem tanques enterrados, dutos subterrâneos, cabos de comunicação e de energia enterrados, água e sistemas de distribuição de gás, proteção interna de trocadores de calor e tanques de água quente, navios e estruturas marinhas (ROBERGE, 1999).

Para a utilização em solos, o magnésio (figura 9) e o zinco são bastante eficientes, sendo que para a água do mar o zinco e, mais recentemente, o alumínio, são os melhores anodos. Esses metais, utilizados em ligas apropriadas, são eletronegativos em relação ao aço, podendo protegê-lo com facilidade (GENTIL, 2011).

Figura 9: Anodo de magnésio



fonte: Gentil, 2011

Os anodos galvânicos podem ser instalados isoladamente ou em grupos (leitos). Quanto a utilização é necessário analisar tanto aspectos técnicos quanto econômicos. De forma geral o custo por quilo de magnésio é maior por quilo de zinco. Contudo, no caso do concreto o anodo mais escolhido é o zinco, que possui o potencial -1,10 contra -0,20 do aço no concreto (Tabela 4) (PAULO GOMES, 1995).

Segundo vários autores pesquisados, o sistema de proteção catódica galvânica não apresenta bons resultados em concreto armado sujeitos a regiões de respingo no litoral, devido principalmente, a grande resistividade.

#### 6.1.1.1.2 Proteção catódica por corrente impressa

Sistemas de corrente impressa podem usar tensões maiores; isso permite que os ânodos possam ser instalados mais remotamente, produzindo padrões de corrente de distribuição mais eficientes no cátodo protegido. Estas tensões maiores também são úteis em ambientes de baixa condutividade, tais como água doce e concreto, em que os ânodos de sacrifício teriam poder insuficiente (ASM HANDBOOK, 2003).

Gentil (2011) enuncia os procedimentos adotados na proteção catódica por corrente impressa, sendo o seguinte:

- Coloca-se um sistema de anodos especiais de titânio junto a superfície do concreto, cobrindo-se o conjunto com uma camada de concreto;
- O sistema de anodo é interligado ao terminal positivo de um retificador sendo as ferragens ligadas ao seu terminal negativo;
- O retificador é ligado, criando-se uma diferença de potencial entre o concreto e as ferragens, que passam a funcionar como catodo, ficando protegidas.
- A corrente injetada pelos anodos passa pelo concreto, penetra nas ferragens e retorna ao negativo do retificador, fechando o circuito.

Anodos poliméricos são usados para atenuar a corrosão do reforço de aço em concreto contaminado por sal. O sistema é constituído por uma malha de anodos parecidos com arames, os quais são feitos de um material polimérico condutor que reveste os fios de cobre. O polímero condutor não só serve como um material de ânodo ativo, mas também protege os condutores de ataque químico. Estes ânodos de malha (Figura 10) são concebidos e espaçadas de modo a assegurar uma protecção uniforme a longo prazo a densidades de corrente baixas. A malha de anodo é colocado sobre a superfície de uma estrutura de concreto

armado, coberto com uma cobertura de cimento Portland ou cimento modificado por polímero, e, em seguida, ligado a uma fonte de energia de baixa voltagem (ASM HANDBOOK, 2003).

Figura 10: Vista de estrutura de concreto armada recebendo anodos para proteção catódica por corrente impressa



Fonte: ASM Handbook, 2003

Antes da proteção catódica por corrente impressa ser utilizada é importante a verificação de alguns pontos essenciais à sua correta aplicação. Primeiramente é importante saber se as armaduras de aço estão interligadas através de toda a estrutura. Caso seja necessário, novas conexões devem ser feitas para atingir este objetivo. Além deste ponto deve-se conhecer a espessura do cobrimento do concreto, visto que as variações do cobrimento podem induzir fluxos de corrente não uniformes (PAULO GOMES, 1995).

#### 6.1.1.2 Proteção por barreira

Esse sistema de reparo consiste no impedimento da dissolução metálica da armadura através do isolamento da superfície da mesma com o eletrólito, geralmente utilizando-se pinturas de baixíssima permeabilidade. Essas pinturas devem atuar como uma barreira física entre a armadura e a argamassa ou concreto de reparo, já que esses últimos podem não garantir uma passivação adequada.

Na América do Norte, o uso de vergalhões revestidos com epóxi remonta a mais de duas décadas, e atualmente representa a alternativa mais comumente usada para o aço de reforço padrão. Variáveis como limpeza e preparação da superfície, espessura do revestimento, adesão do revestimento ao vergalhão, continuidade do revestimento devem ser considerados para a resistência a corrosão de forma ideal. Embora os revestimentos epoxi tenham funcionado satisfatoriamente em muitas aplicações, tais como plataformas de pontes,

incidentes de corrosão severa foram observados na subestrutura de quatro pontes em Florida Keys (Estados Unidos) após apenas 6 a 10 anos de exposição (ROBERGE, 1999).

Uma vez que o revestimento epóxi funciona proporcionando uma barreira à corrosão, a continuidade do revestimento é obviamente muito importante. É possível controlar os defeitos do revestimento dentro dos limites. Existem risco de danos no revestimento durante o transporte, o descarregamento, o armazenamento e durante a instalação no local. Os esforços têm sido dirigidos para a reparação de danos visíveis no local, antes da colocação em concreto (ROBERGE, 1999).

### 6.1.2 Sistemas de reparo que atuam sobre o concreto

#### 6.1.2.1 Reparo por repassivação

Esse sistema consiste na remoção total ou parcial da massa de cimento, que envolve as armaduras, e da remoção dos produtos de corrosão por jato de areia ou escovação manual sendo posteriormente o substrato limpo por um jato de ar ou água

Caso a perda de seção transversal da barra da armadura seja maior que 15% deve-se substituir a barra a fim de que a estrutura suporte os esforços solicitados.

#### 6.1.2.2 Reparo por adição de polímero

O uso de polímeros como modificadores de argamassa tem sido amplamente difundidos devido a sua capacidade de aderir fortemente ao concreto antigo e de resistir a entrada de água e soluções agressivas. A argamassa modificada de polímero consiste na associação de um composto inorgânico (cimento) e um composto orgânico (polímero) (GENTIL, 2011).

Na preparação de materiais compostos com polímeros são usados os métodos a seguir:

- I. Concreto impregnado com polímero: O concreto previamente seco e curado é impregnado com um monômero de baixa viscosidade e polimerizado, em seguida, por aquecimento, radiação ou processo químico. Geralmente são usados os monômeros termoplásticos metacrilato de metila, estireno, acrilonitrila. Após cura e polimerização do concreto, este contém cerca de 8% do peso do concreto.

- II. Concreto com cimento e polímero: É a pré-mistura de pasta de cimento e agregado, no qual se adiciona um monômero antes da secagem e cura. Geralmente são usados poliéster-estireno, epóxi-estireno, resinas furânicas e cloreto de vinilideno.
- III. Concreto polimérico: Constituído de agregado, ligado com polímero no lugar de cimento.

No livro *Corrosão* (GENTIL, 2011) ainda afirma-se que o concreto impregnado com polímero tem sido usado com bons resultados, inclusive para a proteção contra a ação de cloretos.

O uso de polímeros têm sido amplamente difundido devido a sua capacidade de aderir fortemente ao concreto antigo e de resistir à entrada de água e de soluções agressivas. Em particular, eles têm recentemente alcançado muita atenção como materiais de reparo em estruturas de concreto danificadas devido a sua capacidade de retardar o processo de iniciação da corrosão (AFRIDI et alli, 1994 apud BEZERRA CABRAL, 2000)

#### 6.1.2.3 Reparo por inibição

Inibidores de corrosão são substâncias que, quando adicionadas em um meio corrosivo promovem mudanças locais na interface metal-eletrólito. Gentil (2011) afirma que entre os inibidores mais usados estão o Nitrito de sódio,  $\text{NaNO}_2$ , e Nitrito de cálcio,  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ , que agem formando uma película protetora de óxido de ferro passivando a armadura e protegendo-a contra a corrosão.

Uma das misturas de inibidores de corrosão mais conhecidas e utilizadas na tentativa de controlar a corrosão das armaduras de concreto induzida por cloreto é o nitrito de cálcio,  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ . O mecanismo de inibição envolve íons nitrito competindo com íons cloreto para reagir com  $\text{Fe}_2$  produzidos no ânodo. Essencialmente, os íons de nitrito limitam a formação de compostos instáveis provocados por cloretos e promovem a formação de compostos estáveis que passivam a superfície das armaduras (ROBERGE, 1999).

Geralmente os inibidores de corrosão são adicionados à massa do concreto durante o amassamento dos mesmos mas, recentemente, uma nova geração de produtos têm sido introduzida no mercado. Estes são aplicados na superfície do concreto de onde migram até as armaduras, protegendo-as contra corrosões futuras. Testes já indicam a eficiência desses

produtos, reduzindo as taxas de corrosão em armaduras de concretos contaminados por cloretos (PAUL, 1998 apud BEZERRA CABRAL, 2000).

#### 6.1.2.4 Proteção por barreira

Esse tipo de sistema é geralmente usado como complemento a outros sistemas de proteção fornecendo uma proteção a mais contra o ingresso de agentes agressivos.

Segundo (GENTIL, 2011) na aplicação de tintas sobre superfícies de concreto são importantes os seguintes cuidados:

- I. Limpeza para a retirada da nata superficial de cimento devendo ser feita por ação mecânica (lixamento).
- II. Usar tintas não saponificáveis, ou seja, tintas resistentes à alcalinidade do concreto.
- III. Não se deve encapsular o concreto, se ele não estiver completamente seco, com películas impermeáveis em ambos os lados, pois a umidade retida tende a sair e empolar películas impermeáveis. O ideal é aplicar película impermeável em um lado e películas que permitam a passagem de vapor d'água em outro.

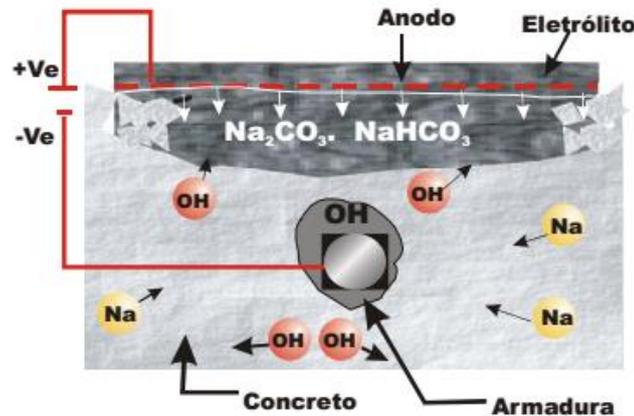
#### 6.1.3 Sistemas de reparo que utilizam métodos eletroquímicos

São técnicas, usadas mais recentemente, que visam restabelecer a passivação da armadura. Essas técnicas são aplicadas somente para concreto armado exposto à atmosfera, (GENTIL, 2011).

##### 6.1.3.1 Realcalinização

O objetivo da realcalinização é restaurar o alto pH do concreto sem a necessidade de remoção da massa contaminada. É utilizado nos casos de despassivação por carbonatação. Contudo, áreas onde o revestimento esteja danificado ou destacado devem ser previamente recuperados para a aplicação da técnica.

Figura 11: Processo de realcalinização através de aplicação de campo elétrico.



Fonte: Polito, 2006

O processo consiste na aplicação de um campo elétrico entre a armadura no interior do concreto e uma malha de aço com solução alcalina no exterior do concreto. No processo uma solução alcalina é transportada para o interior do concreto carbonatado até que os valores do pH sejam reestabelecidos aos níveis normais. A solução mais indicada para essa técnica é o carbonato de sódio a 1 molar, pois é acessível e barato.

#### 6.1.3.2 Dessalinização

O principal objetivo da dessalinização é a retirada de íons cloretos até níveis baixos capazes de interromper o processo de corrosão da armadura.

Ao se aplicar essa técnica é necessário o reparo das fissuras e destacamentos provenientes dos produtos de corrosão da armadura para que o fluxo de corrente aplicado não seja impedido. Os íons cloreto são transportados para fora do concreto por migração, através da aplicação de um campo elétrico (Figura 11), gerenciada por uma unidade retificadora controlada por computador, entre as armaduras no interior do concreto e um eletrodo constituído de uma malha metálica fixada externamente à superfície do concreto e colocada no interior de um reservatório eletrolítico. Durante esse tratamento ocorre a migração de cátions para a armadura e de ânions para o eletrodo externo, ocorrendo também a formação de íons hidroxila na superfície da armadura como consequência da reação catódica havendo, assim, um aumento do pH.

Na prática, o processo de extração não remove completamente os cloretos do concreto. Pelo contrário, uma certa percentagem é removida e o equilíbrio é redistribuído para longe das barras de aço. A extração de cloreto pelo método eletroquímico tem sido aplicada

industrialmente por vários anos e pode ser um método de controle eficaz para a corrosão induzida por cloreto de estruturas existentes. Suas limitações e desvantagens devem ser reconhecidas, e é claro que é uma metodologia relativamente complexa, que requer conhecimento especializado (ROBERGE, 1999).

## **7. CASOS REAIS DE CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO**

Nesta seção serão apresentados casos reais de corrosão em pontes de concreto armado disponíveis em trabalhos de pesquisa e na literatura especializada com vista a fazer uma análise das patologias e propor intervenções que recuperem as estruturas.

### **7.1 Corrosão no píer velho e no píer novo**

O caso exposto a seguir foi apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE e versa sobre a avaliação do estado de corrosão em dois píeres de atracação próximos um do outro onde foram observadas manifestações patológicas. O primeiro píer foi construído no início dos anos 60 e o segundo foi construído no início dos anos 70 devido a uma ampliação.

Segundo dados apresentados do ambiente de trabalho os píeres estão sujeitos a ataque por íons cloretos pois estão sujeitos à nevoa salina, grau de agressividade muito forte (tabela 6), além do local sofrer com a variação de mare. Na região que está em contato direto com a água do mar espera-se que a massa de concreto esteja saturada de água o que dificulta a entrada de oxigênio no seu interior visto que é um dos elementos fundamentais para o processo corrosivo. Além disso, grande parte da estrutura está sujeita à ação de águas pluviais, insolação, ao vento e a carbonatação.

Nas duas estruturas foram realizados ensaios para verificar se as estruturas sofriam com a carbonatação sendo realizado furos em etapas e locais distintos, aplicando-se uma solução de fenolftaleína a fim de verificar a queda de pH da estrutura por meio da mudança de coloração. Observou-se que a frente de carbonatação era pouco significativa para ser apontada como uma das causas da despassivação na armadura de ambos os píeres.

Para determinar o teor de íons cloreto ao longo da estrutura extraiu-se material pulverizado em diferentes profundidades para determinar o quantidade de contaminante expresso em relação a massa de cimento. Os resultados obtidos indicaram que em quase todos os pontos extraídos do píer velho os teores de cloreto eram superiores aos limites normalizados ( $\leq 0,5$  em relação a massa de cimento) enquanto que no píer novo ele se

mantinham abaixo do normalizado ( $\leq 0,05$  em relação a massa de cimento em concreto protendido) indicando apenas um início de contaminação.

Com base no exposto pode-se acusar a contaminação da massa de concreto como o agente principal da corrosão das estruturas do píer velho causando fissuras e destacamento no concreto (Figura 12).

**Figura 12: Corrosão no píer velho com armadura exposta**



**Fonte: Adriana Araujo, IPT.**

Através desta imagem é possível perceber que a parte inferior da estrutura do píer velho está em estado de deterioração avançada (Figura 12) com a armadura exposta. Outra anomalia frequente que é possível observar são fissuras ao longo das vigas longitudinais (Figura 13) devido a retração do concreto, facilitando a entrada de íons cloretos como contaminante.

**Figura 13: Fissuras em viga longitudinal do píer velho**



**Fonte: Adriana Araujo, IPT.**

Ao longo do píer novo (Figura 14) também foram observados fissuras ao longo da viga longitudinal, além de um ponto onde ocorreu perda da massa de concreto com exposição da armadura. Problemas de execução do projeto são apontados como causa provável dessas

fissuras e não provocadas pela corrosão das armaduras, porém são cruciais para a penetração de contaminantes que são importantes para o início do processo corrosivo.

As fissuras na direção longitudinal em ambos os píeres, dependendo da profundidade e se alcançam ou não a armadura, podem facilitar não só a entrada de cloretos como a penetração de  $\text{CO}_2$ , comum no processo de carbonatação. É comprovado que o processo de carbonatação ocorre facilmente ao longo das paredes das fissuras de forma mais acelerada que de outras formas contribuindo para o aparecimento de células de corrosão.

Figura 14: Fissuras ao longo do píer novo com perda de material no canto direito



Fonte: Adriana Araujo, IPT.

Pelo exposto é possível inferir que no píer há um estado ativo de corrosão devido a contaminação da estrutura por íons cloretos que como já demonstrado é capaz de destruir a película de passivação do aço formando pilhas de corrosão (Figura 9), além de estar exposto a um ambiente de alta agressividade (Quadro 6).

No píer novo os danos verificados na estrutura não eram decorrentes de processos corrosivos, mas as fissuras encontradas devem ser reparadas a fim de se evitar a entrada de agentes agressivos que despassivam as armaduras e iniciam a corrosão.

O reparo das fissuras em ambos os píeres deve ser feita com o uso de resinas epoxídicas que devem ser injetadas através de furos de diâmetro de 12,5cm com um espaço de 5cm entre os furos e espessura de 3cm. O pó deve ser retirado com ar comprimido e escova de pelos e após estar completamente seco deve-se colar mangueiras plásticas para introduzir a resina de reparo. Quando da inserção da resina, deve ser observado o momento em que a resina começa a escorrer pelo próximo furo, pois o furo inicial deve ser fechado e o material de reparo deve continuar sendo inserido pelo próximo furo até o preenchimento total da fissura.

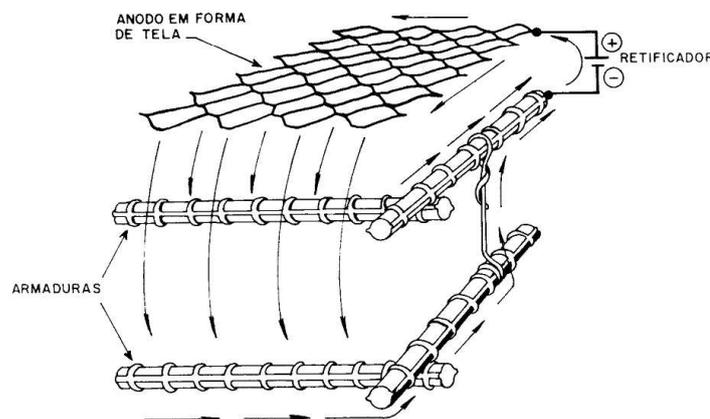
Para o píer velho é recomendável adotar algumas medidas de recuperação como a extração de cloretos (dessalinização) e a adoção de proteção catódica em toda a estrutura para evitar completamente a corrosão das armaduras aumentando o tempo de uso da estrutura.

Para ambos os píeres um método bastante eficaz que poderia ser usado para protegê-los é a proteção catódica por corrente impressa distribuído com anodos em forma de tela. Essa técnica consiste em aplicar uma tela de anodos diretamente sobre a superfície da estrutura a ser protegida cobrindo-se a tela com uma camada de concreto projetada que pode variar de 10mm a 40mm. Os materiais empregados na fabricação do anodo em forma de tela são fios de cobre revestidos com um polímero condutor inerte.

Este método de reparo tem como principais vantagens a possibilidade de projetar sua vida útil para períodos acima de 30 anos, além de que eventuais danos na malha não afetam o desempenho do sistema. O sistema de proteção por malhas ainda é de fácil montagem e acrescenta pouco peso extra à estrutura e um dos fatores mais importantes é que este método permite uma distribuição mais uniforme da corrente de proteção

A figura 15 mostra de forma esquemática o funcionamento do sistema de proteção.

**Figura 15: Elementos do sistema de proteção catódica por corrente impressa utilizando anodos em forma de tela**



Fonte: Paulo Gomes, 1995

Como exposto o polo positivo do retificador deve ser ligado a tela de anodos enquanto que o polo negativo deve ser conectado às armaduras da estrutura a ser protegida. Este método exige dos responsáveis uma manutenção periódica, embora de fácil execução e o gasto com eletricidade ainda é pequeno se comparado aos benefícios ao se evitar o desgaste prematura destas estruturas.

## 7.2 Píer de atracação do Tambaú

O caso a seguir foi publicado na revista Concreto nº57 no ano de 2010 acerca de uma inspeção técnica feita na estrutura do píer do Tambaú após o seu desabamento na orla de João Pessoa. Os peritos constataram que a estrutura havia sido construído com cimento não recomendado para a elevada agressividade ambiental, bem como a falta de manutenção periódica que poderia ter intervindo de forma decisiva para impedir a formação das pilhas de corrosão. A seguir faremos algumas considerações sobre as patologias encontrada durante a inspeção feita.

Figura 16: Píer do Tambaú em João Pessoa



Fonte: Nereu Cavalcante, Teccon.

O píer de atracação do Tambaú (Foto16) está localizada na cidade de João Pessoa na praia do Tambaú tendo como finalidade a atracação de embarcações e o passeio de pedestres sendo construído em 1994. Segundo dados apresentados o píer é uma estrutura de concreto armado que possui 3m de largura por 100 m de comprimento na direção do mar e está sujeito a um ambiente de elevada agressividade (Quadro 6). Segundo relatos de fontes locais a estrutura ruiu após 14 anos de sua construção.

Figura 17: Deformação da estrutura remanescente do píer do Tambaú



Fonte: Nereu Cavalcante, Teccon.

No momento do desabamento não haviam pessoas sobre a estrutura e o mar estava calmo. Assim, o único carregamento era o da própria peso, ou seja, o colapso se deu devido ao avanço do processo corrosivo que comprometeu decisivamente a qualidade da estrutura. Ainda é possível observar ao longo do que sobrou da estrutura uma deformação acentuada das vigas (Figura 17).

Uma inspeção no píer constatou uma série de patologias decorrentes do avançado estado de corrosão na estrutura. Dentre as manifestações encontradas é possível verificar diversas trincas que acompanham paralelamente as armaduras de aço (Figura 18) o que indica que elas são decorrentes de processos corrosivos que provocam grande pressão interna no concreto fazendo com que ele frature. Como já exposto as trincas iniciais acabam por acelerar a velocidade de corrosão pois propiciam a entrada de mais agentes agressivos como íons cloretos e  $\text{CO}_2$  que provocam a despassivação do aço.

Nesta estrutura foram realizados dois ensaio importantes para verificar de fato quais mecanismos de corrosão agiam sobre a estrutura. O primeiro foi a utilização de indicadores de pH afim de verificar a alcalinidade ou não da massa de cobrimento pela mudança de coloração e a aspensão de nitrato de prata para verificar a contaminação por cloretos. O concreto de cobrimento foi considerado completamente carbonatado e houve a formação de flóculos brancos quando da aspensão do nitrato de prata indicando a presença de cloretos.

**Figura 18: Destacamento de massa de concreto em viga longitudinal paralela à armadura de aço**



**Fonte: Nereu Cavalcante, Teccon.**

Segundo a literatura especializada, nos casos de estruturas situados na orla marítima o ambiente de trabalho, para estruturas de concreto armado, é considerado de alta agressividade, pois a penetração de cloretos de papel fundamental no início da corrosão quebrando a película de passivação do aço da estrutura. Os produtos de corrosão neste caso

acabam gerando fissuras, e caso não sejam reparadas provocam um acúmulo de agentes causadores da corrosão na estrutura.

A contaminação por cloretos é a causa provável da formação das pilhas de corrosão neste caso, pois é possível verificar na figura 18 aspectos característicos desse tipo de mecanismo como a formação de manchas causadas pelos produtos de corrosão.

Ao longo de toda a estrutura foi constatada em diversos pontos que as armaduras tinham sido completamente dissolvidas pela corrosão restando apenas manchas avermelhadas nos seus locais como pode ser observado na figura 19.

**Figura 19: Perda de seção transversal nas armaduras de aço**



**Fonte: Nereu Cavalcante, Teccon.**

O desabamento do píer do Tambaú foi provocado pela falta de manutenção preventiva. O que sobrou da estrutura não pode ser aproveitado de forma economicamente viável pois encontra-se em estado de corrosão muito avançado e a substituição das armaduras perdidas por novas tornaria o trabalho caro e menos viável que a construção de nova estrutura, além do que a massa de concreto está completamente contaminada por agentes agressivos como os produtos oriundos da carbonatação dos constituinte da massa de cimento.

Neste caso para se agir preventivamente, nos primeiros anos ou durante a construção, seria necessário o uso de proteção catódica por corrente impressa (Figura 15) para a proteção das estruturas de forma eficiente. A corrente que seria necessário para proteger a estrutura deveria levar em consideração a área a ser protegida, a geometria da estrutura, a dificuldade de polarização e a resistividade elétrica do solo. Contudo, esses parâmetros são em diversas situações muito difíceis de serem mensurados com exatidão e servem apenas como uma indicação de medida de quanto utilizar sendo necessário, logo após o início do funcionamento do aparelho retificador, medições em diversos pontos da estrutura a fim de ajustar os valores de corrente elétrica usados para proteger a estrutura.

Ainda seria necessário o uso de pinturas específicas como tintas à base de resinas epóxi, acrílica ou epóxi à base de água que dificultariam a entrada de agentes agressivos como os cloretos comuns nesse ambiente de grande agressividade (Tabela 6).

A negligência por não utilizar métodos adequados de proteção pode não se traduzir em prejuízos imediatos, mas ao longo prazo pode representar risco de morte para quem utiliza estas estruturas e representa desperdício de recursos públicos pois diminui a vida útil destas estruturas e deixam uma imagem negativa da cidade como um todo.

## 8. PROCESSO CORROSIVO NA PONTE JOSÉ SARNEY EM SÃO LUÍS/MA

A ponte José Sarney está situada sobre a foz do rio Anil em São Luís do Maranhão de clima tropical, quente e úmido. Durante as visitas ao local foram feitas algumas observações relacionadas ao estado geral que se encontra o tabuleiro da ponte José Sarney que serve de passagem para carros e pedestre e com relação ao ambiente de serviço em que se encontra a ponte.

A norma utilizada para classificar o ambiente de trabalho ao qual a ponte está exposta foi a NBR 6118 que classifica a agressividade do ambiente da seguinte forma:

Tabela 5: Classe de agressividade ambiental

Classe de Agressividade	Agressividade	Classificação geral para o tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de Deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a,b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
IV	Muito Forte	Industrial <sup>a,c</sup>	Elevado
		Respingo de maré	

Fonte: NBR 6118

a: Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

b: Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

c: Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Seguindo essa classificação o ambiente de serviço da ponte José Sarney é de agressividade forte visto que se encontra em região litorânea de forte presença de névoa salina

que expõe a estrutura a uma contaminação constante de diversos sais ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ).

A parte da estrutura submersa da ponte está exposta ao ataque de íons cloreto, às ondas de marola e à variação de maré, característica da cidade de São Luís, contudo, não está exposta a arrebentação de ondas. O tabuleiro da ponte além de exposto a névoa salina também está exposto as águas pluviais que carregam os íons cloretos para as falhas e regiões do concreto de maior porosidade que foram comumente encontradas durante as visitas feitas.

**Figura 20: Presença de águas Pluviais no tabuleiro danificado da ponte José Sarney**



**Fonte: Thiago Barros.**

Durante todo o percurso da ponte é possível observar partes do concreto danificado como mostrado na figura 20. A presença de umidade e sais acelera consideravelmente o processo de corrosão principalmente quando ocorre a total perda da cobertura. Foi observado inclusive a perda total de material em um ponto junto a uma das cabeceiras da ponte indicando a total ausência de manutenção preventiva ou corretiva para o controle da corrosão.

Durante a vistoria da ponte pode-se constatar de forma bem clara as sintomatologias, descritas por Helene em seu trabalho sobre corrosão que seriam contaminação, fissuração, destacamento e perda de seção transversal da armadura. Ao longo de toda a ponte foi possível perceber que as partes danificadas estavam geralmente no estágio de destacamento e alguns com a total perda do cobrimento com o aço exposto a atmosfera.

Como visto anteriormente uma das principais causas da degradação do concreto em regiões litorâneas se dá através da contaminação do concreto por íons cloreto. Os cloretos tem papel fundamental no início do processo de corrosão ao destruir a passivação do aço. A corrosão da armadura tem como resultado o hidróxido de ferro que ocupa um volume maior que o aço, resultando em tensões interna que fissuram o concreto. Outro sintoma recorrente da

corrosão por contaminação de cloretos segundo Gentil é a presença de uma coloração avermelhada junto a armadura como visto na figura 23.

**Figura 21: Perda de material na cabeceira da ponte José Sarney**



**Fonte: Thiago Barros.**

Como visto anteriormente uma das principais causas da degradação do concreto se dá através da contaminação do concreto por íons cloreto. A corrosão da armadura tem como resultado o hidróxido de ferro que ocupa um volume maior que o aço, resultando numa tensão interna que fissa o concreto.

**Figura 22: Fissuração e destacamento**



**Fonte: Thiago Barros.**

O indicativo da agressividade do ambiente fornecido pela NBR 6118 e a palavra de diversos autores foi fundamental para o estabelecimento da hipótese de contaminação por cloretos, contudo o grande movimento de veículos na ponte com liberação de  $\text{CO}_2$  deve ser investigado como uma das causas de degradação por carbonatação da estrutura.

O destacamento provocado pelos produtos de corrosão foi a patologia de maior destaque constatado durante as visitas. Observou-se também nas regiões onde a armadura estava descoberta que a corrosão se processava de maneira uniforme pela barra.

**Figura 23: Corrosão de armadura exposta ao ar**



**Fonte: Thiago Barros.**

Para o caso do processo de deterioração da ponte José Sarney devem ser adotados alguns métodos de intervenção para interromper os processos corrosivos. Inicialmente devem ser retirados os pedaços da massa de cimento que estão em vias de cair da estrutura (Destacamentos). A nova massa de cimento deve-se adicionar inibidores de corrosão que agem na armadura formando películas protetoras de óxido de ferro (passivação).

Os inibidores de corrosão devem ser utilizados em concentrações específicas que podem variar de 1% a 4% da massa de cimento fresco (GENTIL, 2008). O valor das concentrações varia para cada inibidor presente no mercado e deve ser observada com cuidado, pois para valores abaixo de concentrações críticas não se forma a película protetora em toda a extensão da armadura de aço favorecendo a continuidade da corrosão. O uso de dois ou mais inibidores também é recomendado pois tem ação mais eficaz do que a soma deles usados individualmente.

Após este tratamento inicial de recuperação dos pontos danificados pelo processo de corrosão seria necessário o uso de proteção catódica por corrente impressa usando-se anodos em forma de rede (Figura 15), semelhante ao sugerido para os píeres do primeiro caso. A rede de anodos poderia ser posta ao longo de toda a passarela de pedestres onde se observou diversos buracos (Figura 21) formados pelo processo de corrosão e representa grave

risco de acidentes aos usuários da ponte José Sarney. Este método de proteção catódica também é o único que pode ser empregado de forma a parar completamente o processo de deterioração da ponte e conserva-la a longo prazo.

Por último deve-se iniciar a pintura do concreto que deve funcionar como a primeira barreira ao ataque de agentes agressivos como tintas à base de resina epóxi, poliuretana etc. O processo de pintura requer alguns procedimentos simples como retirar a nata superficial de cimento por ação mecânica, usar tintas resistentes à alcalinidade do concreto e não encapsular a estrutura a ser protegida, sempre permitindo a saída de vapor d'água quando do concreto ainda úmido. As tintas de dispersão a base de água são uma boa opção pois permitem a passagem de vapor de água evitando o empolamento da película de tinta.

Durante os meses de março e abril de 2015 foi possível observar o início da manutenção das partes danificadas pela corrosão na ponte José Sarney. Foi feita a remoção de material danificado e uma reconstrução com nova pasta de cimento. Porém o método pode ser considerado apenas um paliativo devido ao alto grau de agressividade do ambiente da ponte José Sarney.

**Quadro 6: Resumo das patologias, mecanismos e intervenções do estudo de caso da ponte José Sarney.**

Patologias	Mecanismos	Intervenções
Fissuras	Contaminação por cloretos	Proteção catódica
Armaduras expostas à atmosfera		
Manchas de oxidação	Carbonatação	Repassivação
Perda de massa de concreto		Inibidores de corrosão
Perda de seção transversal nas armaduras da passarela de pedestres	Ciclos de molhagem e secagem	Barreira física sob o concreto

Fonte: Thiago Barros Costa

## 9. CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho foram abordados os diversos mecanismos que provocam a corrosão nas estruturas de concreto armado e entre os mais comuns estão os mecanismos provocados pela contaminação da massa de cimento por íons cloretos e pela carbonatação que respectivamente destroem a passivação do aço das armaduras e reduz a alcalinidade do líquido intersticial da massa de cimento.

Sendo a degradação de tais estruturas um processo eletroquímico é importante que qualquer medida de combate a corrosão empregado aja sobre um dos elementos: catodo, anodo, eletrólito e diferença de potencial. Qualquer medida empregada que não aja sobre estes pontos torna-se apenas um paliativo e o processo invariavelmente continuará.

Conforme especificado nos manuais nacionais e internacionais o ambiente de trabalho das estruturas é de grande importância para compreender as causas das patologias que acometem as obras de arte da engenharia como, por exemplo, a ponte José Sarney em São Luís/Ma que está localizado em um ambiente de elevada agressividade ambiental e que apresenta patologias características da contaminação do concreto por íons cloreto cuja corrosão do aço provoca um aumento da pressão interna no concreto fendilhando o material.

A consequência mais notável do processo de deterioração dessas estruturas é sem dúvida, como apresentado nos casos de corrosão no decorrer do trabalho, a questão da segurança, visto que muitas das estruturas apresentadas durante o trabalho estão em ambientes de alta agressividade e patologias que representam riscos aos seus usuários como apresentados no píer do Tambaú que desabou e na ponte José Sarney que chegou a apresentar buracos abertos na passarela de pedestres antes de sua recuperação.

Dentre os técnicas de intervenção mais eficazes no combate a corrosão em estruturas de concreto armado a proteção catódica por corrente impressa se mostrou a técnica mais indicada para ser aplicada após a estrutura ter iniciado o processo corrosivo. Além dessa técnica é indicado o uso de inibidores de corrosão e proteção por barreira como tintas tanto por questões estéticas quanto como barreira à entrada de novos agentes agressivos.

## REFERÊNCIAS

- ARAUJO, Adriana; PANOSSIAN, Zehbour. **Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho: estudo de caso.** INTERCORRR, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto-Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.
- BORGES, Micheline Gonçalves. **Manifestações patológicas incidentes em reservatórios de água elevados executados em concreto armado.** Monografia, 2008. 111p. Universidade Estadual de Feira de Santana.
- CALLISTER JR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 7ª Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2011.
- CASCUDO, O. **Inspeção e Diagnóstico de Estrutura de Concreto com Problemas de Corrosão da Armadura.** In: Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações. Geraldo Isaia (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2005
- CAVALCANTE, Antonio Nereu; CAVALCANTE, Guilherme Augusto. **Inspeção técnica do píer de atracação do Tambaú.** Revista Concreto e construção. 2010. Nº57
- EDUARDO BEZERRA CABRAL, Antonio. **Avaliação da eficiência de reparos no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos.**2000. 197p. Dissertação de Mestrado-Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FERREIRA, Rui Miguel. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão.**2000. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.
- GENTIL, V. **Corrosão.** 6ª Ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, 2011.
- HELENE, Paulo **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo-SP, 1993. 231p. Tese (Livre docência). Universidade de São Paulo.
- LAPA, José Silva. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto.** Monografia, 2008. 56p. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- METHA P.K; MONTEIRO P.J.M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials: 3rd (Third) edition.** McGraw-Hill Companies. 2005
- NORMA DENIT 090/2006. **Patologias do concreto – especificação de serviço.** Espírito Santo.
- POLITO, Giulliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação.** Trabalho de conclusão de curso, 2006. 191p. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- ROBERGE, Pierre R. **Handbook of corrosion Engineer.** McGraw-Hill, 1999.
- RAMANATHAN, L.V. **Corrosão e seu Controle.** São Paulo: Hemus Editora Ltda., 1987.

RIZZON, Ana Carina. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de projeto de concretos moldados com cimento Portland branco.** Dissertação (Mestrado profissional). 2006. 133p. Universidade Luterana do Brasil.

Stephen D. Cramer and Bernard S. Covino, Jr. **Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection.** ASM Handbook. Volume 13A, 2003

OLIVEIRA, Bruna Monique Gomes de; MOURA, Paulo Rogério Garcez; DEL PINO, José Cláudio. **Corrosão em concreto: Fatores aceleradores da deterioração, prevenção e reparos.**

OLIVEIRA, Andrielli Morais de. **Avaliação de concretos com adições minerais quanto a corrosão nas armaduras induzidas por cloretos.** Dissertação (Mestrado), 2007. 276p. Universidade Federal de Goiás.