



# **Corrosão e Proteção de Estruturas em Concreto Armado: O Estado da Arte**

**Erick Gorito da Silva**

**Jéssica Christine Gonçalves de Oliveira**

## **Projeto Final de Curso**

**Orientadora**

**Prof. Simone Louise Delarue C. Brasil, D.Sc.**

**Fevereiro de 2011**

# **CORROSÃO E PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO: O ESTADO DA ARTE**

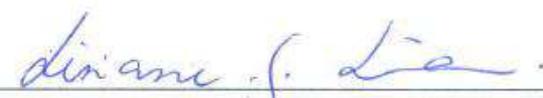
*Erick Gorito da Silva*

*Jéssica Christine Gonçalves de Oliveira*

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

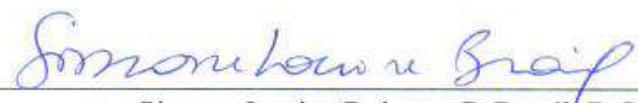
Aprovado por:

  
Ladimir José de Carvalho, D.Sc.

  
Lisiane Gonçalves Lima, M.Sc.

  
José Antonio Fontes Santiago, D.Sc.

Orientado por:

  
Simone Louise Delarue C. Brasil, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2011

## **Ficha Catalográfica**

Oliveira, Jéssica Christine Gonçalves e Silva, Erick Gorito.

Corrosão e Proteção de estruturas em concreto armado: o estado da arte / Jéssica Christine Gonçalves de Oliveira e Erick Gorito da Silva. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2011, vi , 55.

(Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011. Orientadora: Simone Louise Delarue C. Brasil

1. Corrosão 2. Concreto Armado 3. Proteção contra corrosão 4. Projeto Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ) 5. Simone Louise Delarue C. Brasil I. Corrosão e Proteção em estruturas de concreto armado: o estado da arte.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus pelas oportunidades que nos foram dadas na vida, principalmente por termos conhecido pessoas e lugares interessantes, mas também por termos vivido fases difíceis, que foram matérias-primas de aprendizado.

Agradecemos à professora, que com sua orientação pudemos organizar pensamentos e tornar nosso crescimento pessoal e acadêmico mais próximo; à nossa família que sempre nos apoiou em momentos difíceis nos ajudando a encontrar o caminho certo e aos amigos que sempre estiveram conosco durante nossa caminhada.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## **CORROSÃO E PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO: O ESTADO DA ARTE**

Erick Gorito da Silva

Jéssica Christine Gonçalves de Oliveira

Fevereiro, 2011

Orientadora: Prof. Simone Louise Delarue C. Brasil, Dsc.

Estruturas em concreto armado são amplamente utilizadas em construções que necessitam de alta resistência mecânica, durabilidade e estabilidade. Estas construções estão constantemente expostas a intempéries, o que provoca a deterioração do concreto, a corrosão da armadura e a conseqüente redução da eficiência de suas funções. Diante de diversas estruturas importantes feitas em concreto armado, como o viaduto do Joá no Rio de Janeiro, o Museu de Arte Contemporânea em Niterói e os Edifícios do Congresso Nacional em Brasília, percebe-se a grande necessidade de haver técnicas eficientes que as protejam dos ambientes corrosivos, já que são construções que fazem parte do cotidiano da população. As estruturas em concreto armado precisam ser constantemente monitoradas para que técnicas adequadas contra a corrosão sejam aplicadas e mantenham a qualidade das funções do concreto armado. Neste trabalho são apresentadas as principais técnicas de proteção destas estruturas e também os custos relativos à aplicação de algumas destas técnicas. Um estudo sobre o sistema de proteção utilizado no monumento ao Cristo Redentor é apresentado de forma detalhada mostrando o quanto é eficaz aplicar estas técnicas de proteção para aumentar a vida útil da estrutura mantendo suas principais funções de estabilidade e durabilidade.

# ÍNDICE

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>2</b>
2.1. Histórico .....	2
2.2. O Concreto Armado.....	3
2.3. Corrosão .....	6
2.4. Corrosão da Armadura de Concreto .....	10
2.4.1. Carbonatação .....	12
2.4.2. Íons Cloreto .....	15
2.4. Monitoramento da Corrosão.....	17
<b>3. Estudo Tecnológico de Proteção das Armaduras.....</b>	<b>21</b>
3.1. Técnicas Eletroquímicas .....	23
3.1.1. Realcalinização .....	23
3.1.2. Extração de cloreto.....	23
3.1.3. Proteção Catódica .....	24
3.2. Revestimentos.....	28
3.2.1. Metálicos .....	29
3.2.2. Não Metálicos .....	30
3.3. Armaduras Especiais .....	31
3.3.1. Aço Inoxidável.....	32
3.3.2. Fibras Plásticas.....	33
3.4. Inibidores .....	34
3.4.1. Inibidores Anódicos.....	35
3.4.2. Inibidores Catódicos.....	37
3.4.3. Inibidores Mistos .....	38
3.5. Reposição de Argamassa .....	39
<b>4. Estudo Mercadológico das Técnicas de Proteção.....</b>	<b>40</b>
4.1. Proteção por galvanização .....	40
4.2. Proteção Catódica .....	41
4.2.1. Galvânica.....	41
4.2.2. Por corrente impressa.....	43

4.3. Proteção através do uso de tintas anti-corrosivas .....	44
5. Estudo de Caso - O Cristo Redentor .....	45
5.1. Histórico do Cristo Redentor .....	45
5.2. A Proteção do Cristo Redentor .....	47
5.3. Manutenção do Cristo Redentor .....	51
6. Conclusão .....	51
7. Referências Bibliográficas .....	53

# 1. Introdução

O concreto é um material de construção composto por areia, pedra, cimento e água. Quando contém estruturas de metal em seu interior passa a ser chamado de concreto armado, tornando-se um material bastante resistente e de grande utilidade. Tem-se ainda, o concreto protendido, que tem a armadura sob tensão no interior do concreto deixando a estrutura mais resistente à tração.

As duas principais características do concreto são a estabilidade e a durabilidade sendo, por isso, empregado em diversos tipos de construção, que vão desde casas, prédios e pontes a estátuas e monumentos. Sua descoberta no século XIX conduziu a um constante crescimento na construção civil, dando um novo cenário às cidades que surgiam.

Com a crescente utilização do concreto armado, começaram a surgir preocupações com problemas de corrosão nestas estruturas, principalmente as que ficavam muito expostas a intempéries, as que sofriam algum tipo de esforço mecânico e estruturas em contato com substâncias químicas. A corrosão no concreto armado passou então a ser intensamente estudada, e mostrou que o material utilizado e a forma de preparo do concreto são essenciais para se obter uma estrutura resistente e com grande durabilidade.

Normalmente o próprio concreto apresenta condições de proteção ao aço contra a corrosão devido à formação de um filme passivante. Entretanto, esta condição é perdida à medida que o concreto é atacado por substâncias agressivas existentes no meio ambiente. As principais são o contato com o  $\text{CO}_2$ , que causa a carbonatação do concreto e conseqüentemente queda do seu pH e degradação do filme passivante, e os cloretos, que aumentam a condutividade do concreto e também atacam a camada passivante.

Fatores que influenciam bastante na taxa de corrosão da armadura são o pH, a aeração, a temperatura e os sais que estão dissolvidos no concreto. O monitoramento desses parâmetros, em conjunto com as técnicas adequadas de proteção, permite que o concreto armado apresente uma vida útil muito maior.

Diversas técnicas de proteção podem ser empregadas no concreto armado para prolongar sua estabilidade e durabilidade. Técnicas que utilizam inibidores de corrosão no concreto, armaduras especiais de aço inoxidável ou aço galvanizado, extração de cloretos,

bem como técnicas eletroquímicas como a proteção catódica, podem ser utilizadas com bastante eficiência.

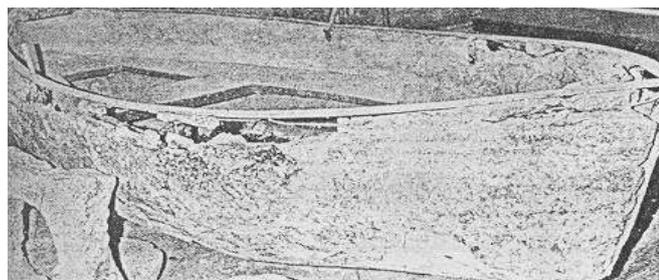
Muitas empresas, diante da utilização cada vez maior do concreto armado, têm se especializado nestas tecnologias oferecendo soluções cada vez mais eficientes para diversos problemas. Um estudo de mercado das principais técnicas utilizadas é apresentado neste trabalho mostrando comparações entre custos e tecnologias, ressaltando o quanto que o emprego destas técnicas pode ser mais rentável do que os gastos com a restauração de uma estrutura já danificada.

O uso de proteção contra a corrosão de estruturas de concreto armado vem crescendo cada vez mais. Exemplos importantes e bastante conhecidos são o Museu de Arte Contemporânea em Niterói, a Ópera de Sidney, os edifícios do Congresso Nacional em Brasília e o monumento ao Cristo Redentor no Rio de Janeiro. Um estudo mais detalhado foi feito sobre a técnica de proteção utilizada no Cristo Redentor, mostrando o quanto foi essencial a sua implantação para manter um monumento tão importante em perfeito estado.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Histórico

A primeira publicação oficial sobre o concreto armado (na época denominado cimento armado) foi do francês Joseph Louis Lambot em 1850, sobre os estudos feitos para a construção de um barco de concreto. A finalidade era construir uma canoa mais durável do que a feita de madeira, com necessidade de pouca manutenção e com boa resistência em meios aquáticos. A **Figura 1** mostra como ficou deteriorada a canoa feita em concreto na época.



**Figura 1:** Remanescente de uma das canoas de Lambot. (KAEFER, 1998)

Embora esta tenha sido a primeira publicação oficial, o concreto já era bastante utilizado em construções de diversos países no mundo. KAEFER (1998) mostra que, no Iraque, escavações arqueológicas revelaram vestígios de uma construção de aproximadamente 4000 a.C. executada parcialmente em concreto; em Israel, depósitos naturais de compósitos de cimento formados a partir da reação entre calcário e argila xistosa durante combustão espontânea foram caracterizados por geólogos israelenses na década de 70; no século IV a.C o concreto foi utilizado na construção dos muros de uma cidade romana, e no século II a.C. este material começou a ser usado em edificações em Roma, como na construção do Pantheon de Roma (**Figura 2**).



**Figura 2** : Interior do Pantheon de Roma (KAEFER 1998)

O concreto, ao longo dos séculos, tem se tornado assunto de inúmeras pesquisas. Sua diversificada aplicação faz de sua durabilidade, estabilidade e funcionalidade itens importantes na busca de melhorias tecnológicas.

## **2.2. O Concreto Armado**

O concreto é constituído basicamente de cimento, areia, agregados de diferentes tamanhos e água. Podem-se inserir outros componentes, os aditivos, para conferir impermeabilidade à massa, diminuição do calor de hidratação, aumento da durabilidade,

maior plasticidade quando fresco, rápido aumento da resistência quando endurecido, dentre outras coisas.

A qualidade dos concretos depende primeiramente da qualidade dos materiais, da proporção dos componentes utilizados e principalmente da relação água/cimento. Quando utilizado, o concreto deve ser adensado corretamente na fôrma para que não haja "vazios" em seu volume. Tanto a destruição do concreto como a corrosão das armaduras dependem desta estrutura de poros, pois a resistência do concreto às influências químicas e físicas é reduzida consideravelmente quando aumenta a quantidade desses vazios.

Dentre os vários tipos de cimento utilizados no Brasil, o mais comum é o cimento Portland. O cimento Portland é um material pulverulento constituído de silicatos e aluminatos de cálcio que ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa. Ele resulta da moagem de um produto denominado clínquer (mistura homogênea de calcário com argila em fase líquida que posteriormente é queimada). (PETRUCCI,1982)

Os componentes principais do cimento, em percentagem em peso, são:

- ✓  $\text{CaO} \rightarrow 61 \text{ a } 67$
- ✓  $\text{SiO}_2 \rightarrow 20 \text{ a } 23$
- ✓  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2 \text{ a } 3,5$
- ✓  $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 4,7 \text{ a } 7$
- ✓  $\text{MgO} \rightarrow 0,8 \text{ a } 6$
- ✓  $\text{SO}_3 \rightarrow 1 \text{ a } 2,3$
- ✓ álcalis  $\rightarrow 0,3 \text{ a } 1,5$

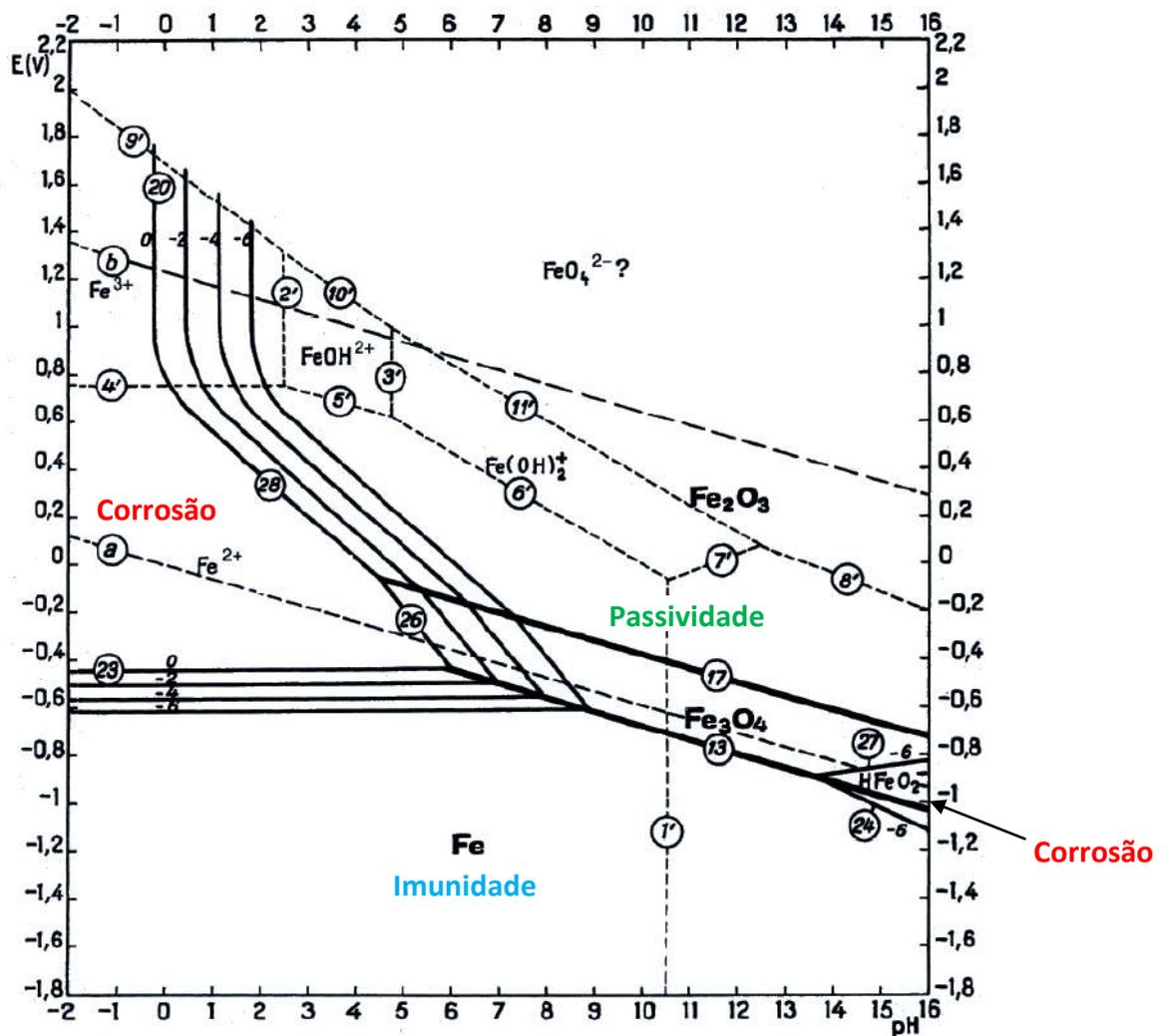
Juntos, estes componentes formam os silicatos e aluminatos de cálcio:

- ✓ silicato tricálcico  $\rightarrow 3\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ )
- ✓ silicato dicálcico  $\rightarrow 2\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ )
- ✓ aluminato tricálcico  $\rightarrow 3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ )
- ✓ ferro aluminato tetracálcico  $\rightarrow 4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

Na presença de água, os silicatos e aluminatos hidratam-se formando aluminatos de cálcio hidratados, que são responsáveis pelo endurecimento da massa; silicatos de cálcio

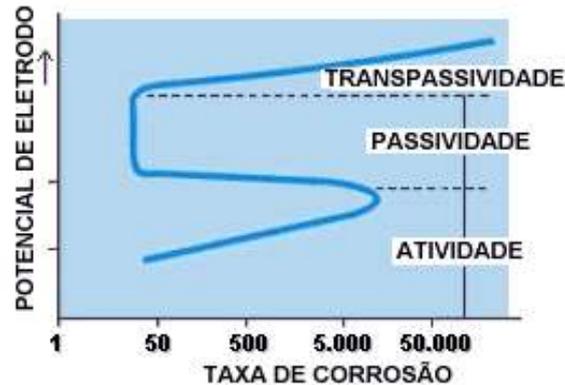
hidratados, que proporcionam resistência ao concreto e hidróxido de cálcio, que confere alcalinidade ao concreto.

Como o concreto armado é formado por uma estrutura de aço coberta por concreto; o alto valor do pH da massa de concreto (entre 12,5 e 13,5) favorece a formação de uma camada de óxido de ferro passivante aderente à superfície da armadura. Através de um diagrama que relaciona o potencial eletroquímico com o pH do meio, também denominado Diagrama de Pourbaix, pode-se avaliar as espécies termodinamicamente favoráveis em uma determinada condição. No diagrama do sistema Fe-H<sub>2</sub>O, apresentado na **Figura 3**, pode-se verificar que no caso do concreto, cujo pH se situa entre 12,5 e 13,5, o ferro ou está na faixa de imunidade (como Fe<sub>(s)</sub>) ou na faixa de passivação (como Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), o que promoveria a proteção da armadura.



**Figura 3:** Diagrama de Pourbaix para o ferro: equilíbrio potencial-pH para o sistema Fe-H<sub>2</sub>O a 25°C (GENTIL, 2007)

Quando um metal é inserido em um meio corrosivo, com tendência à formação de uma camada de passivação, a taxa de corrosão aumenta até que o filme passivo comece a se formar, neste ponto a área ativa do metal começa a diminuir, reduzindo assim a taxa de corrosão. Quando o filme passivo está formado a taxa de corrosão permanece baixa e constante com o aumento do potencial, até que esta película é rompida por alguma alteração nas condições ambientais e a taxa de corrosão volta a aumentar, vide **Figura 4**.



**Figura 4** - Gráfico de Potencial x Taxa de corrosão (IOPE)

### 2.3. Corrosão

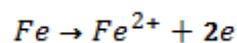
Para HELENE (1986), corrosão é uma interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica.

GENTIL (2007) define a corrosão como o inverso do processo metalúrgico, onde o produto da corrosão de um metal 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 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), isto é, o metal tendendo a retornar a sua condição de estabilidade. Essa situação não é sempre verdadeira, como observa-se em alguns casos de corrosão como, por exemplo, corrosão associada a fatores mecânicos.

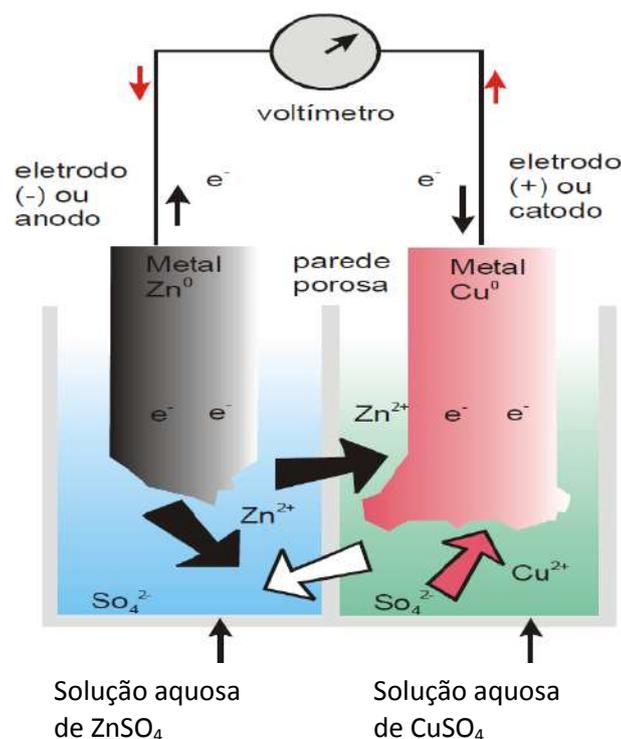
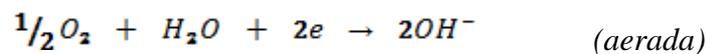
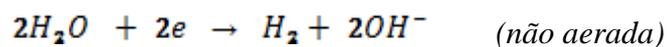
Ainda segundo GENTIL, a corrosão química é conhecida por corrosão seca causada por uma reação gás-metal que forma uma película de óxido. É um processo lento e não provoca deterioração substancial das superfícies metálicas resultando numa corrosão homogênea sem geração de corrente elétrica.

A corrosão eletroquímica é resultado da formação de uma pilha eletroquímica, ilustrada na **Figura 5**, sendo necessária a presença de uma região anódica, uma região catódica, um eletrólito e um circuito metálico. É pelo circuito metálico que os elétrons migram da região anódica para a região catódica, devido à diferença de potencial existente entre elas. Para fechar o circuito, o eletrólito funciona como meio por onde os íons migrarão do anodo para o catodo.

A região anódica é a que tem menor potencial de redução e é nela que ocorre a oxidação do metal. Em uma estrutura de aço exposta a ambiente corrosivo, por exemplo, a reação de oxidação que ocorre é a seguinte:



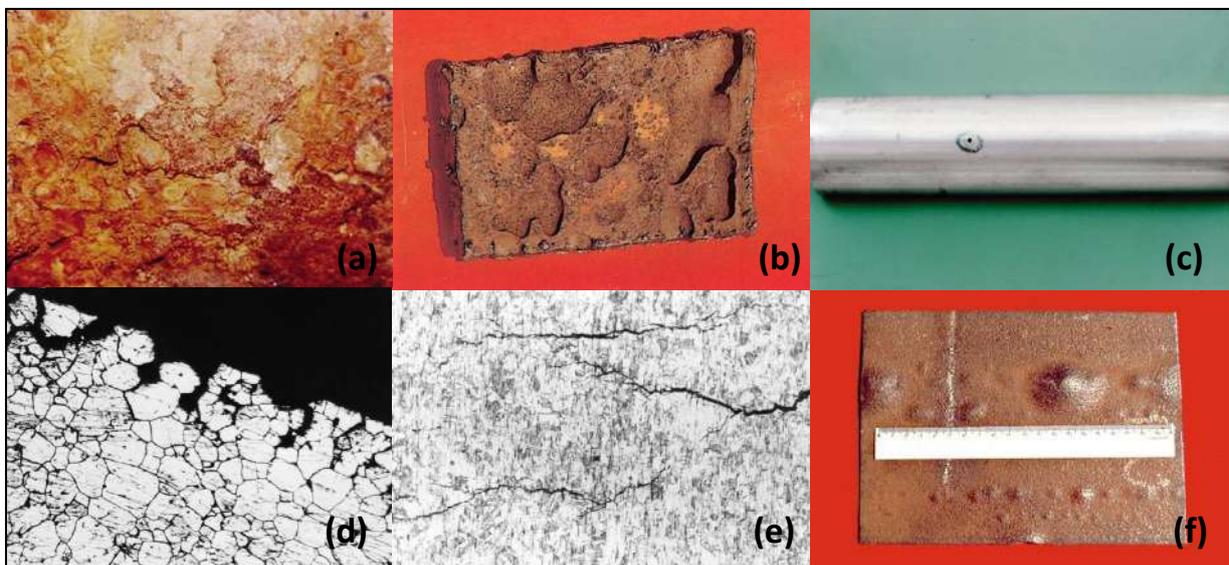
A região catódica recebe os elétrons vindos do anodo ocasionando a reação de redução. Como exemplos de reações de redução que ocorrem nas áreas catódicas em meios aquosos, podem-se citar as reações abaixo, na presença e ausência de oxigênio.



**Figura 5:** Pilha eletroquímica com corrosão do zinco e deposição no cobre (FELTRE, 1993)

A corrosão eletroquímica pode ter as seguintes morfologias, que podem ser vistas na **Figura 6** (GENTIL, 2007):

- *Corrosão uniforme*: corrosão em toda a extensão da superfície quando fica exposta ao meio agressivo;
- *Corrosão por placas*: corrosão com escavações localizando-se em regiões e não em toda extensão da superfície metálica;
- *Corrosão puntiforme ou por pite*: corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas com a profundidade maior que o diâmetro;
- *Corrosão intergranular*: é um tipo de corrosão localizada processando-se entre os grãos dos cristais do metal que, quando sofrem esforços mecânicos, podem fissurar ou fraturar perdendo a estabilidade;
- *Corrosão transgranular*: é um tipo de corrosão localizada que se processa nos grãos da rede cristalina do metal, podendo levar à fratura da estrutura, quando houver esforços mecânicos; e
- *Empolamento pelo hidrogênio*: corrosão originada pela difusão do hidrogênio atômico no material metálico formando  $H_2$ , exercendo pressão e originando as bolhas.



**Figura 6:** Morfologias da corrosão: (a) corrosão uniforme; (b) corrosão por placas; (c) corrosão puntiforme; (d) corrosão intergranular; (e) corrosão transgranular; (f) empolamento pelo hidrogênio (GENTIL 2007)

Os fatores que favorecem o surgimento de ataque localizado são:

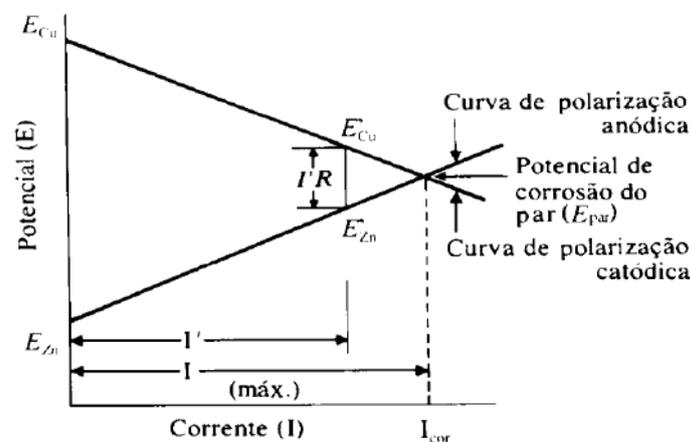
- ✓ A relação entre a área catódica e anódica que define a densidade de corrente de corrosão, tendo em vista este parâmetro ser relacionado à área onde ocorrem as reações;

- ✓ A aeração diferencial, porque a diferença de concentração de oxigênio origina uma diferença de potencial no próprio metal, tornando a região mais aerada o catodo e a menos aerada o anodo;
- ✓ A variação de pH, porque o aumento da concentração de íons  $H^+$  acelera a oxidação do metal, aumentando a migração de íons como o cloreto e o sulfato para a região com pH mais baixo que vão oxidar o metal formando um sal, e depois hidrolisam novamente mantendo o pH sempre baixo; e
- ✓ Produtos de corrosão presentes na superfície metálica distribuídos de forma heterogênea.

Heterogeneidades do metal ou do meio também podem ocasionar ataques localizados. As variações no material podem ser oriundas da composição, impurezas, tratamento térmico ou mecânico, depósitos, galvanização e descontinuidade de películas protetoras. E as variações do meio podem ser oriundas de composição química, diferenças de concentração, temperatura e pH. Essas heterogeneidades resultam na formação de áreas anódicas e catódicas favorecendo a corrosão.

Um eletrodo, quando está em equilíbrio com seus próprios íons em uma solução, possui um potencial diferente daquele quando ocorre passagem de corrente, esta diferença é chamada de sobrepotencial. O catodo e o anodo possuem sobrepotencial quando estão imersos na mesma solução por haver uma circulação de corrente que provoca a variação do potencial de corrosão, esse fenômeno é conhecido como polarização, e está ilustrado na

**Figura 7.**



**Figura 7:** Variação do Potencial em função da corrente circulante: Polarização (GENTIL,2007)

Os fatores que podem influenciar a velocidade da corrosão são:

*Efeito do oxigênio dissolvido* – Para que a água pura, em temperatura ambiente, ataque o ferro é preciso que haja oxigênio dissolvido. A corrosão no início é rápida e tende a diminuir com a formação da camada de óxido. Esta camada funciona como barreira à difusão do oxigênio. Quando não existe oxigênio, a corrosão do aço nestas circunstâncias (somente em água pura) é desprezível. O aumento de velocidade se deve ao fato do oxigênio consumir os elétrons gerados na reação ( $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}^-$ ). Neste caso, o oxigênio sofre redução.

*Efeito do pH* – Com o pH entre 4 e 10 a taxa de corrosão independe do pH e depende da rapidez com que o oxigênio difunde para a superfície do metal. Em região ácida, ou seja  $\text{pH} < 4$ , a velocidade de corrosão é incrementada pela possibilidade de redução do  $\text{H}^+$  além do  $\text{O}_2$  presente no meio. O controle da velocidade não se deve à difusão do  $\text{O}_2$  e sim à facilidade de desprendimento do hidrogênio. Em região básica, ou seja,  $\text{pH} > 10$ , a velocidade de corrosão diminui, porque o ferro se passiva na presença de álcalis e oxigênio dissolvido. Com o  $\text{pH} > 10$  o potencial do ferro sobe de  $-0,4\text{ V}$  para  $+0,1\text{ V}$ , ou seja, muito mais nobre.

*Efeito da temperatura* – de maneira geral o aumento de temperatura acelera a corrosão porque diminui a polarização, aumenta a condutividade do eletrólito e a velocidade de difusão de íons. Entretanto pode retardar a corrosão, pois diminui a solubilidade do oxigênio na água.

*Efeito dos sais dissolvidos* – Os sais podem acelerar a reação porque são despolarizantes, aumentam a condutividade. Entretanto podem também retardar porque precipitam produtos de corrosão coloidais, diminuem a solubilidade do oxigênio e tem ação passivadora.

## **2.4. Corrosão da Armadura de Concreto**

Segundo GENTIL (2007), a corrosão e a deterioração observadas em concreto podem estar associadas a fatores mecânicos, físicos, biológicos ou químicos.

Exemplos de fatores mecânicos são as vibrações, que podem ocasionar fissuras no concreto, e o movimento de líquidos com partículas suspensas, que causam a erosão do concreto, expondo a armadura ao meio corrosivo.

Um fator físico importante que ocasiona microfissuras no concreto é a intensa variação de temperatura, já que os componentes do concreto têm características térmicas diferentes.

Os microorganismos, representando os fatores biológicos, podem criar meios corrosivos na massa do concreto devido à oxidação de substâncias, como o enxofre e o sulfeto, a ácidos.

Os fatores químicos associados à corrosão devem-se a presença de ácidos, no concreto ou na armadura, provenientes do ambiente em que a estrutura se encontra.

De acordo com HELENE (1986), os danos por corrosão podem afetar a capacidade estrutural dos componentes estruturais, devido fundamentalmente à diminuição da seção transversal das armaduras, à perda de aderência entre o aço e o concreto e à fissuração deste.

Como o mecanismo da corrosão do concreto é de natureza eletroquímica, ou seja, formação de pilhas eletroquímicas no interior do concreto, é necessário o conhecimento dos mecanismos atuantes no processo. As variáveis mais importantes, segundo GENTIL (2007) são:

- Meio corrosivo – composição química, concentração, impurezas, pH, temperatura e sólidos em suspensão;
- Material – composição química, impurezas e processo de obtenção;
- Condições operacionais – solicitações mecânicas, movimento relativo com o meio, condições de imersão.

Na descrição de CASCUDO (2005) sobre o processo de corrosão da armadura do concreto, a reação anódica produz íons de ferro e elétrons, e o processo catódico aproveita esses elétrons na reação de redução de oxigênio, tendo-se como produto a hidroxila. Como é um processo eletroquímico, há a formação de corrente elétrica que se conduz pela armadura no sentido anodo-catodo, fechando o circuito no sentido contrário de forma iônica pelo

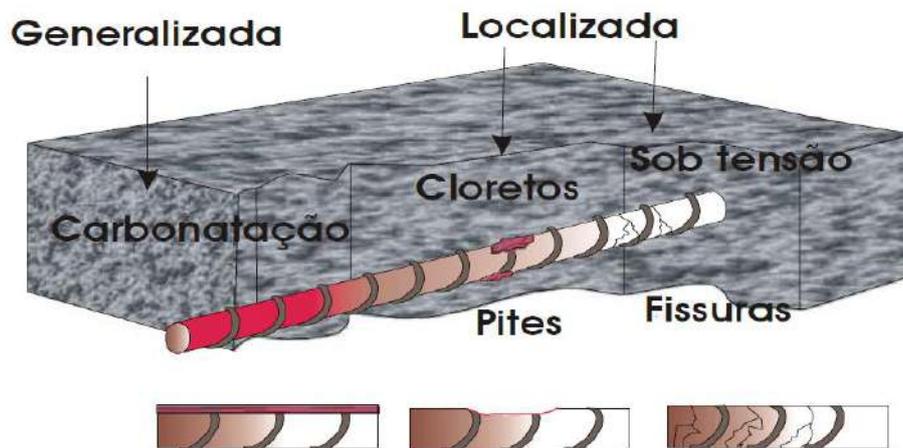
eletrólito. As reações químicas entre os produtos das reações eletroquímicas (íons ferro e hidroxilas) geram produtos de corrosão (óxidos e hidróxidos de ferro), de natureza expansiva.

CASCUDO (1997) afirma que o filme passivante é a grande defesa do aço no interior do concreto e a garantia de que não será corroído. Entretanto, ele pode ser destruído por duas condições básicas:

✓ *Diminuição da alcalinidade do concreto*; pode ser devido às reações de carbonatação ou por penetração de substâncias ácidas no concreto. Em casos especiais pode ser oriunda da lixiviação do concreto, em que a solução alcalina intersticial é lavada pelo ataque das águas.

✓ *Presença de íons de cloreto em quantidade suficiente*; podendo ser tanto de fonte externa e atingir a armadura por difusão, quanto estar contido no concreto devido à água ou agregados contaminados, ou mesmo por aditivos aceleradores de pega a base de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ).

Na **Figura 8** podem ser observados os tipos de deterioração do filme passivante.



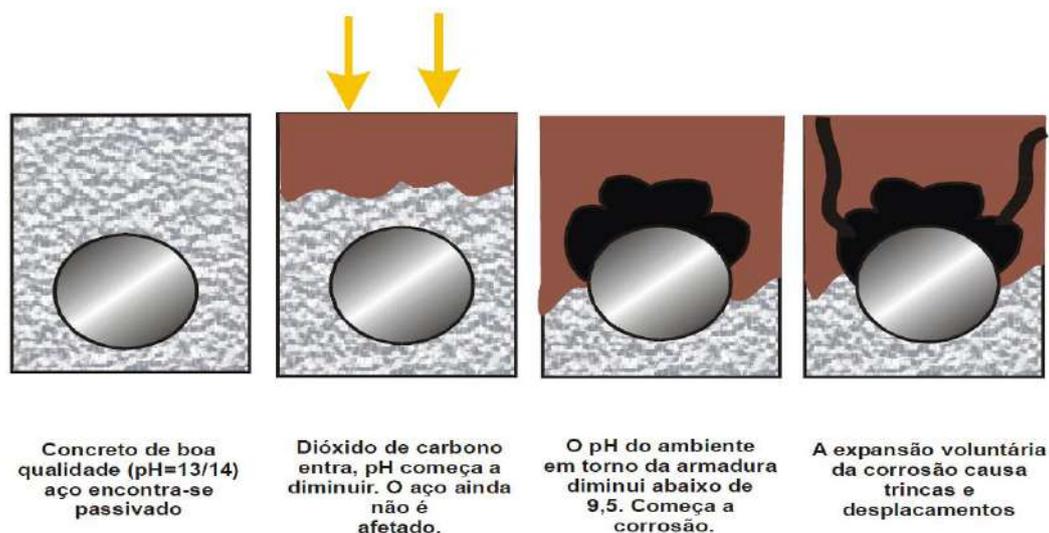
**Figura 8:** Tipos de corrosão da armadura e fatores que as provocam (CASCUDO 1997)

### 2.4.1. Carbonatação

Os constituintes presentes na atmosfera que podem causar a redução do pH são o  $\text{CO}_2$  (gás carbônico), o  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre), e o  $\text{H}_2\text{S}$  (gás sulfídrico), sendo que o principal é o primeiro, daí o nome de carbonatação.

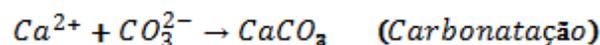
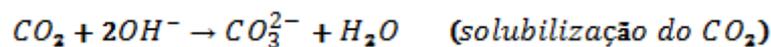
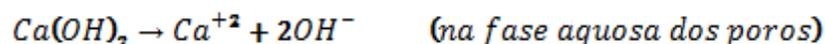
FIGUEIREDO (2005) define a carbonatação como “um processo físico-químico de neutralização da fase líquida intersticial do concreto, saturada de hidróxido de cálcio e de outros compostos alcalinos hidratados”

A carbonatação ocorre quando o  $\text{CO}_2$ , do ar ou em águas agressivas, se combina com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , formando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) insolúvel. Este processo faz cair o pH do concreto de 12,5 - 13,5 para 8,5 - 9,0, que é o pH que precipita o  $\text{CaCO}_3$  despassivando o aço, como pode ser visto na **Figura 9**.



**Figura 9:** Frente de carbonatação (RODRIGUES, 1998)

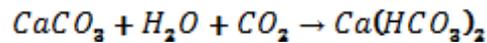
Como o concreto é um material poroso, o  $\text{CO}_2$  presente no ambiente penetra, com certa facilidade, através de seus poros até o seu interior. Com isso acontece a reação do  $\text{CO}_2$  com o hidróxido de cálcio presente no concreto, provocando a carbonatação. FIGUEIREDO (2005) apresenta as seguintes equações para o fenômeno:



GENTIL (2007) explica porque ocorre uma maior deterioração do concreto em águas agressivas. O excesso de  $\text{CO}_2$  presente nestas águas agressivas induz a ocorrência de outra reação que tem como produto final o bicarbonato de cálcio,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Por ser muito mais

solúvel que o carbonato de cálcio,  $\text{CaCO}_3$ , o bicarbonato de cálcio deteriora o concreto mais rapidamente. ( Solubilidade do  $\text{CaCO}_3$ : 13 mg/l e solubilidade do  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ : 1.890 mg/l)

A reação de formação do bicarbonato de cálcio segue abaixo:



A velocidade e a profundidade de carbonatação do concreto dependem de fatores relacionados à qualidade do concreto endurecido e do meio ambiente, como podem ser observados na **Tabela 1**.

**Tabela 1** - Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação (FIGUEIREDO 2005)

	Fatores Condicionantes	Características influenciadas
<b>Condições de exposição</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentração de <math>\text{CO}_2</math></li> <li>- Umidade relativa do ar</li> <li>- Temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidade de carbonatação</li> <li>- Grau de saturação dos poros</li> </ul>
<b>Características do concreto</b>	Composição química do concreto: <ul style="list-style-type: none"> <li>- características do clínquer</li> <li>- Teor de aditivos</li> <li>- Relação água/cimento</li> </ul> Qualidade de execução Defeitos Cuidados com a cura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porosidade da pasta carbonatada</li> <li>- Reserva alcalina</li> <li>- Porosidade</li> <li>- Grau de hidratação</li> </ul>

A carbonatação tem também uma característica benéfica para a durabilidade do concreto. Quando o carbonato de cálcio, insolúvel, deposita-se nos poros, ele veda o concreto reduzindo (não impedindo) a penetração do  $\text{CO}_2$  e o aumento da umidade em seu interior.

Um exemplo de carbonatação bastante comum é a eflorescência, caracterizada por depósitos de cor branca na superfície do concreto. O processo ocorre quando a água, contendo pequenas concentrações de sais de cálcio e magnésio, solubiliza o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente no concreto ocasionando sua deterioração. O hidróxido de cálcio lixiviado reage com o  $\text{CO}_2$  e forma o carbonato de cálcio insolúvel. Algumas vezes, esse depósito aparece sob a forma de estalactites (**Figura 10**). Quando o processo de lixiviação é acentuado, o concreto vai se tornando poroso, tendo maiores espessuras de carbonato de cálcio.



**Figura 10:** Lixiviação com formação de estalactites (GENTIL, 2007)

### 2.4.2. Íons Cloreto

É consenso entre todos os autores pesquisados que a corrosão das armaduras provocada pela ação dos íons cloreto é um dos problemas mais sérios que pode afetar a durabilidade das estruturas de concreto armado. Os íons cloreto podem penetrar no interior do concreto de diversas formas:

- Emprego de aceleradores de pega que contém  $\text{CaCl}_2$ ;
- Contaminação dos materiais constituintes do concreto (água e agregados);
- Contaminação através da névoa salina (maresia);e
- Contato direto com a água do mar.

O efeito dos íons cloreto na corrosão deve-se ao fato deste ser um eletrólito forte, o que vai diminuir a resistividade do concreto possibilitando a formação de uma pilha eletroquímica, reduzindo a ação protetora da película de passivação existente no meio alcalino.

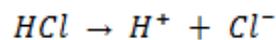
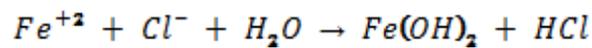
Segundo FIGUEIREDO (2005), os íons podem ser encontrados no interior do concreto em três diferentes formas:

- Quimicamente combinados (cloroaluminatos);
- Livres na solução dos poros do concreto;
- Fisicamente absorvidos na superfície dos poros capilares.

O processo corrosivo é minimizado pela formação de cloroaluminatos, que provêm da reação entre o cloreto e os aluminatos do concreto. Estes compostos insolúveis baixam o teor

dos cloretos solúveis a valores não-agressivos. Por isso, os cimentos com maior teor de aluminatos são indicados para resistirem a cloretos.

Os íons cloreto dissolvidos na solução dos poros são os maiores responsáveis pela corrosão por pite, pois reagem com a água formando o ácido clorídrico, que causa a destruição localizada do filme de passivação que recobre as armaduras. O processo ocorre de acordo com as seguintes reações:



CASCUDO (1997) chama a atenção para a importância dos mecanismos que transportam os íons cloreto para o interior do concreto. São eles: absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade sob pressão e migração iônica.

A absorção de soluções ricas em íons geralmente representa o primeiro passo para a contaminação do concreto. Este fato é causado por tensões capilares imediatamente após o contato do líquido com a superfície do concreto. Em princípio, quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maior a pressão e a profundidade de penetração da água no concreto. Consequentemente, quanto maior o diâmetro dos poros capilares, menor a profundidade do concreto atingida pela água absorvida.

A difusão iônica é o meio predominante do movimento dos cloretos no interior do concreto. A difusividade iônica acontece devido a gradientes de concentração iônica. Esta diferença motiva o movimento dos íons em busca de equilíbrio. Este fenômeno ocorre somente com a interconexão dos capilares e com a existência de eletrólito.

A permeabilidade é um dos principais indicadores da qualidade do concreto, e é descrita como a facilidade com que uma substância o atravessa. A permeabilidade será tão maior quanto maior for o diâmetro dos capilares e sua intercomunicação, ela está diretamente relacionada com a composição do concreto e com as condições de cura especificadas para a estrutura. Quanto menor for a relação água/cimento, menos permeável será o concreto; e quanto mais tempo houver para a hidratação dos compostos do concreto, menor será a permeabilidade do mesmo.

A migração iônica no concreto se dá pelo campo gerado pela corrente elétrica do processo eletroquímico. A movimentação dos íons entre duas partes da estrutura ocorre quando existe uma mínima diferença de potencial causada por pequenas e eventuais cargas elétricas (correntes de fuga), e também por campos elétricos externos. Ela é medida através da resistividade elétrica do concreto, pois é a única condição para o concreto conduzir eletricidade.

De acordo com o relatório do ACI (2001), existem três teorias modernas que explicam os efeitos dos íons cloreto na corrosão do aço:

- *Teoria da Adsorção:* Segundo esta teoria os íons 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;
- *Teoria do filme de óxido:* Segundo esta teoria os íons cloreto penetram no filme do óxido passivante, através de poros ou defeitos, mais facilmente do que outros íons. Os cloretos podem dispersar-se coloidalmente no filme, facilitando assim sua penetração;
- *Teoria de Complexo Transitório:* os íons cloreto competem com os íons hidroxila para a produção de íons ferrosos. Forma-se então, um complexo solúvel de cloreto de ferro. Este pode difundir-se a partir de áreas anódicas, destruindo a camada protetora de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  e permitindo a continuação do processo corrosivo. A certa distância do eletrodo o complexo é rompido, precipitando o hidróxido de ferro deixando o íon cloreto livre para realimentar o processo. Uma vez que a corrosão não é estancada, mais íons de ferro continuam a migrar dentro do concreto a partir do ponto de corrosão, e reagem também com o oxigênio para formar óxidos que ocupam um volume quatro vezes maior, causando tensões internas e fissuras no concreto.

## **2.4 Monitoramento da Corrosão**

Para GENTIL (2007), o monitoramento da corrosão pode ser definido como uma forma sistemática de medição da corrosão ou da degradação de um determinado componente de um equipamento, com o objetivo de auxiliar a compreensão do processo corrosivo e/ou obter informações úteis para o controle da corrosão e das suas conseqüências.

Os métodos de monitoramento podem ser classificados em:

- *Métodos não destrutivos* – são indispensáveis para indicar a presença de fissuras, trincas, reduções de espessura de parede, defeitos internos, vazamentos e porosidades. São utilizados equipamentos de ultrassom, emissão acústica, radiografia, líquido penetrante, inspeção visual, etc;
- *Métodos analíticos* - são extremamente úteis para os casos de corrosão controlada por parâmetros de meio, como a corrosão em águas ácidas, em que o pH, a qualidade da água e a concentração de ânions livres controlam o processo corrosivo; e
- *Métodos de engenharia de corrosão* – abrangem os não-eletroquímicos; que são os cupons de corrosão, a resistência elétrica e os provadores de hidrogênio, e os eletroquímicos, ou seja, a resistência a polarização, potencial de corrosão, amperimetria de resistência nula, impedância eletroquímica e ruído eletroquímico. Permitem a caracterização do estado eletroquímico do material (ativo ou passivo), a velocidade de corrosão e a detecção de alterações sensíveis na cinética do processo corrosivo.

ANDRADE PERDRIX (1992) descreve as informações básicas necessárias à elaboração de um parecer sobre as causas que são responsáveis por um problema de corrosão em armaduras, tanto no que diz respeito à fase de iniciação quanto à fase de propagação da corrosão, a saber: resistência mecânica do concreto, espessura de revestimento do concreto e características da armadura, porosidade e massa específica do concreto, teor de cloretos, teor de sulfatos, espessura de carbonatação, teor de umidade do concreto, resistividade elétrica do concreto e potencial de corrosão eletroquímica.

É importante ressaltar que para fazer estas determinações é necessário assegurar-se de que as amostras sobre as quais são realizados os ensaios representem o mais corretamente possível a composição, principalmente de sais solúveis existentes no trecho da estrutura em exame. Como indicação geral, ANDRADE PERDRIX (1992) diz que duas ou três determinações por tipo de ensaio são imprescindíveis, e uma média de seis a dez determinações pode ser conveniente quando as dispersões são de certa magnitude.

➤ *Determinação da resistência mecânica do concreto*

Este ensaio pode ser feito através da determinação da dureza superficial do concreto, admitindo-se que existe uma estreita correlação com a compressão do material e através de métodos ultrassônicos, que se baseiam na medida da velocidade de propagação de ondas longitudinais através do concreto, partindo do princípio que o concreto tem uma constituição homogênea para as ondas elásticas de alta frequência. Portanto, em frequências mais baixas, o concreto estará mais heterogêneo.

Erros nesta determinação devem-se à carbonatação superficial provocando um endurecimento superior maior que o interior, com conseqüente interpretação equivocada da resistência. A espessura da carbonatação pode ser detectada com aplicação de indicador químico a base de fenolftaleína.

➤ *Espessura do cobrimento de concreto e características da armadura*

As características da armadura a serem identificadas são: espessura do cobrimento do concreto, posição, diâmetro e redução de seção transversal causada por corrosão. A espessura do cobrimento de concreto é medida através de um furo no cobrimento. A medida da perda de seção é feita limpando o produto de corrosão da armadura e depois medindo sua seção em diversos pontos, fazendo a média e comparando com o valor inicial da seção.

➤ *Porosidade e massa específica do concreto*

O valor da porosidade de um concreto fornece indicações de qualidade desse concreto e pode ser considerado um indicador de permeabilidade. Este ensaio é feito em laboratório de acordo com a norma ASTM C 642 ou a norma NBR 9778-87. No qual tem-se que: porosidade menor que 10% o concreto é de boa qualidade e bem compacto, porosidade entre 10 e 15% o concreto é bom, porém permeável e inadequado para ambientes agressivos e porosidade superior a 15% são de concretos muito permeável e inadequado para proteger a armadura por longos períodos.

➤ *Teor de cloretos*

Podem ser encontrados no concreto os cloretos livres, os mais perigosos e agressivos a armadura na forma de íons da água dos poros, e os cloretos combinados, na forma de cloroaluminatos. A soma destes dois cloretos resulta no teor de cloretos totais. Podem ser

seguidos os métodos descritos nas normas UNE 80240-86, ASTM D 1411 ou ASTM C 1152 para determinar o teor de cloretos por unidade de volume de concreto.

Como o ataque de cloretos à armadura depende de inúmeras variáveis, normas de diferentes países especificam limites distintos. Por isso considera-se que, num limite bem geral, 0,05 a 0,1% em relação ao peso do concreto são quantidades suficientes de cloreto para despassivar a armadura.

➤ *Teor de sulfatos*

A presença de sulfatos pode formar produtos que provocam expansão e fissuras aumentando a permeabilidade e reduzindo a proteção naturalmente fornecida à armadura pelo concreto de cobrimento.

A quantidade total de enxofre (sulfetos + sulfatos) pode ser determinada através do método de ensaio da norma UNE 83120-88. O teor máximo de sulfatos é de 0,46% por peso total de concreto com 350 kg de cimento.

➤ *Profundidade de carbonatação*

A carbonatação ocorre devido a reação do CO<sub>2</sub> com os constituintes alcalinos do cimento, baixando o pH do concreto. A redução do pH também pode ocorrer devido a lixiviação dos sais alcalinos.

A espessura da superfície carbonatada ou lixiviada pode ser determinada utilizando solução de fenolftaleína, que é incolor em pH inferior a 8,3 e vermelho em pH superior a 9,5. Esta informação permite saber se a carbonatação alcançou a armadura.

➤ *Teor de umidade do concreto*

Esta é a variável que incide mais diretamente na velocidade de corrosão, pois controla a resistividade do concreto e o acesso de oxigênio e outros gases como carbônico e sulfuroso até a armadura.

Não existem correlações entre teores de umidade e velocidade de corrosão, pois se o concreto tem alta umidade, a resistividade é baixa e o acesso do oxigênio é baixo, mas se a umidade é baixa, a resistividade é alta e o acesso do oxigênio é alto. Contudo, pode-se medir

o valor desta variável através da diferença entre o peso da amostra úmida e o peso da amostra seca por 24h em estufa ventilada a 105°C.

➤ *Resistividade elétrica do concreto*

A resistividade elétrica do concreto junto com a disponibilidade de oxigênio, controlam a velocidade de corrosão do aço no concreto. Esta variável pode ser determinada conforme o método de ensaio descrito na norma ASTM G 57 conhecido por “quatro pontos”.

O valor encontrado dá uma idéia da ordem de grandeza da velocidade da corrosão e pode ser usado para calcular a vida útil residual da estrutura.

➤ *Potencial eletroquímico*

Esta é uma grandeza que indica aproximadamente a situação de corrosão ou passividade da armadura. Consiste da determinação da diferença de potencial elétrico entre o aço das armaduras e um eletrodo de referência em contato com a superfície do concreto.

Como o potencial é função de diversas outras variáveis, este dá a informação somente da probabilidade do processo corrosivo estar ocorrendo ou não. Embora seja imprescindível o conhecimento do valor do potencial de estruturas submetidas à proteção catódica.

### **3. Estudo Tecnológico de Proteção das Armaduras**

Existem muitas formas de evitar o aparecimento da corrosão: como a utilização de revestimento para proteção da armadura, métodos de proteção que utilizam conceitos eletroquímicos e preparação de um concreto de boa qualidade. Não existe consenso em relação ao melhor método de proteção contra a corrosão, porém a negligência à utilização de qualquer um desses métodos provoca um custo considerável durante o processo de manutenção. Os processos citados são baseados nos mecanismos que melhoram a resistência do concreto à penetração de íons que baixam o seu pH, e aqueles que melhoram a resistência da armadura à corrosão.

Os métodos utilizados hoje para evitar o aparecimento da corrosão são: proteção física da armadura (revestimentos), proteção eletroquímica, modificação de propriedades da armadura (armaduras especiais) e proteção química (inibidores).

Na **Figura 11** abaixo, são apresentadas as diversas técnicas que aumentam o tempo de vida útil da estrutura de concreto, técnicas estas que baseiam-se em diferentes princípios de funcionamento.



**Figura 11:** Sistemas de proteção e reparo da corrosão das armaduras nas estruturas de concreto (GONÇALVES, 2003)

A **Tabela 2** apresenta os métodos de proteção aplicáveis em estruturas em concreto armado, distinguindo os que atuam diretamente sobre a armadura metálica daqueles que agem sobre o próprio concreto.

**Tabela 2:** Métodos de Proteção e suas áreas de ação – (ANDRADE , 1992)

<b>Métodos de Proteção</b>					
<b>Características</b>	<b>Métodos que atuam sobre o aço</b>			<b>Métodos que atuam sobre o concreto</b>	
<b>Tipo de método</b>	Proteção Catódica	Cobrimentos metálicos (galvanização)	Pinturas epóxis	Aditivos inibidores de corrosão	Pinturas epóxis, ceras, etc
<b>Campo de aplicação</b>	Qualquer	Ataques por água do mar, carbonatação	Qualquer	Ataque por cloretos adicionados durante o amassamento, carbonatação	Qualquer
<b>Vantagens</b>	Único método eficaz em corrosão já iniciada	Facilidade de operação, custo relativo, sem manutenção	Sem manutenção, eficaz contra a corrosão por pite	Sem manutenção, fácil aplicação, custo relativo	Protegem ao mesmo tempo o concreto
<b>Inconvenientes</b>	Pessoal qualificado Controle contínuo	Deterioração local por manipulação e transporte Ineficiente na proteção contra a corrosão por pite	Custo elevado Colocação na obra Baixa aderência entre o produto e a barra de aço	Uso de quantidade ótima Regiões com diferentes suscetibilidade à corrosão	Custo relativo Necessidade de manutenção Retenção de água nos poros

### **3.1. Técnicas Eletroquímicas**

As técnicas eletroquímicas utilizadas para proteção de armaduras de concreto são: realcalinização, extração de cloretos e proteção catódica.

#### **3.1.1. Realcalinização**

Este processo consiste em aplicar uma corrente elétrica entre a armadura do concreto e uma malha de aço inserida em uma solução alcalina, essa solução cobre externamente a superfície do concreto. Com o decorrer do processo, a solução alcalina migra para o interior do concreto carbonatado, isso ocorre através do fluxo eletrosmótico. Essa migração provoca um aumento do pH do concreto e o processo é feito até que o pH se encontre no desejado.

Após esse tratamento o concreto assumirá características idênticas a do concreto novo em relação à carbonatação. O pH do concreto fica em torno de 10,5 (valor aproximado de um concreto novo).

#### **3.1.2. Extração de cloreto**

Este processo permite a retirada de íons cloreto através da aplicação de um campo elétrico de um eletrodo externo, com isso a alcalinidade do concreto aumentará devido a reação catódica.

Os íons de cloreto são transportados para fora enquanto os cátions migram para a armadura e hidroxilas são produzidas na superfície da armadura pela reação catódica.

Este método consiste na aplicação de uma corrente elétrica entre a armadura de concreto e uma estrutura metálica externa imersa em um reservatório de eletrolítico. O melhor eletrodo segundo EGGERS (1997) é a água de consumo doméstico.

### 3.1.3. Proteção Catódica

O mecanismo de proteção catódica baseia-se em manter o potencial da armadura em níveis abaixo de um valor crítico que, conforme observado no Diagrama de Pourbaix (**Figura 3**) corresponderia à imunidade do metal. Isto é feito através do uso de um fluxo de corrente elétrica constante durante toda a vida da estrutura.

De acordo com GENTIL (2007), proteger catodicamente uma estrutura significa eliminar, por processo artificial, as áreas anódicas da superfície do metal fazendo com que toda a estrutura metálica adquira comportamento catódico. Como consequência, o fluxo de corrente elétrica anodo/catodo deixa de existir e a corrosão é totalmente eliminada.

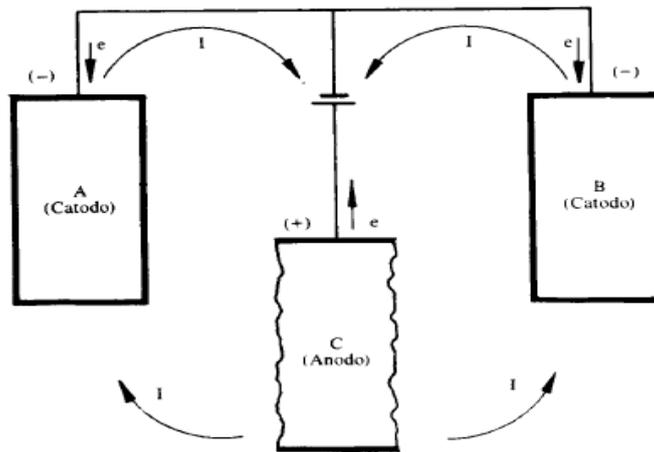
Existem três mecanismos que podem explicar a redução da corrosão através desse tipo de proteção:

- ✓ O potencial do metal atinge um valor em que todas as áreas do metal realizam reações catódicas, sendo as anódicas da estrutura metálica impedidas. As reações anódicas ocorrem em outro eletrodo conectado ao metal;
- ✓ O eletrólito adjacente à superfície metálica se torna mais básico devido à formação de íons hidroxila pela redução dos íons hidrogênio ou redução dos íons oxigênio; e
- ✓ Elevação do pH, devido à formação de íons hidroxila, pode acarretar a precipitação de substâncias insolúveis, como  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ , que podem depositar-se sobre o metal produzindo camada protetora.

Existem duas formas de proteção catódica: Proteção Galvânica ou Proteção por Corrente Impressa.

#### A) Proteção Catódica Galvânica

Esse tipo de proteção, ilustrada na **Figura 12**, é feita através do fornecimento de fluxo de corrente elétrica devido à diferença de potencial entre o metal que se quer proteger e outro que apresente um potencial mais negativo na tabela de potenciais da serie galvânica.



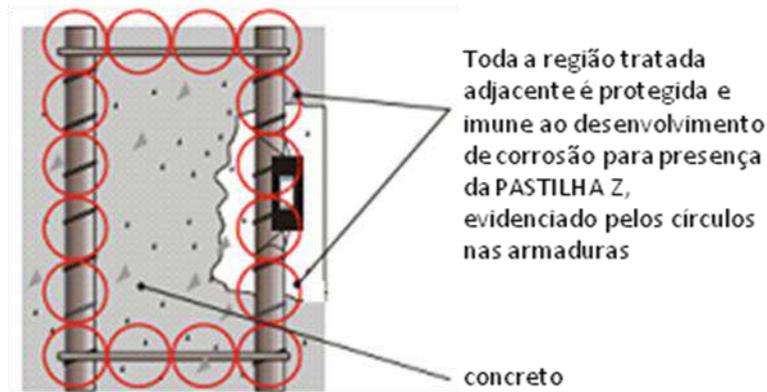
**Figura 12:** Circulação da corrente em um anodo de sacrifício (GENTIL, 2007)

Em geral os materiais mais utilizados como anodos de estruturas de aço são o alumínio e o zinco, pois estes apresentam potenciais muito inferiores ao do aço, permitindo assim que haja uma perfeita proteção. Esses materiais devem atender a três requisitos: bom rendimento teórico da corrente em relação às massas consumidas, a corrente não deve diminuir com o tempo e o rendimento prático da corrente não deve ser muito inferior ao teórico.

Este método de proteção exige um cuidado na manutenção, devido ao possível desgaste do anodo mais rápido que o esperado quando em presença de meios mais agressivos no decorrer de sua vida útil, diminuindo assim a proteção efetiva.

O sistema galvânico não apresenta bons resultados quando aplicado às estruturas que se encontram em meios de alta resistividade. Essa limitação pode ser explicada pelo fato de que a corrente gerada em meio de alta resistividade é muito pequena, tendo em vista a diferença de potencial ser constante. A alta resistividade impede, portanto, que seja atingido o potencial de proteção. Desta forma, a proteção de estruturas em concreto armado através do uso de anodos galvânicos, se dá de forma mais efetiva quando o concreto se apresenta com menor resistividade, o que pode ocorrer na presença de salinidade. Por exemplo, a proteção de uma estrutura em água do mar como um píer ou mesmo uma plataforma *offshore* em concreto, poderia ser adequadamente protegida por esta técnica, desde que o dimensionamento fosse bem calculado.

A **Figura 13** apresenta como ocorre a proteção por este método.



**Figura 13:** Concreto armado com aplicação de proteção galvânica (ROGERTEC, 2011)

## B) Proteção Catódica por Corrente Impressa

Neste tipo de proteção, a corrente necessária para manter o potencial do metal da estrutura abaixo do potencial de corrosão é fornecida através da utilização de uma corrente externa. Essa corrente é contínua, porém pode ser usada corrente alternada desde que acoplada a um retificador para que essa exigência seja atendida.

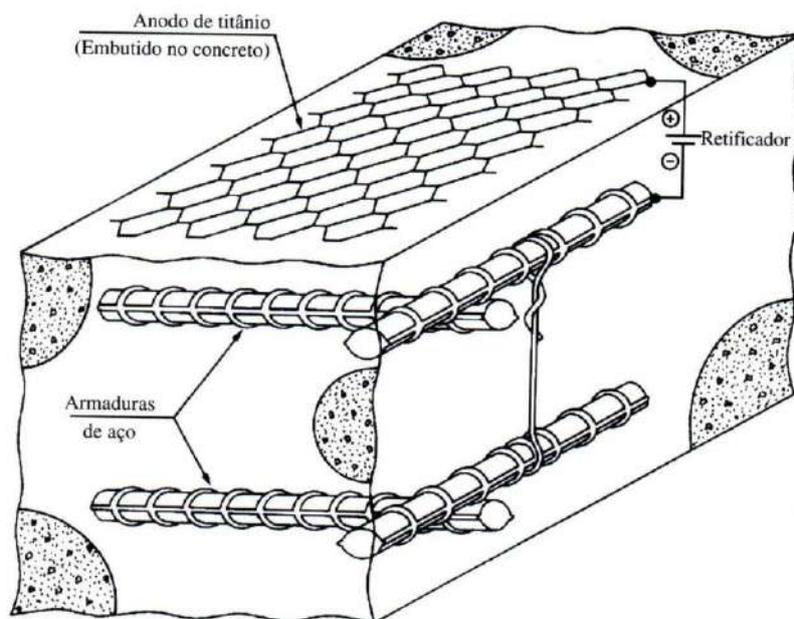
O anodo utilizado é normalmente inerte, para que este não seja oxidado com o passar do tempo. Os tipos de anodo mais utilizados na prática são de Ti revestido com MMO, ligas de Fe-Si-Cr ou grafite, por se tratar de eletrodos comprovadamente inertes na condição de processo.

A corrente que é fornecida para que haja proteção deve estar mantida em um mínimo para que exista efetiva proteção em toda a área da estrutura. A máxima será aquela em que não haja fissuras no concreto, pois a partir de um determinado valor de corrente o concreto começa a trincar, de acordo com GENTIL (2007) os problemas que podem ocorrer devido a essa superproteção são:

- ✓ Liberação de hidrogênio, na estrutura protegida, em quantidade tal que pode ocasionar fragilização do aço ou empolamento do revestimento;
- ✓ Excesso de íons  $\text{OH}^-$  produzido na superfície da estrutura superprotegida ataca metais anfóteros, como alumínio, zinco, chumbo e estanho, acelerando assim a corrosão de estruturas desses metais;

- ✓ Quando se tem instalações pintadas e protegidas catódicamente deve-se indicar tintas saponificáveis, como as feitas com óleos naturais, e preferindo-se aquelas com resinas vinílicas ou epóxi;
- ✓ A corrente que flui através do eletrólito, do anodo para a estrutura protegida, produz um potencial no eletrólito. Se existir outra estrutura nas vizinhanças da estrutura protegida ou dos anodos, que não faça parte da proteção, aquela pode sofrer corrosão: nos pontos em que a corrente entra há proteção, entretanto nos pontos em que a corrente sai há corrosão.

A grande vantagem dessa técnica é que a corrente impressa pela fonte de tensão não é limitada, podendo ser atingido altos valores, caso seja necessário. Desta forma, qualquer estrutura pode ser protegida por esta técnica, sistematicamente apresentada na **Figura 14**.



**Figura 14:** Proteção catódica por corrente impressa para o concreto armado (CASCUDO, 1997)

Na **Tabela 3** podem ser observadas as principais vantagens e desvantagens de cada técnica de proteção catódica.

**Tabela 3:** Comparativa entre os Métodos de Proteção Catódica (GENTIL, 2007)

<b>Sistema Galvânico</b>	<b>Sistema por Corrente Impressa</b>
Não requer fonte externa de corrente elétrica	Requer fonte externa de corrente elétrica
Em geral, econômico para requisitos de corrente elétrica de até 5A	Em geral, econômico para requisitos de corrente elétrica acima de 5A
Manutenção mais simples	Manutenção mais cara
Necessita de acompanhamento operacional	Necessita de acompanhamento operacional
Somente para eletrólito de muito baixa resistividade elétrica, em geral até 3000Ω	Pode ser usado em eletrólitos com qualquer valor de resistividade elétrica, inclusive os de muito baixa resistividade
Não apresenta problemas de interferência com estruturas estranhas	Pode apresentar problemas de interferência com estruturas estranhas
Não admite regulagem, ou admite regulagem precária	Pode ser regulado com facilidade

Uma comparação entre as diferentes técnicas eletroquímicas pode ser vista na **Tabela 4** a seguir.

**Tabela 4:** Principais Características do Métodos de Proteção (MONTEIRO, 2005)

<b>Características</b>	<b>Proteção Catódica</b>	<b>Extração de cloretos</b>	<b>Realcalinização</b>
<b>Detém a corrosão por</b>	Polarização das armaduras até o potencial de imunidade	Eliminação dos agentes agressivos	Restauração da alcalinidade perdida no entorno da armadura
<b>Duração do tratamento</b>	Permanente	4 a 10 semanas	1 a 2 semanas
<b>Densidade de corrente típica</b>	10 mA/m <sup>2</sup>	0,8 a 2 A/m <sup>2</sup>	0,8 a 2 A/m <sup>2</sup>

### 3.2. Revestimentos

Com o objetivo de evitar a corrosão de estruturas, certos materiais podem ser utilizados como camadas de proteção física. Esses materiais podem ser de origem metálica ou

orgânica e sua forma de proteção difere em cada caso, essa forma de proteger a estrutura é chamada de revestimento.

### **3.2.1. Metálicos**

Os revestimentos metálicos são utilizados com diferentes propósitos: decoração, resistência ao atrito, resistência à oxidação em contatos elétricos, endurecimento superficial e resistência à corrosão. Porém, dentre todos esses propósitos, serão abordados somente o da resistência a corrosão.

Segundo GENTIL (2007), o mecanismo de proteção pelo uso de revestimentos metálicos pode ser explicado por:

- ✓ Formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos ou outros compostos, pela reação com oxidantes do meio corrosivo (como alumínio, cromo e zinco);
- ✓ Os metais aplicados nos revestimentos apresentam valores elevados de sobretensão ou sobrevoltagem, sendo por isso mais resistentes ao ataque ácido em meios não aerados (como chumbo, zinco e cádmio).

Para um perfeito revestimento é necessário que seja feita limpeza adequada ainda que existam boa aderência e impermeabilidade da película. Os revestimentos podem ser caracterizados de acordo com sua forma de proteção: catódicos ou anódicos.

Revestimentos catódicos protegem o material revestido através da utilização de metais que possuam elevado potencial de redução. Desta forma, o revestimento funciona como catodo da pilha formada com o meio ambiente, não havendo sua corrosão. Como não há oxigênio para fechar o circuito, não existe a formação de uma pilha entre material revestido e revestimento, o material revestido fica assim protegido. Porém, caso o revestimento não esteja cobrindo completamente a superfície da estrutura, o material revestido entra em contato com o meio ambiente e tem-se a formação de uma pilha entre ele e o revestimento, havendo assim forte corrosão.

Revestimentos anódicos protegem o material revestido através da utilização de metais que possuam forte tendência a se oxidar no meio em que se inserem. Assim, haverá corrosão

no revestimento pela formação de uma pilha entre o revestimento e o meio ambiente, exigindo um maior cuidado com a mudança freqüente desse material. O maior desgaste do revestimento, apesar de parecer um ponto negativo, é uma forma mais segura de proteção, pois mesmo quando o revestimento não for feito de forma correta, não haverá a corrosão do material revestido, já que este apresentará maior potencial de redução, sendo o catodo da pilha. O revestimento anódico mais importante utilizado em concreto armado é a utilização de zinco, este processo é chamado de galvanização.

Tipos de aplicação de revestimento metálico:

- ✓ *Cladização ou cladeamento*: este método consiste na laminação a quente, pelo processo de explosão ou solda e sob pressão. Este processo utiliza revestimento anódico ou catódico;
- ✓ *Imersão a quente*: Este método consiste na imersão do material metálico em metal fundido. Muitos metais podem ser usados nesse processo, porém cada um deles fornecerá características diferenciadas à estrutura. No caso do concreto armado o mais comum é a utilização do zinco fundido que funciona como barreira entre o aço e o meio ambiente e como anodo de sacrifício, sendo esse processo conhecido como galvanização;
- ✓ *Eletrodeposição*: Consiste na deposição eletrolítica de materiais que se encontram sob a forma iônica em um banho. A superfície a revestir é colocada no catodo de uma célula eletrolítica. Por eletrodeposição é comum revestir-se com cobre e níquel. Este método não é utilizado na prática para concreto armado, sendo assim de menos importância entre os métodos de proteção nessas situações

### 3.2.2. Não Metálicos

- **Inorgânicos**

Essa forma de revestimento é feita através da utilização de uma película não metálica entre o metal que se quer proteger e o meio corrosivo. Essa forma de proteção se baseia na barreira física criada por essa película e por inibição anódica.

Tipos de revestimentos não metálicos inorgânicos:

- ✓ *Cromatização*: consiste na reação da superfície metálica com soluções ligeiramente ácidas contendo cromatos. A camada de cromatos passivante aumenta a resistência à corrosão da superfície metálica que se quer proteger.
- ✓ *Revestimento com material cerâmico*: consiste na colocação de uma camada de material cerâmico, geralmente silicoso, de alta resistência a ácidos.

- **Orgânicos**

Consiste na colocação de uma película de natureza orgânica entre o metal que se quer proteger e o meio corrosivo.

Tipos de revestimentos não metálicos orgânicos:

- ✓ *Pintura industrial*: é um revestimento, em geral orgânico, largamente empregado para controle de corrosão em estruturas, podendo ser usado como proteção secundária em armaduras de concreto.
- ✓ *Revestimento com plásticos*: são revestimentos obtidos através da aplicação de diversos tipos de plásticos sobre os materiais metálicos, por meio de colagem, deposição ou extrusão.

A pintura industrial é um método muito utilizado mundialmente para proteção em estruturas de concreto armado, e dentre os apresentados acima é o que apresenta maior importância. Os outros métodos de proteção não são muito utilizados, ficando assim limitados a alguns processos de aplicação.

### **3.3. Armaduras Especiais**

Para evitar a corrosão de armaduras em concreto deve-se tomar muito cuidado com a forma como o concreto é preparado. Um concreto mal preparado possui um tempo de vida útil menor, além de poder apresentar substâncias agressivas à estrutura metálica. Além da preparação adequada do concreto pode-se intervir diretamente na armadura, modificando o a

armadura metálica por materiais mais resistentes a corrosão, tornando assim a estrutura mais durável.

Armaduras resistentes a corrosão são aquelas que possuem elevados tempos de iniciação e taxas de corrosão muito baixas, tendo a vida útil bem maior que a dos materiais usados comumente.

### **3.3.1. Aço Inoxidável**

O aço inoxidável é uma liga constituída de ferro, cromo (teor acima de 11,5%p) e carbono (máximo de 1,2%p).

Segundo GENTIL (2007), os aços inoxidáveis em presença de oxigênio formam películas constituídas principalmente de óxido de cromo,  $Cr_2O_3$ , que possuem aderência, continuidade, alta resistividade elétrica e praticamente ausência de porosidade, sendo responsável pela resistência do aço inoxidável a diferentes meios corrosivos.

O cromo é o principal responsável pela película protetora sobre o metal, devido a sua capacidade de oxidar formando um produto aderente e contínuo. Porém, a adição de outras substâncias a liga poderá melhorar suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão.

Existem diversas formas de aços inoxidáveis: austeníticos, ferríticos, martensíticos e duplex. Porém, segundo GONÇALVES (2005), apenas aços austeníticos, ferríticos e austenítico-ferrítico podem ser usados em armaduras de concreto. A diferença entre esses aços está composição

Definição dos tipos de aço segundo GENTIL (2007) baseada nas determinações da AISI (American Iron and Steel Institute):

- ✓ *Aços inoxidáveis austeníticos*: São aços cromo-níquel, com teores de cromo entre 16 e 26%p e níquel entre 7 e 22%p. O níquel está presente nesses aços para aumentar a sua resistência mecânica e acelerando a formação da camada protetora de óxido de cromo;

- ✓ *Aços inoxidáveis ferríticos*: São aços ao cromo (11 a 27%p). Sua estrutura será sempre ferrítica. Qualquer que seja a velocidade de resfriamento são aços intemperáveis;
- ✓ *Aços martensíticos*: São aços-cromo (11 a 18%p). Esses aços são temperáveis, podendo haver de baixo, médio e alto teor de carbono. Quanto menor o teor de carbono, mais deformável será o aço, a frio ou quente;
- ✓ *Aços duplex*: São aços com microestruturas constituídas de um balanço de estruturas austenítica-ferrítica que apresentam dupla estrutura, sendo assim mais resistente à corrosão.

### **3.3.2. Fibras Plásticas**

As armaduras de plástico reforçado têm como principal vantagem o fato de não serem corroídas pela ação dos cloretos nem por reduções de pH provocadas por carbonatação. Esse processo não é nada além da substituição da tradicional armadura metálica pelo composto, que é processado em extrusora numa matriz polimérica.

A fibra de vidro melhora muito as propriedades do plástico em que é inserida, permitindo que este seja usado como substituto das armaduras de aço tradicionais. As principais propriedades melhoradas pela estrutura de fibra plástica em relação à estrutura metálica tradicional são:

- ✓ Baixo coeficiente de dilatação térmica;
- ✓ Altas propriedades mecânicas;
- ✓ Retenção de propriedades mecânicas em altas temperaturas;
- ✓ Alto alongamento na ruptura;
- ✓ Facilidade de processamento;
- ✓ Baixo custo.

Além desses fatores que diferem os dois materiais, existem outros importantes que devem ser tratados com rigor:

- ✓ O aço possui propriedades mecânicas bem definidas, enquanto as da fibra plástica dependem da espessura do laminado e da posição relativa dos reforços dentro dele; e
- ✓ As fibras plásticas apresentam uma séria restrição do ponto de vista do alongamento admissível, o alongamento máximo da fibra não pode ser excedido. Já o aço, por ser um material dúctil, não sofre desta limitação, podendo admitir deformações plásticas localizadas, mesmo que não tenha sido dimensionado para isto.

As fibras mais utilizadas são as fibras de vidro (GFRP), as fibras de carbono (CFRP) e a fibra de aramida (AFRP). Essas fibras aumentam a resistência da estrutura às ações mecânicas e do meio ambiente.

### **3.4. Inibidores**

Os inibidores de corrosão podem ser definidos como compostos químicos que quando misturado a solução, em concentrações adequadas, impedem os efeitos da corrosão. Essa inibição pode acontecer de várias formas, podendo ocorrer pela inibição da reação catódica, pela inibição da reação anódica ou ainda pela inibição de ambas.

A definição apresentada acima tem como base as definições mais aceitas internacionalmente. Segundo HOPE et al. (1989) “inibidores são componentes químicos que, quando adicionados em quantidades adequadas, podem prevenir a corrosão da armadura de aço e não tem efeitos contrários às propriedades do concreto”.

GENTIL (2007) apresenta uma definição mais global: “É uma substância ou mistura de substâncias que, quando presente em concentrações adequadas, reduz ou elimina a corrosão”.

HELENE (1986) diz que inibidores de corrosão só devem ser usados na massa de concreto quando houver a presença de cloretos e estes forem dosados em função do teor de cloretos livres.

Os inibidores atuam de diferentes modos quando estão em condições críticas de concentração, ou seja, em concentrações menores que aquelas necessárias para uma proteção adequada.

Inibidores seguros são aqueles que não apresentam grandes problemas quando estão em concentrações críticas. Eles inibem a corrosão global do sistema sem aumentar a taxa de corrosão nas áreas desprotegidas. Desta forma, a corrosão neste caso acontece de forma uniforme sobre toda superfície do material, não havendo fragilização do material pela formação de pites. Podemos citar como inibidores deste tipo aqueles que inibem a reação anódica. Nesse caso, a camada passivante depositada sobre o material metálico não é contínua, permitindo que aconteça o ataque corrosivo em pontos onde há falha de passivação. Esses inibidores são denominados inibidores catódicos.

Inibidores não-seguros são aqueles onde a concentração de inibidor em quantidade crítica causa sérios problemas à estrutura do material. Neste caso, as áreas desprotegidas do material apresentam uma taxa de corrosão muito mais intensa (corrosão por pite), mesmo que a taxa de corrosão global seja diminuída em relação àquela sem inibidor. Dentro deste grupo estão os inibidores catódicos, onde a redução catódica, em concentração crítica, provoca diminuição do fluxo de elétrons do material metálico, mas os elétrons partem de toda a superfície do metal. Esses inibidores são denominados inibidores anódicos

A utilização de inibidores é feita de forma com que estes atuem com papel secundário no mecanismo de diminuição da corrosão, uma boa elaboração do concreto e aplicação de outras formas de proteção é crucial para uma boa eficiência de combate à corrosão.

Os mecanismos de inibição partem de dois pressupostos: diminuição da taxa de corrosão através da passivação da superfície anódica ou através da diminuição da difusão para a área catódica.

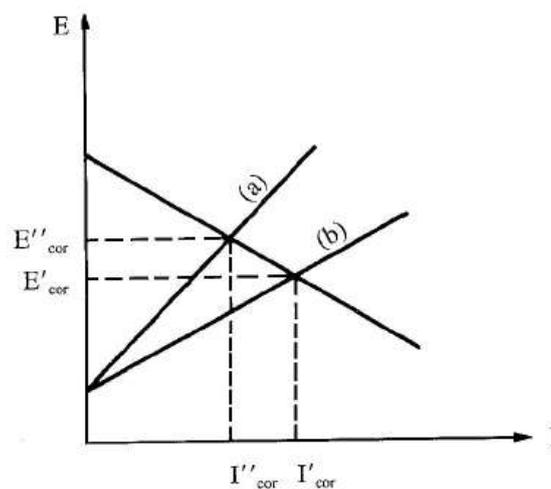
Resultados práticos têm demonstrado que inibidores de corrosão podem ser eficientemente aplicados em argamassas como forma de combate à corrosão das armaduras (STEPHENSON et al, 2011).

### **3.4.1. Inibidores Anódicos**

De acordo com MONTEIRO (2005), inibidores anódicos permitem reduzir a velocidade de reação anódica reagindo com os produtos de corrosão e formando um revestimento protetor na superfície do aço.

GENTIL (2007) define inibidor anódico como sendo aqueles que atuam reprimindo as reações anódicas, ou seja, retardam a reação de oxidação no anodo. Funcionam geralmente, reagindo com o produto de corrosão inicialmente formado, ocasionando um filme aderente e extremamente insolúvel na superfície do metal, ocorrendo a polarização anódica. (vide **Figura 15**)

Através dessas importantes definições, podemos dizer que essa forma de inibição ocorre através da formação de uma camada passivante sobre a superfície do material metálico, essa camada é formada pela reação com os produtos de corrosão inicialmente formados. A camada passivante formada é aderente e muito insolúvel no meio onde se encontra, assim acontece a polarização anódica da estrutura.



**Figura 15:** Diagrama de Polarização E X I, ação do inibidor anódico. (a) com inibidor, (b) sem inibidor.  
(GENTIL, 2007)

Em geral os produtos formados pela reação de oxidação de íons metálicos são hidróxidos que reagem com íons metálicos produzidos no anodo, formando produtos insolúveis com ação protetora.

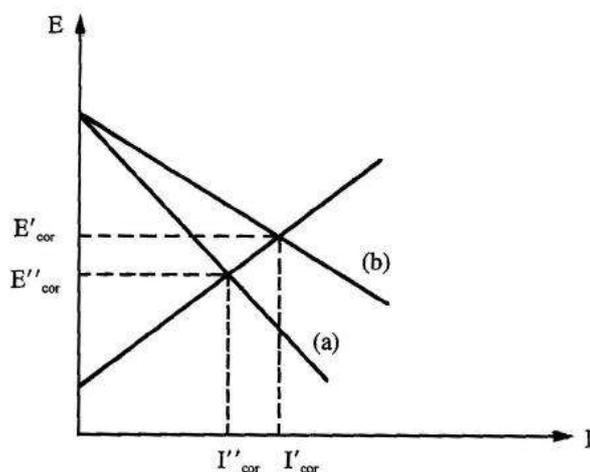
A inibição anódica representa um tipo de inibição perigosa, pois caso a concentração do inibidor esteja menor que a concentração crítica, haverá um processo de corrosão localizada nos pontos onde a camada passivante não for formada. Cada inibidor anódico possui sua concentração crítica, sendo apresentados a seguir alguns dos mais usados industrialmente:

- ✓ Nitritos: oxidam os produtos de corrosão aos compostos de valência mais alta, diminuindo assim a solubilidade e tornando essa camada oxidada uma camada de proteção;
- ✓ Orto-fosfatos: esse tipo de inibidor aumenta a alcalinidade da água, ajudando assim na formação de filmes de passivação, porém existe a necessidade de haver cálcio suficiente na água;
- ✓ Silicatos: sua ação acontece através da formação de ânions coloidais por hidrólise em soluções aquosas que migram para regiões anódicas; e
- ✓ Cromatos: em alguns casos esses compostos químicos oxidam parcialmente os produtos da corrosão, formando compostos menos solúveis. Esse grupo de inibidores, apesar de sua boa capacidade de proteção, teve seu uso limitado devido aos problemas ambientais causados.

### **3.4.2. Inibidores Catódicos**

GENTIL (2007) define inibidores catódicos como os que reprimem as reações catódicas (de redução). São substâncias que fornecem íons metálicos capazes de reagir com a alcalinidade catódica, produzindo compostos insolúveis. Esses compostos insolúveis envolvem a área catódica, impedindo a difusão do oxigênio e a condução de elétrons, inibindo assim o processo catódico. Essa inibição provoca acentuada polarização catódica. (vide **Figura 16**)

Desta forma, podemos concluir que esse tipo de inibição não impede a saída de elétrons do anodo e sim a chegada dos mesmos ao catodo, além da difusão de oxigênio. Com isso, o fluxo de elétrons que sai do anodo tende a ser uniforme por toda extensão da superfície, evitando assim a formação de corrosão localizada. Estes tipos de inibidores são conhecidos como inibidores não-perigosos, pois uma concentração de inibidor menor que a crítica não provoca corrosão em pontos da superfície do anodo, como acontece com os inibidores anódicos.



**Figura 16:** Diagrama de Polarização E x I, ação do inibidor anódico. (a) com inibidor, (b) sem inibidor. (GENTIL, 2007)

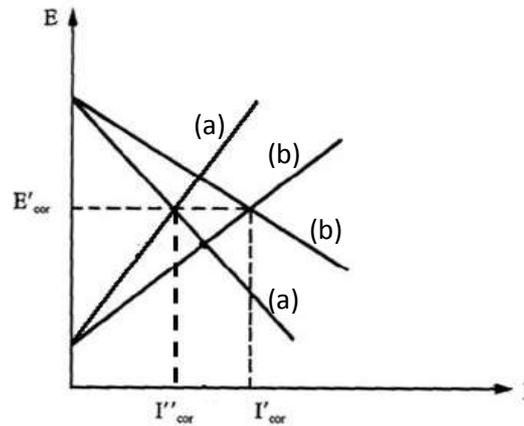
Os inibidores catódicos mais comuns são sulfatos de zinco, magnésio e de níquel, que formam hidróxidos insolúveis que se depositam sobre a região catódica. Esses inibidores apresentam dificuldade ao serem usados em concretos, pois os sulfatos favorecem a formação de sais expansivos que provocam tensões e trincas internas no concreto (GENTIL, 2007).

Os inibidores catódicos são menos eficientes que os anódicos no uso em concretos. Existem relatos que isso ocorre devido à característica de expansão dos sulfatos (inibidores anódicos mais usados) e causarem fissuras na estrutura. Apesar da vantagem de poderem ser usados em concentrações inadequadas, não ficam firmemente aderidos à estrutura como ocorre com os anódicos. FREIRE (2005).

### 3.4.3. Inibidores Mistos

Esses inibidores reprimem tanto as reações anódicas quanto catódicas. Essas substâncias permitem a formação de uma película passivadora contínua que protege tanto a área catódica quanto a anódica. Desta forma, tem-se um efeito maior do que a soma dos efeitos individuais dos inibidores catódicos e anódicos, que pode ser visto na **Figura 17**.

As películas de proteção formadas dependem de muitos fatores como: velocidade do fluido, volume e concentração do inibidor, temperatura, tipo de substrato, tempo de contato entre inibidor e a superfície metálica e composição do fluido (GENTIL, 2007).



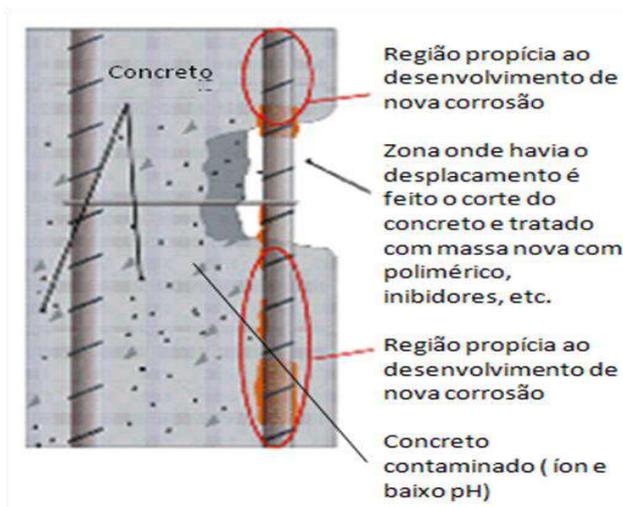
**Figura 17:** Diagrama de Polarização E x I, ação do inibidor misto. (a) com inibidor, (b) sem inibidor.  
(GENTIL, 2007)

### 3.5. Reposição de Argamassa

Além dos métodos acima mencionados, podemos ainda recorrer ao mais tradicional realizado, que seria a retirada da argamassa onde se encontra a corrosão localizada e substituição desta por uma nova argamassa.

O processo é simples, remover todo o concreto solto, chegando à armadura. A superfície de concreto solto deve estar íntegra, limpa e a armadura isenta de ferrugem, nata de cimento ou óleo.

O único inconveniente deste processo é o problema da diferença no pH local da argamassa nova e da argamassa antiga, essa diferença pode gerar corrosão localizada na estrutura da armadura que se encontra nas redondezas do local onde foi inserida a argamassa nova, como ilustrado na **Figura 18**.



**Figura 18:** O problema da recuperação estrutural (REITEC ENGENHARIA, 2011)

## 4. Estudo Mercadológico das Técnicas de Proteção

A realização de uma proteção adequada para uma estrutura leva em conta diversos aspectos: tipo de proteção, limitações operacionais e custo. Dentre todos os métodos para proteger uma estrutura de concreto armado pode-se definir os com melhor aplicabilidade: proteção catódica por corrente impressa, uso de tintas anticorrosivas e galvanização. Além desses, podemos destacar ainda o aparecimento da proteção catódica por anodos de sacrifício, mostrando uma nova vertente a ser explorada.

### 4.1. Proteção por galvanização

A proteção de estruturas de concreto por galvanização já é um método muito utilizado mundialmente, sendo assim muito importante tratar de seu custo. A vantagem desta técnica em relação às demais é o custo relativamente baixo do processo de manutenção da proteção da estrutura, sendo o maior custo relativo ao processo de confecção da proteção. A proteção galvânica depende basicamente de dois fatores: pH da fase aquosa nos poros do concreto e espessura da capa de zinco.

Este método tem como inconveniente as possíveis discontinuidades das armaduras que venham a existir devido ao mau revestimento feito, isso gera pilhas eletroquímicas pela

diferença de potencial. Este impacto é minimizado pelo fato do zinco ser anodo de sacrifício e corroer, ao invés da estrutura, mas isso gera um aumento da área desprotegida, intensificando a corrosão. Todos esses fatores devem ser levados em conta quando se pretende escolher o tipo de proteção a ser utilizado.

**Tabela 5:** Custo da relação tipo de projeto x tamanho (ICZ, 2011)

Sistema de Proteção	Dimensão do Projeto		
	< 100t (R\$/ton)	100 – 1000t (R\$/ton)	> 1000t (R\$/ton)
Simplex	1.350,00	1.320,00	1.020,00
Complexa	1.935,00	1.890,00	1.325,00
Tubos	1.300,00	1.150,00	1.150,00

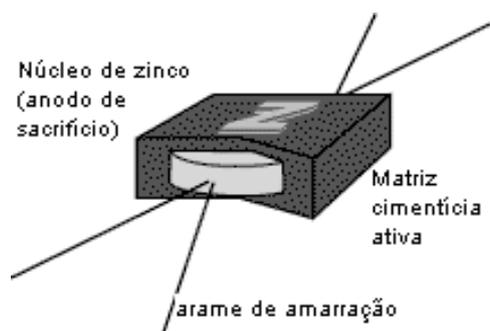
Usando como padrão para comparação a classe I n° 3, padrão de espessura: 915 g/m<sup>2</sup>, espessura 130 micrometros.

Desta forma, podemos calcular o custo da galvanização conhecendo apenas a peso total da armadura metálica, e multiplicando este peso pelo custo por tonelada encontramos o custo total.

## 4.2. Proteção Catódica

### 4.2.1. Galvânica

Trataremos primeiramente deste novo método de proteção para estruturas de concreto. O uso de anodos de sacrifício (**Figura 19**) é uma técnica consagrada para proteção de estruturas metálicas em alto mar, onde a ação agressiva do meio exerce enormes prejuízos a essas estruturas. Porém, a sua utilização para em estruturas de concreto é muito recente, existe ainda desconfiança por grande parte dos pesquisadores em relação a sua eficácia.



**Figura 19:** Pastilha de Zinco usada como anodo de sacrifício (ROGERTEC, 2011)

A técnica baseia-se na utilização de anodos por toda a estrutura, permitindo que este seja oxidado ao invés da estrutura que se deseja proteger. Será utilizado como base um produtor nacional desses anodos, uma empresa nacional que fabrica anodos de zinco na forma de pastilhas. De acordo com o fabricante, a proteção de uma dessas pastilhas depende da dimensão que essa pastilha se encontra. Desta forma, podemos estimar o custo para uma estrutura de qualquer tamanho através do custo por metro quadrado desta tela, os custos por metro quadrado é fornecido pela empresa.

A empresa garante proteção da estrutura de concreto por períodos superiores a 15 anos, mas sua eficiência está atrelada a dois fatores: agressividade do meio e número de pastilhas Z insuficientes para a proteção. Nos dois casos a vida útil das pastilhas diminuirá proporcionalmente.

Para uma mesma área podemos fazer uma comparação entre os tipos de anodos de sacrifício que podem ser usados.

**Tabela 6:** Custo das pastilhas (ROGERTEC, 2011)

Produto	Unidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$/m <sup>2</sup> )
Pastilha Z 60x60 mm	20 un	28,40	568,00
Pastilha Z 80x80 mm	12 un	33,10	397,00
Tela Galvânica	m <sup>2</sup>	231,00	231,00

A tela galvânica atende melhor quando se deseja proteger uma área localizada em um meio menos agressivo, pois a tela possui uma espessura menor e tende a se degradar mais rapidamente. Assim, sabendo a área superficial aproximada da armadura, podemos estimar o

custo da proteção realizada na estrutura multiplicando o custo por metro quadrado pela área que se deseja proteger.

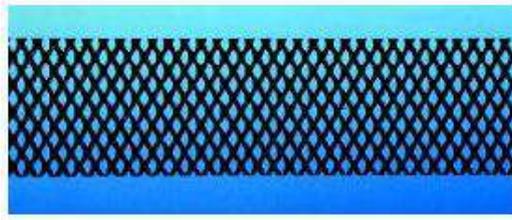
#### **4.2.2. Por corrente impressa**

Nos últimos anos a utilização da proteção por corrente impressa em grandes obras que utilizam o concreto armado tem crescido bastante, no Brasil não temos muitos exemplos a mencionar a não ser estátua do Cristo Redentor. No mundo, obras como a Ópera de Sydney que, por se localizar próxima ao mar, exigem uma proteção maior. A utilização desse tipo de proteção tem crescido devido a sua grande flexibilidade em atender diversos tipos de estrutura: grandes, próximas ao mar e com grandes quantidades de íons cloreto.

A grande flexibilidade desse tipo de proteção se deve ao fato de que quanto mais agressivas forem as condições de trabalho maior poderá ser a tensão empregada para que haja proteção. Essa flexibilidade tem um limite inferior que seria a mínima tensão necessária para que haja proteção, a corrente também não pode ser muito alta para que não haja trincas nas estruturas de concreto.

No Brasil, devido à grande região litorânea, esse método devia estar sendo mais utilizado em obras feitas de concreto armado. Hoje existe um grande gasto na recuperação de pilares de prédios residenciais localizados à beira-mar, pois estes se degradam rapidamente na presença de íons cloreto provenientes de maresias, fazendo com que seja necessária a troca do pilar a cada 15 anos. Dessa forma, esta aplicação permite almejarmos futuramente grandes investimentos nesse tipo de proteção, diminuindo assim os custos de manutenção.

O cálculo do custo de instalação é um tanto elevado devido à quantidade de anodos, ilustrado na **Figura 20**, que deve ser utilizada dependendo do tamanho da estrutura, porém a manutenção é de baixíssimo custo devido aos gastos somente com energia elétrica. O custo da instalação é maior, englobando desde a tela de titânio até o retificador de corrente empregado. O custo médio do retificador é de R\$ 15.000,00 e o custo médio da tela de titânio é de R\$ 1500,00 por metro quadrado.



**Figura 20:** Malha de Titânio

O custo de manutenção é facilmente realizado através da corrente impressa, tensão aplicada e preço do kWh, porém valores como eficiência do retificador e resistividade do concreto também são importantes. Como exemplo, o custo do kWh (novembro/2010) foi de R\$ 0,48532.

### **4.3. Proteção através do uso de tintas anti-corrosivas**

O método de proteção através de tintas anti-corrosivas é muito simples e possui um custo de aplicação menor que o da galvanização, sendo assim a mais utilizada por pequenas empresas.

O custo da mão de obra é muito pequeno também, já que não exige grande conhecimento por parte do operário, permitindo assim que possa ter pouca especialização, garantindo menor custo.

O grande problema no uso de tintas como único método de proteção é que qualquer descontinuidade na camada de revestimento permite o aparecimento de corrosão localizada, assim esta técnica exige uma constante vigilância e manutenção.

Podemos fazer um comparativo entre o processo de galvanização e pintura, considerando a vida útil de 25 anos. O custo da galvanização tende a ser 2 ou 3 vezes inferior ao da pintura, pois o primeiro não necessita de grandes custos de manutenção como é o caso da pintura. A pintura deve ser refeita a todo instante a fim de corrigir possíveis falhas.

Podemos desta forma, estimar o custo de pintura através do custo da mão-de-obra, o preço da tinta e o rendimento da tinta.

$$CT = \frac{C_{tinta} + C_{Mão-de-obra}}{\text{Área Pintada}}$$

O preço médio de uma tinta anticorrosiva é R\$ 79,90, e cobre uma área de 40m<sup>2</sup>, porém para áreas grandes (acima de 1000m<sup>2</sup>), o fabricante dá desconto de 10% sendo o preço de R\$ 72,00. O custo médio do um pintor é cerca de R\$ 17,00 por metro quadrado, assim o custo efetivo da pintura por metro quadrado pode ser visto na **Tabela 7**.

**Tabela 7:** Custo da tinta de acordo com o tamanho do projeto

Sistema de Proteção	Custo	
	< 1000 m <sup>2</sup> (R\$/m <sup>2</sup> )	>1000 m <sup>2</sup> (R\$/m <sup>2</sup> )
Tinta	1,9975	1,8
Mão-de-obra	17	17
<b>Total</b>	<b>19,00</b>	<b>18,80</b>

Na **Tabela 8** pode ser visto uma comparação entre o custo de todas as técnicas analisadas.

**Tabela 8:** Comparação do custo de diferentes tipos de sistemas de proteção

Técnicas	Anodo de sacrifício	Galvanização	Corrente impressa	Tintas anti-corrosivas
<b>Custo de instalação</b>	R\$ 231,00 / m <sup>2</sup>	R\$ 1.320,00 / ton	R\$ 15.000,00 (retificador) R\$ 1.500,00 / m <sup>2</sup> (Tela)	R\$ 18,80 / m <sup>2</sup>
<b>Custo de manutenção</b>	Reposição de anodos	Desprezível	R\$ 0,48532 / m <sup>2</sup>	Reparo da pintura

## 5. Estudo de Caso - O Cristo Redentor

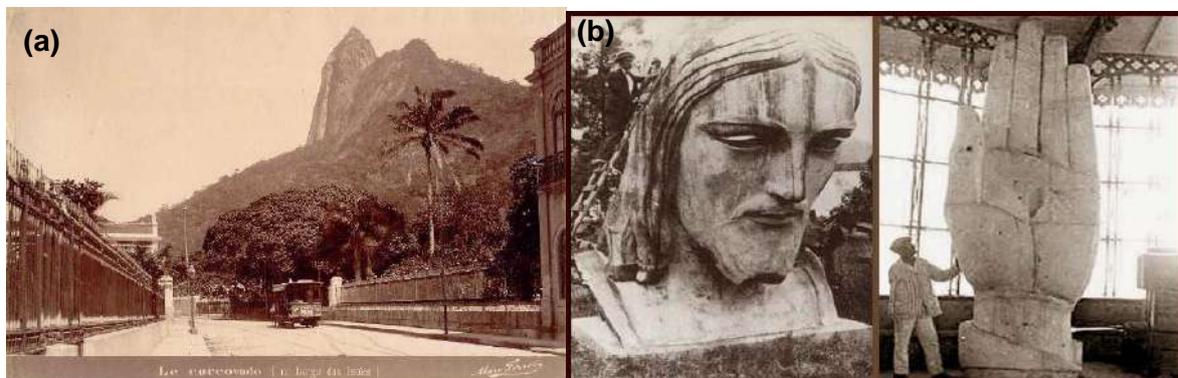
### 5.1. Histórico do Cristo Redentor

O Corcovado, antes chamado de Pináculo (ou Pico) da Tentação, em alusão a um monte bíblico, recebeu este nome no século XVII devido a sua forma que lembra uma

corcova ou corcunda. A primeira expedição oficial no Corcovado até o seu cume foi liderada por D. Pedro I em 1824. Foi apenas em 1921 que surgiu a idéia da construção do monumento ao Cristo Redentor para comemorar o centenário da Independência do Brasil.

Disputando com o Pão de Açúcar e o Morro de Santo Antônio, o Corcovado venceu como o maior dos pedestais para a construção do monumento. O engenheiro Heitor da Silva Costa foi o autor do projeto do Cristo Redentor, sendo a execução realizada pelo estatuário francês Paul Landowski e o desenho final do artista plástico Carlos Oswald.

A **Figura 21** ilustra como Corcovado era antes da construção do monumento, a cabeça e a mão do Cristo Redentor.



**Figura 21:** (a) Corcovado antes de Cristo, (b) Cabeça e Mão de Cristo em construção (catálogo da PALESSA)

Inaugurado em 12 de outubro de 1931, o monumento tem uma altura total de 38 metros, sendo 30 metros a altura da estátua, largura (mão a mão) de 30 metros, pesa 1145 toneladas e está a 710 metros do nível do mar. Hoje em dia o seu domínio pertence a Mitra Arquiepiscopal do Rio de Janeiro e suas restaurações são coordenadas pela Fundação Roberto Marinho em parceria com a Prefeitura, a Arquidiocese do Rio de Janeiro, o Banco Real/ABN AMRO Bank e a Gerdau.

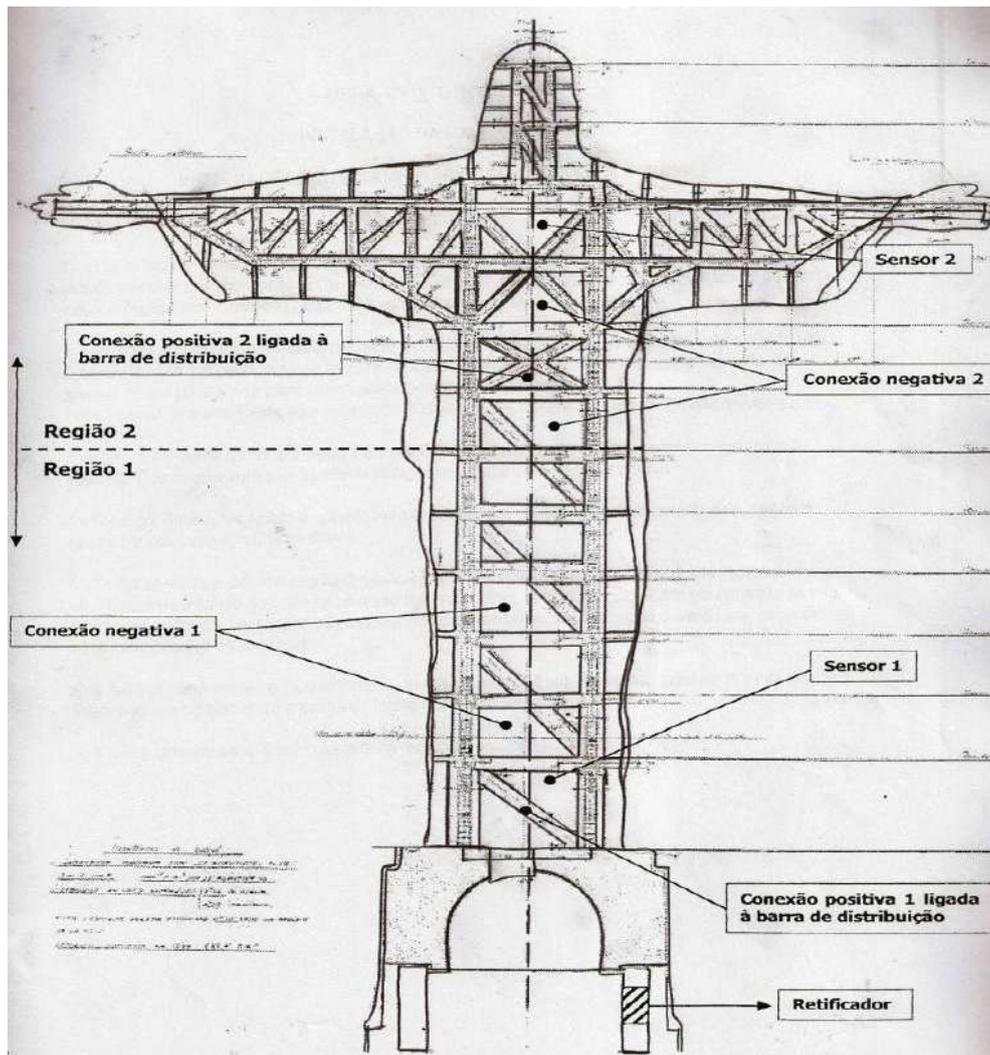
Exposta ao sol, a fortes ventos, chuvas e descargas elétricas, uma estátua de concreto situada no alto do morro do Corcovado se desgasta facilmente se não houver nenhum tipo de proteção. Até 1990 apenas reformas superficiais de recuperação eram realizadas no Cristo. Em 1999 iniciou-se o Projeto Cristo Redentor de Braços Abertos que contou com o apoio da Corrpro Inc., da Concrepoxi Engenharia, da Concremat Engenharia e Tecnologia, da GeoRio, dentre outros órgãos e empresas muito importantes.

O Projeto Cristo Redentor de Braços Abertos apresentou duas fases, a primeira começando em dezembro de 1999 e terminando em abril de 2000, na qual foi feita a restauração do mosaico em pedra-sabão e limpeza da escadaria e da balaustrada, a instalação da proteção catódica e a nova iluminação do monumento. A segunda fase, em que ocorreu a instalação dos elevadores, implantação das escadas rolantes, construção de novos sanitários, ampliação da plataforma de embarque do trem e instalação de placas direcionais e históricas, começa em abril de 2000 e termina em fevereiro de 2003.

## **5.2. A Proteção do Cristo Redentor**

A instalação do sistema de proteção da estátua do Cristo contra a corrosão ocorreu em 2000 durante a primeira fase do Projeto Cristo Redentor de Braços Abertos e foi executada pela empresa Corrpro Canada Inc.. A partir de 2003, a manutenção do sistema passou a ser feita pela empresa brasileira Palessa Engenharia de Corrosão Ltda.

O Sistema de Proteção Catódica tem como objetivo proteger a estrutura do Cristo Redentor contra a corrosão das armaduras de aço. Para isso, utiliza-se corrente impressa fornecendo um potencial contra a corrosão a toda extensão do monumento. O sistema é composto por duas telas de titânio revestidas por óxidos nobres ligadas a um retificador e dois eletrodos de referência de prata/cloreto de prata que objetivam o monitoramento do potencial eletroquímico da armadura. Somente através dessa medição pode ser assegurada a proteção catódica.



**Figura 22:** Estrutura do Cristo Redentor ( catálogo da PALESSA)

Como pode ser observado na **Figura 22**, para uma melhor eficiência do sistema de proteção com garantia de potencial suficiente para inibir a corrosão em toda extensão da estrutura, o Cristo foi dividido em duas regiões, uma na parte inferior até a cintura e a outra na parte superior compreendendo a cabeça e os braços.

As telas de titânio de cada região são todas interligadas e foram instaladas em contato com a superfície interna do manto e imersas por uma cobertura de argamassa com bastante água atuando como o eletrólito do sistema. As malhas de cada região são conectadas ao terminal positivo do retificador e a armadura é conectada ao terminal negativo do retificador. Foi instalado também um sensor em cada região com ambos conectados à armadura e ao retificador.

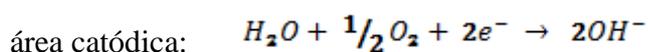
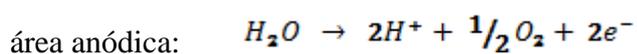
As características do retificador de Proteção Catódica utilizado estão na **Tabela 9**.

**Tabela 9:** Características do retificador utilizado no sistema de proteção do Cristo Redentor (catálogo PALESSA)

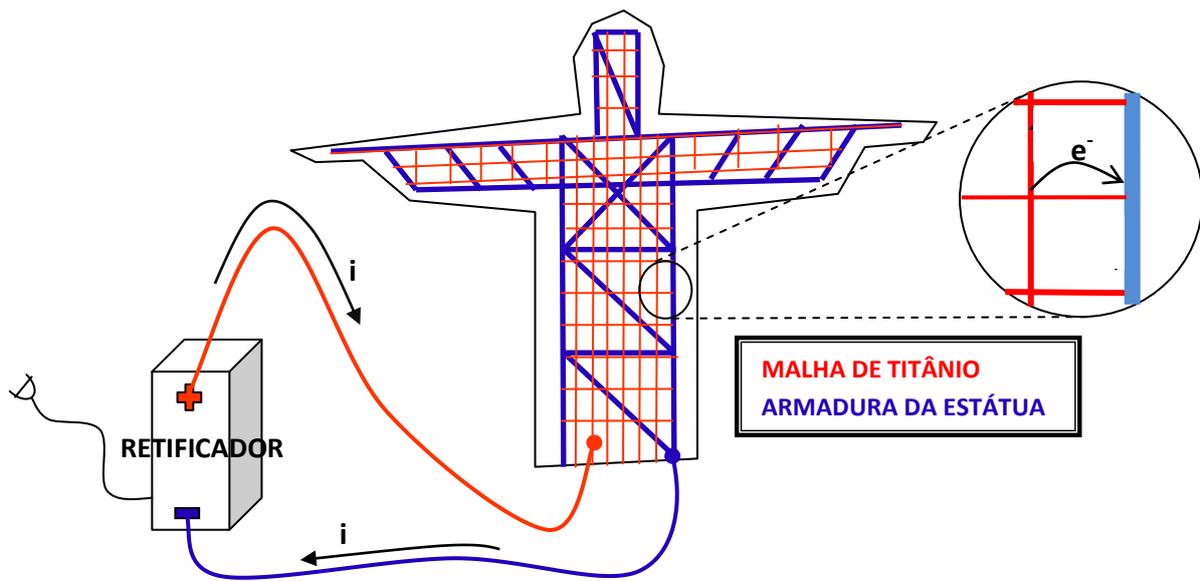
<b>RETIFICADOR CORRPRO C-000515</b>	
<b>Tipo</b>	Ajustado por Tap's
<b>Refrigeração</b>	Refrigerado a ar
<b>Alimentação</b>	115 Vca – 60 Hz
<b>Nº de Fases</b>	Monofásico
<b>Tensão de saída nominal (Canal I)</b>	18 Vcc
<b>Tensão de saída nominal (Canal II)</b>	18 Vcc
<b>Corrente de saída nominal (Canal I)</b>	6 Acc
<b>Corrente de saída nominal (Canal II)</b>	6 Acc
<b>Instrumentos</b>	Voltímetro e Amperímetro para cada saída
<b>Saídas</b>	Dois canais independentes
<b>Semi células</b>	Uma para cada canal de Ag/AgCl
<b>Proteção</b>	Um transformador isolador e supressores de transientes

A proteção funciona como uma pilha que tem o catodo (a armadura da estrutura), o anodo (a tela de titânio), o eletrólito (a argamassa) e o circuito metálico (a ligação feita entre a armadura e a tela de titânio). O retificador recebe corrente alternada e a transforma em corrente contínua para enviá-la às malhas de titânio. Esta corrente mantém o potencial de redução da malha menor que o da armadura, assim o titânio torna-se o anodo da pilha formada, ou seja, a região onde ocorrem as reações anódicas, e a armadura torna-se o catodo onde ocorrem reações de redução, ou seja, não há oxidação do metal. O titânio revestido por óxidos nobres é um anodo bastante inerte apresentando um desgaste desprezível, da ordem de  $6 \times 10^{-6}$  kg/A.ano, por isso tem uma grande durabilidade.

Em função da umidade naturalmente presente no concreto, as reações que devem se passar no sistema de proteção catódica por corrente impressa do Cristo Redentor são:



A **Figura 23** mostra um esquema de como ocorre a proteção no monumento.



**Figura 23:** Esquema da proteção catódica no Cristo Redentor

A corrente e a voltagem utilizadas na proteção do Cristo Redentor variam de acordo com o ambiente em que a estátua se encontra no momento. Se o Cristo está sob um clima ensolarado e seco, a corrente necessária para sua proteção é menor do que se estiver sob um clima úmido e chuvoso, pois neste último caso a resistividade do concreto diminui e o processo de corrosão ocorre de forma mais intensa sendo, portanto, necessária uma corrente maior para manter a polarização do sistema

Considerando 2,5 A e 5,0 V médias dos valores de corrente e tensão, respectivamente, fornecidos pela empresa que faz a manutenção (Palessa Engenharia de Corrosão), é possível calcular a quantidade de potência consumida para a proteção do Cristo.

$$P = V \cdot i = 5,0 \cdot 2,5 = 12,5 \text{ W}$$

$$E = P \cdot t = 12,5 \text{ W} \cdot 720 \text{ h} = 9000 \text{ Wh}$$

A energia gasta em 1 mês (720h) é igual a 9,0 kWh. Considerando um custo de energia (tendo como referência o mês de novembro/2010) igual a R\$ 0,48532 por kWh, encontra-se um gasto de R\$ 4,38 por mês com o sistema de proteção catódica no Cristo Redentor. Este valor não considera os gastos relativos à manutenção do sistema como, por exemplo, custos relativos à queima do retificador por descargas elétricas.

### **5.3. Manutenção do Cristo Redentor**

A manutenção é feita mensalmente, já que o monumento é atingido constantemente por descargas elétricas podendo ocorrer a queima do retificador. O técnico avalia se os dois canais correspondentes as duas telas de titânio apresentam a tensão e a corrente esperadas e medem o potencial do eletrodo de referencia ligado e desligado. A corrente fornecida para a proteção da armadura não podem exceder ao máximo recomendado porque além de gastar mais eletricidade, pode trincar a argamassa danificando a estrutura. Provavelmente isto ocorre devido a liberação de hidrogênio, provocando uma pressão interna causando estas trincas.

Para comprovar que a armadura está satisfatoriamente protegida, o potencial eletroquímico deve ser monitorado através de um eletrodo de referência ou semi-célula. No caso de estruturas em concreto, é comum a utilização de eletrodo de cobre/sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ), embora também seja possível a utilização de eletrodo de prata/cloreto de prata ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ). Dois critérios de proteção catódica podem ser admitidos: potencial mínimo de proteção, onde a estrutura é mantida no potencial de imunidade (vide Diagrama de Pourbaix – Figura 3) ou pode-se, ainda, polarizar catodicamente a estrutura em 100mV. Neste caso, a polarização não deve incluir qualquer queda ôhmica referente à resistividade do meio.

Dessa forma, o monumento ao Cristo Redentor mantém-se, depois de oito décadas de existência, em perfeitas condições para que turistas possam apreciar uma das sete maiores maravilhas do mundo moderno.

## **6. Conclusão**

O objetivo principal deste trabalho foi fazer uma revisão bibliográfica sobre os processos corrosivos que ocorrem em estruturas de concreto armado, bem como apresentar as possíveis técnicas de prevenção e controle da corrosão. Um importante aspecto tratado foi o estudo mercadológico das principais técnicas de proteção, além da limitação de cada uma delas. Foi abordado também como funciona o sistema de proteção no Cristo Redentor, que representa um marco nacional na utilização de proteção catódica por corrente impressa.

No decorrer do trabalho foi possível elucidar o conceito de corrosão como um processo eletroquímico. Qualquer tratamento que não aborde o ponto de vista eletroquímico tende a não ser eficiente, sendo assim uma forma paliativa de tratamento.

Os principais agentes que provocam a corrosão são os íons cloreto, que atacam a camada passivadora além de diminuir a resistividade do concreto, e a carbonatação, que diminui o pH do meio fazendo com que ocorra a despassivação da armadura.

Os fatores que afetam a velocidade de corrosão em armaduras de concreto são: a temperatura, pH, qualidade do concreto, heterogeneidades e aeração diferencial. Como foi possível perceber, qualquer gradiente de potencial que possa existir no sistema concreto-armadura permite a formação de uma pilha eletroquímica, gerando uma área catódica e uma anódica, causando a deterioração da área anódica.

A agressividade do meio tem um aspecto determinante quando se trata da durabilidade do concreto armado. Quanto mais agressivo for o meio em que se insere o concreto, maior deverá ser sua qualidade e as técnicas de corrosão deverão ser mais eficientes.

Depois de iniciada a corrosão, poucas técnicas podem ser utilizadas para proteger satisfatoriamente a armadura. A proteção catódica é bastante eficiente, podendo ser aplicada através de anodos galvânicos ou por corrente impressa. A definição por esta técnica dependerá de fatores técnicos e econômicos. Outra técnica promissora é a aplicação de inibidores na argamassa que promoveria a manutenção da passivação da armadura.

A corrosão em armaduras de concreto é um dos principais aspectos a se tratar na construção civil, sendo um fator determinante nos custos de manutenção da obra e podendo causar sérios desastres quando não tratados com cautela. Desta forma, a corrosão em armaduras de concreto armado ainda é um ramo que exige investimentos e pesquisas para que diminua cada vez mais a necessidade de gastos com a manutenção das estruturas.

## 7. Referências Bibliográficas

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - **ACI 222R-01: Proteção de Metais em concreto contra a corrosão.** Michigan, 2001

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C 642: Standard Test for Specific Gravity, Absorption and Voids en Hardened Concrete**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C 1152: Standard Test Methods for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.** Philadelphia, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C 1411: Standard Test Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixes in Graded Aggregate Road Mixes.** Philadelphia, 1992

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM G 57: Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity using the Wenner four-electrode Method.** Philadelphia, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 9778-87: Argamassa e concreto endurecidos.** Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica. Método de ensaio.

ANDRADE PERDRIX, Maria del Camen. – **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras** – Ed. PINI, 1992

CASCUDO, OSWALDO - **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas.** Goiânia, GO: Editora UFG, 1997.

CASCUDO, OSWALDO - **Inspeção e Diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão de armadura,** Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações - IBRACON, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005

CORRPRO CANADÁ, Inc. – Instalação do sistema de proteção do Cristo Redentor. – [www.corrpro.com](http://www.corrpro.com) – novembro de 2010

EGGERS M.; OLIVEIRA, S.P.F. **Novas técnicas eletroquímicas de recuperação de estruturas de concreto: realcalinização e dessalinização ( extração de cloretos )** - IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Porto Alegre - 1997

FELTRE, Ricardo - **Química Físico-química**, 3<sup>a</sup> ed., Editora Moderna Ltda. Volume 2. São Paulo/SP. 1993

FIGUEIREDO, Enio Pazini - **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto**, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações - IBRACON, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005

FREIRE, Karla Regina Rattmann - Dissertação de mestrado sobre **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto** – 2005

GENTIL, V. – **Corrosão** – Ed. LTC, 2007

GONÇALVES, A.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. - **Procedimientos de reparación y protección de armaduras** - 2003.

HELENE, P. – **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado** – Ed. PINI, 1986

HOPE, et AL - **Corrosion inhibitors for use in concrete**. - ACI Materials Journal, 1989

ICZ – Instituto de Metais Não-ferrosos – [www.icz.com.br](http://www.icz.com.br) – novembro de 2010

IOPE – Instrumentos de Precisão – Literatura , [www.iope.com.br](http://www.iope.com.br) – dezembro de 2010

KAEFER, L.F. – A evolução do concreto armado - 1998

MONTEIRO, E. B. - **Reabilitação de estruturas de concreto**, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, - IBRACON, São Paulo. 2005

Norma UNE 80240-86 – **Método de ensaio de cimentos. Analisis químico. Determinación de cloruros. Método volumético (Volhard)**, Madrid.

Norma UNE 83120-88 – **Áridos para hormigones. Determinación quantitativa de los compuestos de azufre**. Madrid.

PALESSA ENGENHARIA DE CORROSÃO Ltda. – Manutenção do sistema de proteção do Cristo Redentor – [www.palessa.com.br](http://www.palessa.com.br) – novembro de 2010

PETRUCCI, Eladio G. R. - **Concreto de Cimento Portland** – Ed. Globo, 1982

REITEC ENGENHARIA – Reposição de argamassa - [www.reitec.com.br](http://www.reitec.com.br) – janeiro de 2011

RIBEIRO, Sidnea E. C. – Tese de doutorado sobre **Análise da confiabilidade de vigas de concreto armado com plástico reforçado por fibras** – 2009

RODRIGUES, P. P. F. - **Parâmetros de dosagem do concreto ET-67** - 3ª. edição. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo - 1998.

ROGERTEC – Informações sobre anodo de sacrifício – [www.rogertec.com.br](http://www.rogertec.com.br) – janeiro de 2011

STEPHELSON,L.D., LAWRENCE,D.,KUMAR,A., Materials Performance, vol 50, no.1, janeiro 2011