

## **Monografia**

# **"MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA DO CONCRETO ARMADO COM FOCO NA OXIDAÇÃO DA FERRAGEM"**

Autor: Guilherme Mendes Costa

Orientador: Prof. Ayrton Vianna Costa

Fevereiro de 2013

Guilherme Mendes Costa

**“MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA DO CONCRETO ARMADO COM FOCO NA  
OXIDAÇÃO DA FERRAGEM”**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil  
da Escola de Engenharia UFMG

Ênfase: Gestão e Tecnologia na Construção Civil

Orientador: Ayrton Vianna Costa

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2013

## SUMÁRIO

### Conteúdo

<i>Monografia</i> .....	1
Universidade Federal de Minas Gerais .....	1
Curso de Especialização em Construção Civil .....	1
LISTA DE FIGURAS .....	5
LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS .....	8
RESUMO .....	10
1. INTRODUÇÃO .....	11
2. OBJETIVO .....	13
3. MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA DO CONCRETO ARMADO COM FOCO NA OXIDAÇÃO DA FERRAGEM .....	14
3.1 <i>Conceito de concreto</i> .....	14
3.2 <i>Concreto armado</i> .....	15
3.3 <i>Vida útil e durabilidade</i> .....	17
3.4 <i>Definição de corrosão</i> .....	18
3.5 <i>Generalidades sobre a corrosão</i> .....	19
3.6 <i>Mecanismos da corrosão de armaduras</i> .....	20
3.6.1 <i>Oxidação</i> .....	21
3.6.2 <i>Corrosão propriamente dita</i> .....	22
3.7 <i>Corrosão em meio aquoso</i> .....	22
3.7.1 <i>Deve existir um eletrólito</i> .....	25
3.7.2 <i>Deve existir uma diferença de potencial</i> .....	27
3.7.4 <i>Deve existir oxigênio</i> .....	28
3.7.5 <i>Podem existir agentes agressivos</i> .....	29

<i>3.8 Principais manifestações de corrosão</i> .....	32
3.8.1 Corrosão generalizada ou uniforme .....	32
3.8.2 Corrosão localizada .....	33
3.8.3 Corrosão sob tensão .....	34
3.8.4 Corrosão galvânica .....	35
<i>3.9 Principais técnicas de recuperação</i> .....	36
3.9.1 Recursos Especiais .....	39
3.9.2 Metodologias para recuperação de estrutura .....	39
<i>3.10 Principais parâmetros a serem considerados</i> .....	49
3.10.1 Risco estrutural: .....	49
3.10.2 Risco funcional: .....	49
3.10.3 Risco durabilidade .....	49
4 – CONCLUSÃO .....	50
5 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	53
6 – BIBLIOGRAFIA .....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aguiar J. – Surgimento das zonas ânodo e cátodo – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	14
Figura 2 – Aguiar J. – Formação de corrosão ou pilha – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	243
Figura 3 – Aguiar J. – Célula de corrosão em concreto armado – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	254
Figura 4 – Aguiar J. – Desplacamento do concreto devido a expansão dos óxidos gerados pela corrosão – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	34
Figura 5 – Aguiar J. – corrosão generalizada – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	332
Figura 6 – Aguiar J. – A figura mostra a corrosão sob tensão em uma viga protendida – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto. ....	343
Figura 7 – Aguiar J. – corrosão galvânica – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	354
Figura 8 – Aguiar J. – A figura mostra uma corrosão galvânica e um pilar em prédio residencial – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto. ....	385
Figura 9 – Aguiar J. – Representação Gráfica das Atividades de Reparo – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	398
Figura 10 – Aguiar J. – Processos de uma Estação a ser Recuperada – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	40
Figura 11 – Aguiar J.– Identificação das Áreas de Reparo – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	40

Figura 12 – Aguiar J. – Remoção do Concreto Deteriorado – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	41
Figura 13 – Aguiar J. – Delimitação da Área de Reparo – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	41
Figura 14 – Aguiar J. - Limpeza da Superfície – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	421
Figura 15 – Aguiar J. – Limpeza das armaduras – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	42
Figura 16 – Aguiar J. – Proteção das armaduras – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	43
Figura 17 – Aguiar J.– Complemento de Armdura – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	433
Figura 18 – Aguiar J. – Fixação de Armadura Complementar – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	44
Figura 19 – Aguiar J. – Preparo do substrato – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	44
Figura 20 – Aguiar J. – Aplicação de ponte de aderência – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	44
Figura 21 – Aguiar J. – Saturar o substrato com água – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	45
Figura 22 – Aguiar J. – Mistura da argamassa de reparo – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	45
Figura 23 – Aguiar J. – Aplicação de argamassa polimérica – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	46

Figura 24 – Aguiar J. – Aplicação manual da argamassa polimérica – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	46
Figura 25 – Aguiar J. – Projeção de argamassa – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	47
Figura 26 – Aguiar J. – Aplicação de graute de cimento – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	47
Figura 27 – Aguiar J. – Cura das superfícies – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	48
Figura 28 – Aguiar J. – Proteção da superfície das estruturas – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto.....	<u>48</u>

## LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS

A = área de atuação de uma força

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c = água / cimento

°C = graus Celsius

Ca(OH)<sub>2</sub> = hidróxido de cálcio

Cl<sup>-</sup> = cloreto

CO<sub>2</sub> = dióxido de carbono

C<sub>3</sub>S = silicato de tricálcio

C<sub>2</sub>S = silicato de bicálcio

cm<sup>2</sup> = centímetro quadrado

d = diâmetro

E = módulo de elasticidade

ε = deformação específica

Fe<sup>++</sup> = ferro

Fig. = figura

H<sub>2</sub>S = gás sulfídrico



$\rho$  = densidade do material

$\sigma$  = tensão

Kg = quilograma

Kgf = quilograma força

$m^3$  = metro cúbicos

NBR = Norma Brasileira de Regulamentação

$NH_4^+$  = cátion amônio

$NO_3$  = nitrito

pH = potencial hidrogeniônico

Prof. = professor

% = porcentagem

$S^-$  = sulfetos

$SO_2$  = dióxido de enxofre

$SO_3$  = trióxido de enxofre

$SO_4^{2-}$  = Íon Sulfato

U.R. = umidade relativa

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo abordar os problemas nas estruturas de concreto armado quando um processo de corrosão se instala nas armaduras. Essas manifestações, da corrosão do aço, vêm, frequentemente, acontecendo e suas consequências nas armaduras de concreto são degenerativas. O processo de corrosão que sofre a armadura de concreto, na maioria das vezes, pode ser verificado quando a camada de concreto responsável pela sua proteção não atinge a espessura adequada. Visando à prevenção das falhas construtivas, bem como a ampliação da vida útil dessas estruturas de concreto, as corrosões do aço no concreto e as principais técnicas de recuperação das armaduras serão abordadas.

Palavras-chaves: Concreto, corrosão, armaduras, proteção, vida útil, recuperação.

## INTRODUÇÃO

A corrosão da armadura do concreto armado é o deterioramento químico ou estrutural, provocado pela ação de agentes do meio ambiente, ou seja, é a reação química ou eletroquímica do material nas condições em que se vive.

Os principais agentes agressivos à armadura são o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e os cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), que não são agressivos ao concreto. Por outro lado, os agentes agressivos ao concreto são os ácidos, os sulfatos e as reações álcali-agregado, que não serão abordados neste trabalho.

De fato, a resistência da estrutura de concreto à ação do meio e ao uso dependerá, no entanto, da durabilidade do concreto e da integridade da armadura, a fim de obter-se um desempenho adequado na estrutura de concreto. Em outras palavras, qualquer um dos dois que se deteriore, comprometerá a estrutura como um todo.

Com efeito, a recuperação desse tipo de manifestação patológica é delicada e requer mão de obra especializada. O processo em questão é constituído basicamente por três etapas: corte de todo o concreto com problema e limpeza rigorosa da armadura, análise criteriosa da possível redução de secção transversal das armaduras atacadas e reconstrução do cobrimento das armaduras, de preferência com concreto bem adensado, a fim de impedir que agentes agressivos voltem a atacar.

Assim, a reação química ou eletroquímica na armadura do concreto armado dependerá do uso dos materiais a adotar, da durabilidade, dos métodos construtivos (que devem ter o desempenho esperado), do espaço de tempo da obra e a agressividade ambiental da estrutura.

## **2. OBJETIVO**

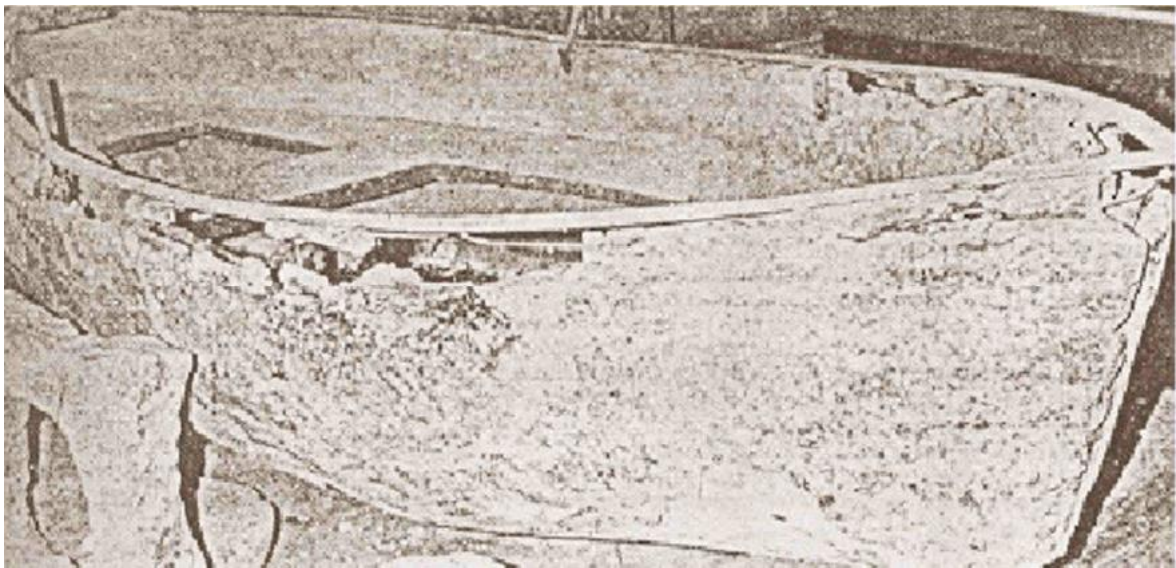
O objetivo da presente monografia é fazer uma análise da possibilidade de combater a perda da durabilidade, principalmente com problemas de corrosão de armaduras, como resultado do envelhecimento precoce das construções existentes. Além dos aspectos teóricos e conceituais, serão apresentados casos reais de estrutura danificada e exemplos utilizados nas recuperações.

### **3. MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA DO CONCRETO ARMADO COM FOCO NA OXIDAÇÃO DA FERRAGEM.**

#### **3.1 Conceito de concreto**

O concreto é um material de construção que tem uma excelente performance à compressão, porém sua performance torna-se muito reduzida quando submetido a tensões de tração.

Para contornar esse problema, presume-se que, em 1850, Joseph Louis Lambot tenha efetuado as primeiras experiências práticas do efeito da introdução de ferragens no interior do concreto com a exposição do seu barco em concreto armado em Paris.



**Figura 1 – Aguiar J. – Apostila História do Concreto Armado – Remanescente de uma das canoas de Lambot.**

Com a descoberta da fabricação do aço, os estudos sobre concreto armado ganharam impulsos e em 1877 Hyatt (Inglaterra) e Monier (França) desenvolveram os primeiros estudos do uso do concreto armado na construção civil.

Em 1903 foi construído o primeiro arranha-céu em concreto armado com 16 andares e também a primeira norma mundial, que foi na Suíça.

Com a introdução do reforço do aço no concreto, a estrutura quando endurecida é capaz de suportar maiores tensões de tração, compressão e cisalhamento.

### **3.2 Concreto armado**

O aço serve como um material de reforço adequado ao concreto, pois esse metal apresenta uma ligação adesiva relativamente forte com o concreto curado. Essa adesão pode ser melhorada pela incorporação de mossas ou saliências na superfície do membro de aço, o que permite um maior grau de intertravamento mecânico.

No Brasil atual o concreto armado é o material de construção mais consumido, com isso, a tecnologia de fabricação do concreto evoluiu, com a melhoria das propriedades dos aditivos, adições e ligantes, o que possibilita uma redução significativa nas seções das peças de concreto armado em função do aumento das resistências mecânicas.

Entretanto, ao contrário disso, o conhecimento e o progresso das execuções construtivas adequadas não acompanhou o avanço tecnológico. De fato, o crescimento da atividade de construção proporcionou seguidos descuidos nas obras, o que reduziu a capacidade do concreto em proteger as armaduras contra a corrosão.

Vale lembrar, que até o final da década de 80, a resistência à compressão ainda era, praticamente, o único parâmetro adotado para avaliar a qualidade do concreto. Em função disto, ocorreu uma degradação mais rápida nas estruturas de concreto armado, obrigando as pessoas que trabalham com este material a definir novos parâmetros para garantir o seu desempenho.

Para melhor performance do concreto armado, deve-se atuar em todas as fases de sua execução, a partir do projeto arquitetônico e estrutural, execução da obra, inspeção e manutenção. Segundo essa nova abordagem da performance do concreto, os envolvidos devem estar cientes de que os materiais não são perenes, mas envelhecem, precisam de manutenção e tratamento e podem ser reabilitados. Por tais razões, provém um conceito muito utilizado que é a durabilidade do concreto.



### **3.3 Vida útil e durabilidade**

A associação destes dois conceitos é inevitável, sendo considerada pela NBR6118 como:

**Vida útil:** É o período de tempo durante o qual as características das estruturas de concreto são mantidas. Desse modo, os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor são atendidos, bem como os requisitos de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais. Ou melhor, vida útil é o período durante o qual a estrutura é capaz de garantir não apenas a estabilidade, mas todas as funções para as quais foram projetadas.

**Durabilidade:** Consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Logo, uma estrutura só pode ser considerada durável se sua vida útil for pelo menos igual à vida útil estabelecida na fase de projeto.

Compreender uma construção durável requer um conjunto de decisões e procedimentos que garantam à estrutura e aos materiais que a compõem um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção. Sendo que a durabilidade das estruturas está relacionada com os indicadores de qualidade dos

materiais, classificando-os como durável ou não e a capacidade de transporte dos líquidos e gases contidos no meio ambiente para o interior do concreto.

Enfim, a abordagem do mecanismo de estudo da durabilidade passa pela avaliação e compatibilização entre a agressão ambiental, por um lado, e a “qualidade” do concreto e da estrutura, por outro, sendo este cenário definido à luz do tempo e do custo da estrutura.

### **3.4 Definição de corrosão**

Helene P. (1986) define a corrosão como a interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica. Afinal, trata-se de um processo de oxidação, ou seja, de corrosão, que representa a lenta destruição do metal no concreto.

São diversos os processos que originam a corrosão e em muitas situações não é fácil, nem rápido, justificar e explicar o porquê de uma estrutura corroída. A justificativa mais cômoda, em geral, é atribuir o fato à falta de cobrimento adequado de concreto, tomando-se como referência as recomendações de normas e regulamentos oficiais. No caso brasileiro, geralmente, recorre-se às recomendações da NBR-6118(NB-1): “Projeto e execução de Obras de Concreto Armado”. Publicada em 1978, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Helene P. (1986) menciona que essas recomendações são, no entanto, de caráter geral e não devem ser tomadas como únicas nem como as melhores para todas as situações. Isso poderia, por exemplo, inviabilizar alguns processos construtivos que só são possíveis, técnica e comercialmente, utilizando-se cobrimentos inferiores aos atualmente recomendados pela NBR-6118, casos que dependerão das propriedades intrínsecas do concreto e do meio ambiente, no qual se insere a estrutura. Portanto, essas considerações visam mostrar a importância desses fatores no problema da proteção das armaduras de concreto armado.

### **3.5 Generalidades sobre a corrosão**

Atualmente, são muitas as vezes em que um engenheiro civil se vê diante de um problema de corrosão de armaduras nas estruturas de concreto armado. Helene P. (1986) cita que o cobrimento de concreto tem a finalidade de proteger fisicamente a armadura e propiciar um meio alcalino elevado que evite a corrosão por perda de passivação do aço. Essa proteção depende, portanto, essencialmente, das características e propriedades intrínsecas do concreto. Aos diferentes concretos, mantido o mesmo nível de proteção, correspondem diferentes cobrimentos.

Por outro lado, Helene P. (1986) mostra que o meio ambiente, no qual se insere a estrutura e que, em última instância, é o agente promotor da eventual corrosão, também deve ser considerado. É de se esperar que regiões com atmosfera seca e “pura” não agredam tanto a estrutura quanto atmosferas úmidas e fortemente contaminadas por gases ácidos e fuligem. Como manter uma mesma exigência de

cobrimento sem considerar esses fatores regionais? Aumentar o cobrimento, em geral, significa aumentar as dimensões das peças ou manter as dimensões e aumentar as secções de aço, ou seja, aumentar o custo da estrutura. Também a microrregião, onde se encontra o componente estrutural e a própria natureza do componente (laje, viga ou pilar e paredes) devem ser levados em conta. Lajes em ambientes úmidos podem sofrer muito mais o fenômeno de condensação do que elementos verticais. Da mesma forma, pilares semienterrados poderão corroer-se mais rapidamente que pilares em ambientes interiores e secos.

Com estas considerações, Helene P. (1986) visa mostrar a importância desses fatores no problema da proteção das armaduras de concreto armado, sugerindo alguns aspectos principais de engenharia preventiva e corretiva. Para tal, analisaremos simplificadamente o mecanismo da corrosão e algumas propriedades básicas dos concretos, fornecendo as ferramentas necessárias à interpretação dos fenômenos e ao entendimento da manifestação patológica das estruturas de concreto armado.

### **3.6 Mecanismos da corrosão de armaduras**

Helene P. (1986) define os dois principais processos de corrosão que podem sofrer as armaduras de aço para concreto armado: a oxidação e a corrosão propriamente dita.

### 3.6.1 Oxidação

Helene P. (1986) explica que a corrosão por oxidação diz respeito ao ataque provocado por uma reação gás-metal, com formação de uma película de óxido. Esse tipo de corrosão é extremamente lento à temperatura ambiente e não provoca deterioração substancial das superfícies metálicas, salvo se existirem gases extremamente agressivos na atmosfera.

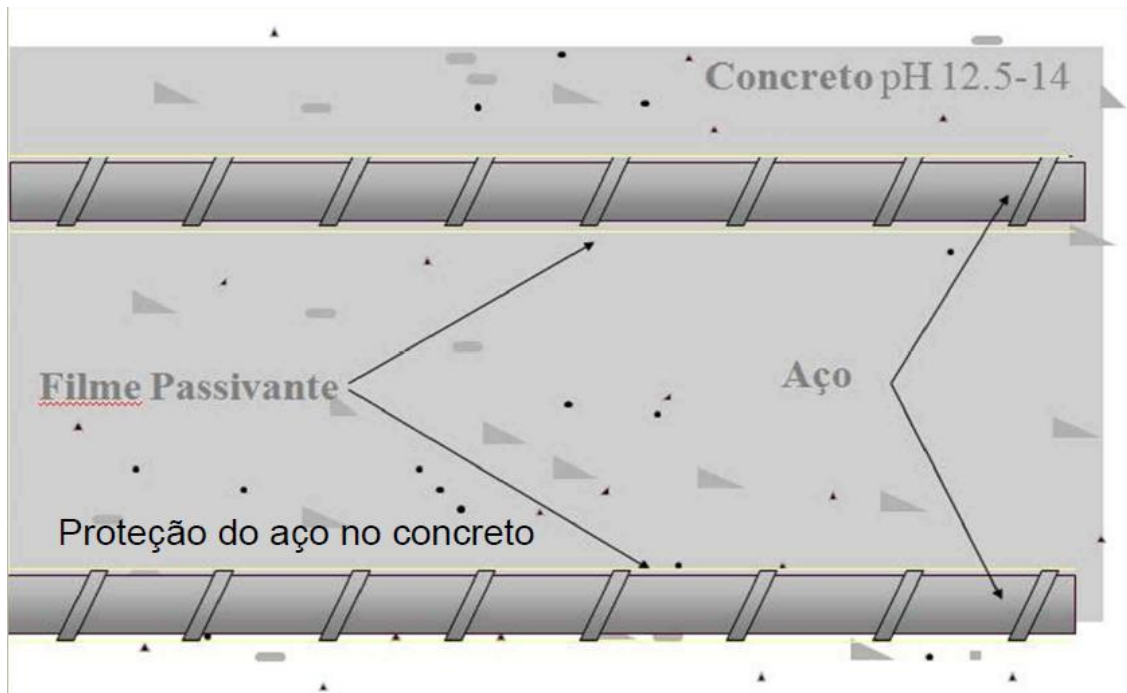
Esse fenômeno ocorre durante a fabricação de fios e barras de aço. Ao sair do trem de laminação, com temperaturas da ordem de 900°C, o aço experimenta uma forte reação de oxidação com o ar ambiente. A película que se forma sobre a superfície das barras é compacta, uniforme e pouco permeável, podendo servir até de proteção relativa das armaduras contra a corrosão úmida posterior, de natureza preponderantemente eletroquímica. Antes do aço sofrer trefilação a frio, para melhoria de suas propriedades, a película, denominada carepa de laminação, deve ser removida por processo físico, do tipo decalaminação, ou químicos, do tipo decapagem com ácidos. A película inicial é substituída por outra de fosfato de zinco ou de hidróxido de cálcio, que é utilizada como lubrificante do processo podendo ser, à semelhança da primeira, débeis protetoras do aço contra a corrosão úmida. Por não ser este o fenômeno principal de corrosão nas estruturas convencionais, ele não será aprofundado no presente trabalho.

### **3.6.2 Corrosão propriamente dita**

Por corrosão, propriamente dita, conforme apresentado por Helene P. (1986), entende-se o ataque de natureza preponderantemente eletroquímica, que ocorre em meio aquoso. A corrosão acontece quando é formada uma película de eletrólito sobre a superfície dos fios ou barras de aço. Essa película decorre da presença de umidade no concreto, salvo situações especiais e muito raras, tais como dentro de estufas ou sob ação de elevadas temperaturas ( $> 80^{\circ}\text{C}$ ) e em ambientes de baixa umidade relativa (U.R.  $< 50\%$ ). Esse tipo de corrosão é também responsável pelo ataque que sofrem as armaduras antes de seu emprego, quando ainda armazenadas no canteiro. É o tipo de corrosão que o engenheiro civil deve conhecer e com a qual deve se preocupar. É melhor e mais simples preveni-la do que saná-la depois de iniciado o processo.

### **3.7 Corrosão em meio aquoso**

Helene P. (1986) explica que o mecanismo de corrosão do aço no concreto é eletroquímico, tal qual a maioria das reações corrosivas em presença de água ou ambiente úmido (U.R.  $> 60\%$ ).



**Figura 2 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto – Surgimento das zonas ânodo e cátodo**

Essa corrosão conduz à formação de óxidos/hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, denominados ferrugem, e só ocorre nas seguintes condições:

- Deve existir um eletrólito;
- Deve existir uma diferença de potencial;
- Deve existir oxigênio;
- Podem existir agentes agressivos.

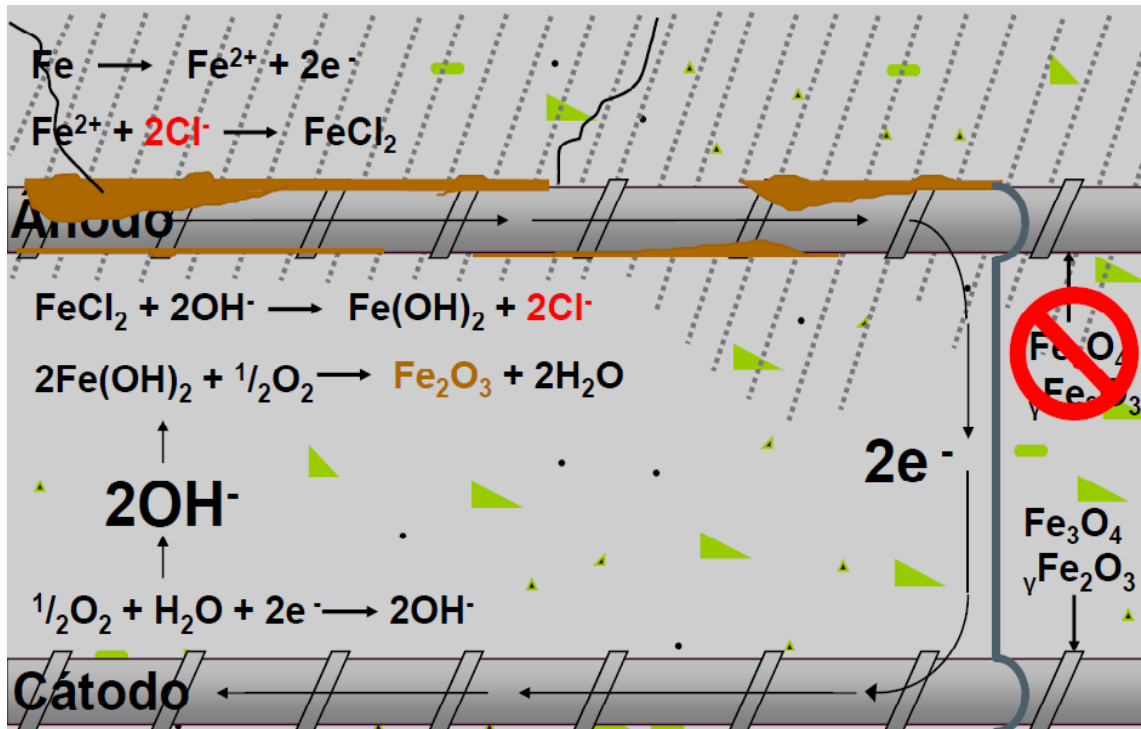


Figura 3 - Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Formação de corrosão ou pilha.

Helene P. (1986) relata também que a formação de uma célula de corrosão ou pilha pode ocorrer como indicado nas figuras 2 e 3. Essas figuras explicam, graficamente, o fenômeno. Como em qualquer outra célula, há um ânodo, um catodo, um condutor metálico e um eletrólito. Qualquer diferença de potencial entre as zonas anódicas e catódicas acarreta o aparecimento de corrente elétrica. Dependendo da magnitude dessa corrente e do acesso de oxigênio, poderá ou não haver a corrosão.

A corrosão metálica, quando ocorre em meio aquoso, caracterizando um fenômeno eletroquímico, supõe a existência de uma reação de oxidação e uma de redução. Nesse caso, a circulação de íons ocorre através do eletrólito. Assim, sobre a superfície do metal, são geradas duas zonas, atuando como ânodo aquela em que





cálcio), que é solúvel em água, também forma nos poros e capilares uma solução saturada que constitui um bom eletrólito.

Como referência, tem-se os seguintes teores de umidade de equilíbrio no concreto normal, a 25°C, em relação à umidade relativa do ambiente:

- Para U.R. = 65% → teor de umidade de equilíbrio  $\cong$  4% ( $\cong$  95 litros de água/m<sup>3</sup>);
- Para U.R. = 95% → teor de umidade de equilíbrio  $\cong$  8% ( $\cong$  190 litros de água/m<sup>3</sup>).

Observa-se que a umidade de equilíbrio pode ser calculada, moendo-se certa porção de concreto e deixando-a secar em uma estufa ventilada a 105°C até constância de peso. A diferença de massa antes da moagem e após a moagem e secagem, em relação à massa inicial, expressa em porcentagem, é a umidade de equilíbrio.

Para U.R. = 40% → teor de umidade de equilíbrio  $\cong$  3% ( $\cong$  70 litros de água/m<sup>3</sup>);

Como se pode notar, sempre há água no concreto e, conseqüentemente, esta sempre pode constituir-se em um eletrólito.

### 3.7.2 Deve existir uma diferença de potencial

Helene P. (1986) explica que quando o aço é submerso em uma solução, parte dos átomos de ferro tende a passar à mesma, transformando-se em cátions ferro ( $Fe^{++}$ ), com carga elétrica positiva, deixando a armadura com carga negativa e criando o que se conhece como potencial de equilíbrio ou reversível. Esse fato, por si só, não gera força eletromotriz, mas, em presença de reagentes capazes de sofrer redução, ou seja, capazes de combinar com o elétron liberado na reação de formação do íon ferroso, pode ocorrer a formação de uma pilha ou célula de corrosão eletroquímica.

Qualquer diferença de potencial produzida entre dois pontos da barra, por diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão no concreto e no aço, é capaz de desencadear pilhas ou cadeias de pilhas conectadas em série. Na maioria das vezes, formam-se micropilhas que podem até mesmo alternar de posição os pólos, ocasionando a corrosão generalizada.

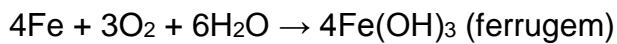
Quando os ânodos são de dimensões reduzidas e estáveis, eles podem produzir a chamada corrosão localizada, intensa e perigosa.

A corrosão localizada é rara em concreto armado. Ela é mais frequente em fios e cordoalhas para concreto protendido. Em alguns casos pode ser chamada corrosão sob tensão, cuja principal característica é romper sem aviso, ou seja, ocasionar uma

ruptura frágil em uma secção definida, sem que haja uma prévia deformação da estrutura que alerte e permita corrigir o problema a tempo, ensina Helene P. (1986).

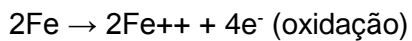
### 3.7.3 Deve existir oxigênio

Helene P. (1986) acrescenta que é necessário que haja oxigênio para a formação de ferrugem (óxido/hidróxido de ferro), além do eletrólito representado pela umidade e o hidróxido de cálcio, sem o que não é possível obter a seguinte reação:



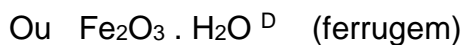
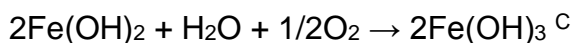
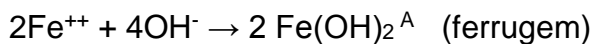
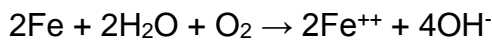
Na realidade, as reações são mais complexas e o produto de corrosão, denominado ferrugem, nem sempre é  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , mas sim uma gama de óxidos e hidróxidos de ferro resultantes das seguintes etapas de corrosão:

- Nas zonas anódicas, o ferro perde elétrons ocasionando a dissolução do metal:



- Oxidação é o processo em que ocorre o aumento do número de cargas positivas de um íon, ou processo de combinação de uma substância com o oxigênio, ou seja, uma perda de elétrons.
- Nas zonas catódicas, em meios neutros e aerados, ocorre:  $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$  (redução) (PAULO HELENE, 1986)

Redução é o processo em que ocorre a diminuição do número de cargas positivas de um íon, ou seja, um ganho de elétrons. Em consequência as seguintes reações de corrosão com formação de ferrugem ocorrem: (PAULO HELENE, 1986).



A = Hidróxido ferroso fracamente solúvel; B = Óxido ferroso hidratado (expansivo); C = Hidróxido férrico (expansivo); D = Óxido férrico hidratado – goethita ou lepidocrocita (expansivo).

### 3.7.4 Podem existir agentes agressivos

Helene P. (1986) escreve que a corrosão pode ser acelerada por agentes agressivos contidos ou absorvidas pelo concreto. Entre eles podem-se citar os íons sulfetos ( $\text{S}^{--}$ ), os íons cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), os nitritos ( $\text{NO}_3^-$ ), o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), o cátion amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ), fuligem etc. Os agentes agressivos não permitem a formação ou quebram a película já existente de passivação do aço, acelerando a corrosão. Esses elementos podem atuar como catalisadores, conforme exemplificado a seguir.

Íon cloreto ( $\text{Cl}^-$ )

$\text{Fe}^{++} + 3\text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_3$  e por hidrólise

$\text{FeCl}_3 + 3\text{OH}^- \rightarrow 3\text{Cl}^- + \text{Fe}(\text{OH})_3$  (ferrugem)

Hidrólise é a reação de fixação de íons hidroxila ou hidrogênio em um composto, em presença de água. Essa reação continua sem consumir o ânion cloreto. Pequenas quantidades de cloretos podem, portanto, ser responsáveis por grandes corrosões.

A partir do instante em que a armadura é exposta à atmosfera, por fissuração do concreto e/ou por lascamento, pode também passar a sofrer a ação do íon sulfato, como se mostra a seguir.

Íon sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

$2\text{Fe} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

$2\text{FeSO}_4 + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Fe}(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O}$

$\text{Fe}(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (ferrugem)

Essa reação continua sem consumir o íon sulfato, sendo as formas  $\text{FeSO}_4$  e  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  intermediárias e instáveis.

Em princípio, qualquer substância ácida (gases, líquidos e sólidos), que penetre na estrutura porosa do concreto ou venha a se depositar na superfície de armaduras parcial ou totalmente expostas, contribui para o aumento do risco de corrosão.

Quando se tratar de armadura já em início de corrosão, essas substâncias podem acelerar o processo.

Em síntese, para que ocorra o processo corrosivo é necessária a presença simultânea de oxigênio e umidade. A presença destes dois componentes acelera fortemente o processo, e a ausência deles detém o processo completamente. Vale lembrar que em um concreto com uma umidade relativa abaixo de 60%, provavelmente não haverá corrosão. O mesmo acontece quando o concreto estiver saturado com água. A umidade ótima para ocorrer o processo encontra-se entre 70% a 80%, sendo que, acima deste nível, a difusão de oxigênio é reduzida consideravelmente.

É importante destacar que é necessário não só considerar se um dado metal está em corrosão ou não, como também considerar a velocidade deste processo, já que a corrosão pode evoluir tão lentamente que o seu efeito poderá ser insignificante. Nesse processo corrosivo influem, além da natureza do eletrólito, o conteúdo de oxigênio e a resistividade do meio, pois o concreto fissurado causa a corrosão que se expande e como consequência ocorre o deslocamento do concreto, tal como mostra a figura seguinte.



**Figura 5 - Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto – Desplacamento do concreto devido à expansão dos óxidos gerados pela corrosão.**

### **3.8 Principais manifestações de corrosão**

#### **3.8.1 Corrosão generalizada ou uniforme**

Aguiar J. (2011) cita que a corrosão generalizada ou uniforme ocorre devido à perda generalizada de película de passivação, resultante da frente de carbonatação no



concreto e/ou presença excessiva de cloretos. A foto abaixo mostra uma corrosão generalizada, que atinge todo pilar de uma área industrial.



**Figura 6 - Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto – corrosão generalizada**

### **3.8.2 Corrosão localizada**

Aguiar J. (2011) menciona que a corrosão localizada forma-se por dissolução localizada da película de passivação, tipicamente causada pela penetração de íons cloretos no meio, vindos do exterior ou pertencente a algum constituinte do concreto. Forma-se uma célula de corrosão onde existe uma área passivada intacta, atuando como um cátodo, e uma pequena área atuando como ânodo, que perdeu a película passiva e onde se reduz o oxigênio dissolvendo o aço. As pequenas áreas

despassivadas, conhecidas pelo nome de *píte*, podem gerar condições suficientes para a sua continuidade e crescimento, e decrescem o pH localmente.

### 3.8.3 Corrosão sob tensão

Aguiar J. (2011) expõe que a corrosão sob tensão se caracteriza por ocorrer em aços submetidos a elevadas tensões, em cuja superfície é gerada uma microfissura que progride muito rapidamente, provocando uma ruptura brusca e frágil do metal, ainda que a superfície não mostre evidências de ataques. Esse tipo de corrosão acontece, preferencialmente, em concretos protendidos, sendo um fenômeno muito específico e normalmente associado à má qualidade do concreto (bainhas mal preenchidas, lixiviação do concreto) ou a presença de determinados íons, como mostra a figura que segue.



**Figura 7 - Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto – A figura mostra a corrosão sob tensão em uma viga protendida.**

### 3.8.4 Corrosão galvânica

Aguiar J. (2011) explica que este tipo de corrosão ocorre quando existem diferentes tipos de metal no mesmo meio eletrolítico. O metal com menos atividade eletroquímica é corroído. Uma das situações mais comuns encontradas é o uso de alumínio dentro do concreto armado. A foto seguinte mostra uma corrosão galvânica de um pilar em um prédio residencial.



Figura 8 - Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto – Corrosão galvânica

### 3.9 Principais técnicas de recuperação

Helene P. (1986) menciona que a recuperação deste tipo de fenômeno patológico – corrosão de armaduras – é delicada e requer mão-de-obra especializada. Consiste basicamente de três etapas:

- Limpeza rigorosa, de preferência com jato de areia e apicoamento de todo o concreto solto ou fissurado, inclusive das camadas de óxidos/hidróxidos das superfícies das barras.
- Análise criteriosa da possível redução de secção transversal das armaduras atacadas. Se viável, esta análise será feita por meio de ensaios comparativos de resistência entre peças sadias e as mais atingidas. Quando necessário, colocar novos estribos e/ou novas armaduras longitudinais. Sempre que se empregar solda, ela deve ser à base de eletrodos adequados e o tempo e a temperatura devem ser controlados a fim de se evitar a mudança da estrutura do aço, principalmente se este for de classe B (EB-3 da ABNT).
- Reconstrução do revestimento das armaduras de preferência com concreto bem adensado. Este revestimento tem a finalidade de:
  - Impedir a penetração de umidade, oxigênio e agentes agressivos até as armaduras;
  - Recompôr a área da secção de concreto original;
  - Propiciar um meio que garanta a manutenção da capa passivadora no aço.

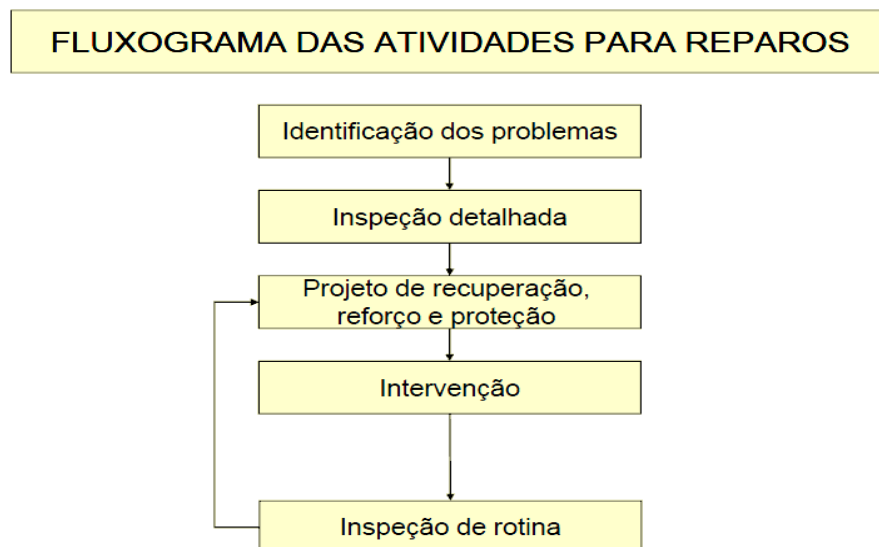
Esse novo revestimento pode ser executado através de qualquer procedimento que atenda a esses requisitos como:

- Concreto projetado com espessura mínima de 50 mm. O concreto projetado tem boa aderência ao concreto velho e não requer fôrmas, mas tem a desvantagem de acarretar muita reflexão (perda de material) e sujar o ambiente.
- Adesivos à base de epóxi para união do concreto velho com o novo, sendo este aplicado no local por método tradicional. Leva vantagem em relação ao anterior, pois impermeabiliza a armadura definitivamente, impedindo que mesmo com a carbonatação superficial haja corrosão. Essa solução apresenta a desvantagem de requerer fôrmas além da dificuldade da compactação e adensamento do concreto novo, fato que, geralmente, acarreta secções finais maiores que as iniciais com prejuízos estéticos.
- Concretos e argamassas poliméricas obtidas de resinas à base de epóxi ou metil metacrilato. Tem alta durabilidade, impermeabilidade, aderência ao concreto velho e à armadura, porém necessitam fôrma e requerem mão de obra especializada e testes prévios de desempenho, pois há muita flutuação nas características desses produtos. Esses concretos e argamassas têm a vantagem de não acarretarem problemas estéticos, pois podem ser moldados em pequenos espaços disponíveis. Em geral são caros.
- Concretos e argamassas especiais para “grauteamento”. Esses produtos não apresentam retração, têm boa aderência e podem ser autoadensáveis, não

exigem aumento de secção, além da original; porém, inconvenientemente, requerem fôrmas.

- Concretos e argamassas “comuns”, bem proporcionados, com baixa relação água/cimento e aplicados com fôrma, dentro das técnicas de bem construir. Essa solução exige, geralmente, grande aumento de secção e requer alto conhecimento de tecnologia de concreto para assegurar a aderência do concreto velho ao concreto novo.

Finalmente, cabe lembrar que, antes de qualquer recuperação, devem ser identificadas e sanadas as causas. Caso isso não seja observado, corre-se o risco de acarretar corrosão em outros locais por haver criado mais descontinuidade na estrutura, além das que originalmente existiam.



**Figura 9 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto – A figura mostra uma representação gráfica das atividades de reparos.**



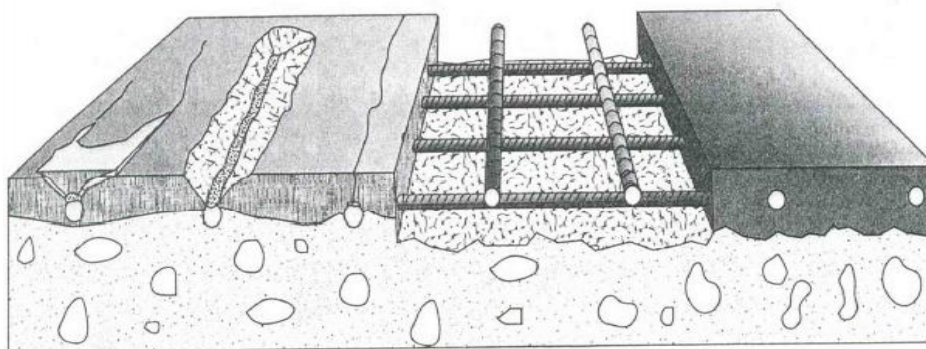
### 3.9.1 Recursos Especiais

Helene P. (1986) relata que na proteção das armaduras de concreto pode ser necessário o emprego de recursos especiais de proteção quando, por exemplo:

- Não há como se obter o cobrimento mínimo adequado;
- Não há como se impedir o uso ou acesso de agentes agressivos;
- Não há como se impedir a existência de correntes de fuga (linhas férreas em geral), que podem causar diferenças significativas de potencial;
- Não há como se impedir a proximidade de metais mais eletropositivos, tais como tubulações de cobre junto à armadura;
- Há vantagens econômicas.

### 3.9.2 Metodologias para recuperação de estrutura.

As figuras seguintes mostram os processos de uma estrutura a ser recuperada:



**Figura 10 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Processos de uma estrutura a ser recuperada.**

A figura abaixo mostra a delimitação das áreas do problema usando um martelo para fazer um ensaio de percussão, pois, quando há uma corrosão, o concreto expande deixando uma parte vazia por dentro.



**Figura 11 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Identificação das áreas de reparo.**

A figura mostra a remoção de todo o concreto que está comprometido ou solto. Essa remoção deve ser entre 1cm a 2cm atrás da ferragem para limpá-la e que a argamassa possa envolvê-la.



**Figura 12 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Remoção do concreto deteriorado.**



A figura seguinte mostra o corte com maquina, que deve delimitar a área de reparo e melhorar o acabamento do concreto.



**Figura 13 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Delimitação da área do reparo.**

A limpeza da superfície é essencial, pois não deve ter nenhuma impureza. Pode ser feito com jato de ar, água ou escória de cobre.



**Figura 14 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Limpeza da superfície.**

A limpeza da armadura deve ser feita através de lixamento (manual ou mecânico), jato de escória ou água tirando toda a corrosão da armadura.



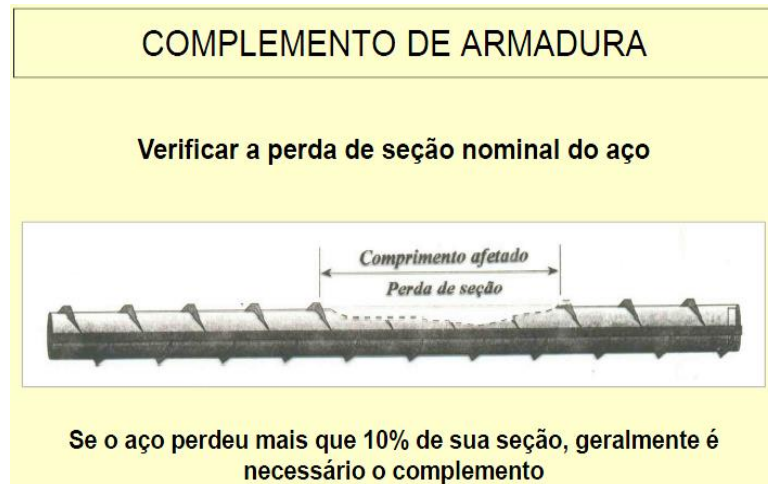
**Figura 15 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Limpeza das armaduras.**

A proteção das armaduras será executada pintando-as com produtos cimentícios, nos casos de exposição maior que 24 horas ou em ambiente agressivo.



**Figura 16 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Proteção das armaduras.**

Quando a perda de seção é relevante para a estrutura será necessário complemento de armadura.



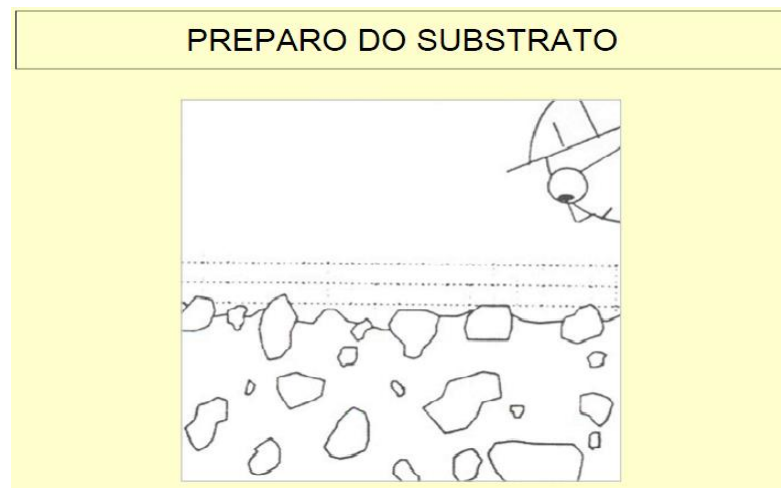
**Figura 17 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Complemento de armadura.**

Esta figura mostra a execução de um furo de ancoragem, que deve ser preenchido de epóxi para encaixar um grampo de aço com a mesma seção da estrutura.



**Figura 18 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Fixação de armadura complementar.**

O preparo do substrato deve ter uma espessura entre 1cm a 2cm para colocar a argamassa.



**Figura 19 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Preparo do substrato**

A aplicação de ponte de aderência de base cimentícia são suficientes para aderir o concreto novo no concreto velho.



**Figura 20 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Aplicação de ponte de aderência.**

O substrato deve estar bem saturado e seco, ou seja, evitar que a água escorra e que forme poças d'água.



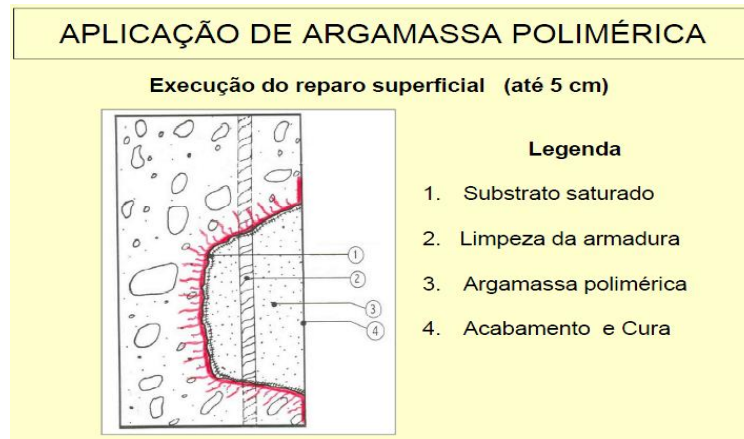
Figura 21 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Saturar o substrato com água.

A mistura da argamassa de reparo pode ser executada com argamassa polimérica, graute de cimento ou microconcreto e o fator água cimento deve ser bastante controlado para não errar a dosagem.



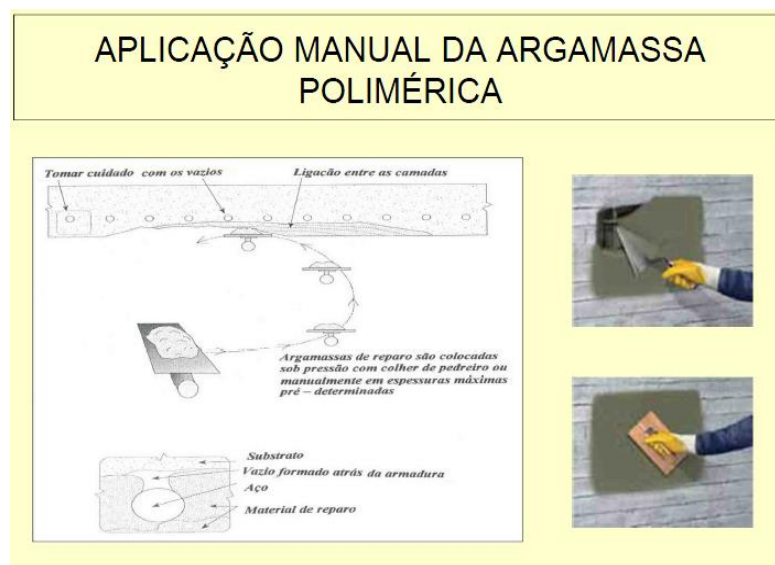
Figura 22 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Mistura da argamassa de reparo.

A execução do reparo superficial com argamassa polimérica deve ser até 5cm (por causa do custo elevado) com o substrato saturado e a armadura limpa. Depois aplica-se a argamassa polimérica fazendo o acabamento e deixando curar.



**Figura 23 – Aguiar J. - Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Aplicação de argamassa polimérica.**

A aplicação da argamassa polimérica deve ser executada manualmente com colher de pedreiro e sob pressão, para que não tenha vazios.



**Figura 24 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Aplicação manual da argamassa polimérica.**

A projeção de argamassa é feita misturando o material e colocando-o na bomba que esta ligada ao compressor. No bico sai uma argamassa de alta pressão, na qual deve tomar cuidado para que não tenha vazios.

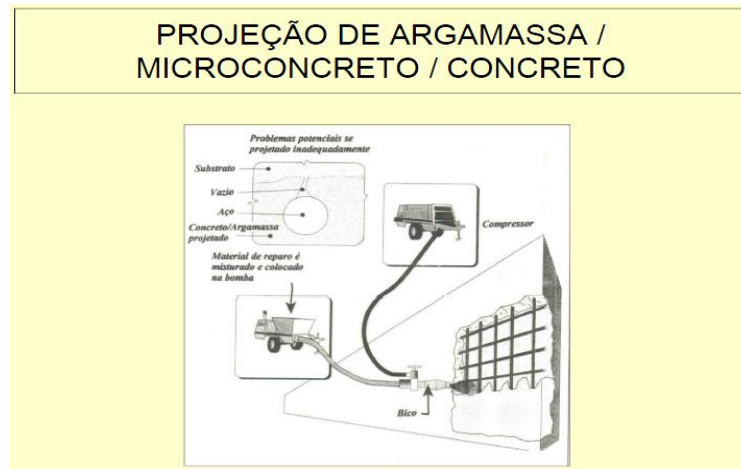


Figura 25 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Projeção de argamassa.

A execução de reparos profundos (acima de 5cm) deve ser feita a saturação do substrato, limpeza da armadura, fôrma de madeira com cachimbo e depois colocar o graute de cimento.

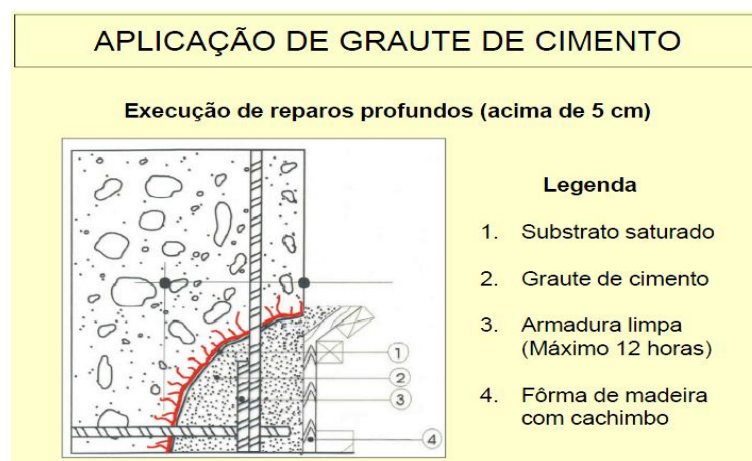


Figura 26 - Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Aplicação de graute de cimento



A cura das superfícies pode ser executada com manta molhada, água (quando secar deve molhar novamente) ou produto químico (a desvantagem do produto químico é que ele interfere na aderência de qualquer pintura que for colocada).



Figura 27 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Cura das superfícies.

As proteções da superfície das estruturas são praticamente quatro tipos: a impregnação (não forma película), a pintura (forma película), as membranas (são elásticas) e barreiras espessas (são os granitos, cerâmicas, etc).



Figura 28 – Aguiar J. – Apostila Mecanismo de Deterioração do Concreto - Proteção da superfície das estruturas.



### **3.10 Principais parâmetros a serem considerados**

Os critérios essenciais que envolvem os riscos nesse tipo de patologia são:

#### **3.10.1 Risco estrutural:**

Aspectos relacionados com a segurança estrutural, sua estabilidade e sua capacidade portante.

#### **3.10.2 Risco funcional:**

Aspectos relacionados com a segurança e conforto dos usuários.

#### **3.10.3 Risco durabilidade**

Aspectos relacionados com a vida útil da estrutura, mantendo-se íntegra.

## 4 – CONCLUSÃO

Inúmeras são as edificações que sofrem com tais manifestações patológicas, geralmente oriundas de um cobrimento de concreto insuficiente. A grande vantagem do concreto armado é que ele pode, desde que bem executado, proteger a armadura da corrosão, pois essa proteção baseia-se no impedimento da formação de células eletroquímicas, através de proteção física e de proteção química.

Essa manifestação patológica – corrosão da armadura – como já mostrado neste trabalho, pode ser originada por agentes de várias causas, sendo, na verdade, essencial reconhecê-las, a fim de que se possa produzir uma proteção contínua e duradoura.

Cabe destacar que a corrosão das armaduras é mais recorrente do que qualquer outro fenômeno de deterioração das estruturas de concreto armado, expondo tanto o lado estético, quanto do lado da segurança. Ademais, há sempre um alto custo na sua reparação ou recuperação.

Certas estruturas de concreto armado sofrem mais incidências de deterioração do que outras, como, por exemplo, uma estrutura marítima, que, além da corrosão das armaduras, também sofre com os movimentos periódicos das águas do mar desgastando a superfície do concreto.

O cumprimento rigoroso das regras de cobrimento mínimo, do emprego apropriado do concreto e da conformidade na execução podem impedir que essa patologia aconteça.

De qualquer forma, sendo a corrosão uma ocorrência de natureza expansiva, na maior parte dos casos é visível com o tempo, tornando-se possível uma rápida providência de recuperação e proteção.

Pelo exposto, conclui-se que toda construção deve aplicar um plano de qualidade, que considere suas peculiaridades, traçando-se um plano efetivo de gerenciamento da execução, de modo a atender os critérios do projeto, detalhando-se todas as etapas e os controles tecnológicos e de qualidade cabíveis, evitando assim as manifestações patológicas do concreto armado e, principalmente, a oxidação das ferragens.

## 5 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1 – Helene, Paulo R.L. Corrosão em armaduras para concreto armado. São Paulo: Editora – Pini, 1986. 46p.

2 – ABNT. NBR: 6118/2003 Projeto de estrutura de concreto armado – procedimento. Rio de Janeiro: 2004.

3 – IBRACON. Recuperação estrutural: Diagnostico e terapias para prolongar a vida útil das obras. Concreto & Construções. São Paulo, 49n., p.1-88, Jan/Fev/Mar/2008.

4 – AGUIAR, José Eduardo de. **História do Concreto Armado**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011 (Material de aula).

5 – AGUIAR, José Eduardo de. **Mecanismo de Deterioração do Concreto**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011 (Material de aula).

6 – LAPA, José Silva. **Patologia, Recuperação e Reparo das Estruturas de Concreto**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008 – Monografia de pós graduação.

## 6 – BIBLIOGRAFIA

- 1 - Bauer, L.A. Falcão (Luiz Alfredo Falcão).  Materiais Construção: 5. ed. rev. Rio de Janeiro: Ano 2000: volume 1
- 2 – Bauer, L.A. Falcão (Luiz Alfredo Falcão).  Materiais Construção: 5. ed. rev. Rio de Janeiro: Ano 2000: volume 2
- 3 – MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J.M.  Concreto: estrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1994. 2 v. 248 p.
- 4 – Helene, Paulo R.L.  Corrosão em armaduras para concreto armado. São Paulo: Editora – Pini, 1986. 46p.
- 5 – ABNT. NBR: 6118/2003  Projeto de estrutura de concreto armado – procedimento. Rio de Janeiro: 2004.
- 6 – Instituto Brasileiro do Concreto ( IBRACON). Recuperação Estrutural: Diagnóstico e terapias para prolongar a vida útil das obras.  Concreto & Construção. São Paulo, ano XXXV, n. 49, p. 1-88, Jan/Fev/Mar. 2008, ISSN:1807-7197.
- 7 – RIPPER, Thomaz; SOUZA, Vicente Custódio Moreira.  Patologia, recuperação e reforço de estrutura de concreto 3 ed. São Paulo: Editora – Pini, 2001. 255p.

8 – THOMAZ, Ercio. Trincas em edifícios, causas, prevenções e recuperações. co-edição. IPT/EPUSP/PINI, 2007. 194p.

9 – ABESC. Manual do concreto dosado em central. São Paulo, p.2-36, 2007.

10 – IBRACON. Recuperação estrutural: Diagnostico e terapias para prolongar a vida útil das obras. Concreto & Construções. São Paulo, 49n., p.1-88, Jan/Fev/Mar/2008.

11 – GOMES, Abidias Magalhães. **Corrosão**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011 (Material de aula).

12- MAGALHÃES, Aldo Giuntini de. **Durabilidade, Patologia e Recuperação das Construções de Concreto Armado**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011 (Material de aula).

13 – FIGUEIREDO, Dalmo Lúcio. **Concreto Armado**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011 (Material de aula).

14 – AGUIAR, José Eduardo de. **História do Concreto Armado**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011 (Material de aula).

15 – AGUIAR, José Eduardo de. **Mecanismo de Deterioração do Concreto**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011 (Material de aula).

16 – LAPA, José Silva. **Patologia, Recuperação e Reparo das Estruturas de Concreto**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008 – Monografia de pós graduação.