

CENTRO UNIVERSITÁRIO ATENAS

FÁBIO DE SOUSA VIAPIANA

**REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM  
PROBLEMAS DE CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO E  
POR ÍONS CLORETO**

Paracatu

2019

FÁBIO DE SOUSA VIAPIANA

**REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM PROBLEMAS DE  
CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO E POR ÍONS CLORETO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Atenas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Patologias em estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Almeida Oliveira.

Paracatu

2019

V618r Viapiana, Fábio de Sousa.

**Reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão por carbonatação e por íons cloreto.** / Fábio de Sousa Viapiana. – Paracatu: [s.n.], 2019.

42 f. il.

Orientador: Prof. Msc. Alexandre Almeida Oliveira.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) UniAtenas.

1. Corrosão. 2. Concreto. 3. Carbonatação. 4. Íons cloreto. 5. Recalibração eletroquímica (RAE). 6. Dessalinização. I. Viapiana, Fábio de Sousa. II. UniAtenas. III. Título.

CDU: 62

FÁBIO DE SOUSA VIAPIANA

**REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM PROBLEMAS DE  
CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO E POR ÍONS CLORETO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Atenas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Patologias em estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Almeida Oliveira.

Banca Examinadora:

Paracatu - MG, 12 de Novembro de 2019.

---

Prof. Dr. Alexandre Almeida Oliveira  
Centro Universitário Atenas

---

Prof. Carlos Eduardo Ribeiro Chula  
Centro Universitário Atenas

---

Prof. Msc. Pedro Henrique Pedrosa de Melo  
Centro Universitário Atenas

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço acima de tudo a Deus, pois se não fosse por Ele, eu não estaria onde estou hoje.

Agradeço a minha mãe e meu irmão, que sempre contribuíram quando eu precisava, com destaque para esta etapa final, em que me deram o apoio que eu precisava para estar concluindo este trabalho.

Ao meu pai, que sempre se esforçou ao máximo para que eu tivesse um ensino de qualidade e por ter sempre me mostrado que a educação era o melhor e mais gratificante caminho para alcançar meus objetivos. Tenho certeza de que, de onde ele estiver, ele está feliz por eu estar concluindo mais uma etapa.

Aos professores e mestres, pelo apoio e pelos conselhos ao longo desta caminhada, tanto em sala quanto fora dela.

## RESUMO

O presente trabalho expõe o método empregado nos tratamentos eletroquímicos de realcalinização (RAE) e dessalinização, tratamentos utilizados no reparo de estruturas com problemas de corrosão por carbonatação e pela ação de íons cloreto. Em razão da falta de conhecimento acerca dos métodos eletroquímicos, é habitual o uso do reparo convencional, método arcaico de pouca eficiência, comprometimento da estrutura e de elevado impacto ambiental. Já as técnicas de reabilitação eletroquímica, além de isentas de todas as características acima citadas pertinentes ao reparo convencional, possuem custo menos oneroso e se adequa melhor a dinâmica da corrosão, uma vez que as reações de corrosão também são processos eletroquímicos. A metodologia empregada pela RAE e pela dessalinização são bastante semelhantes, uma vez que partem do mesmo fundamento. O tratamento é composto pela fixação de uma malha externa envolta por um eletrólito na superfície da região a ser tratada e aplicação de corrente contínua ao sistema, elevando o pH nas regiões adjacentes a armadura e restaurando o filme passivo responsável por sua proteção. Ainda há controvérsias quanto ao eletrólito a ser utilizado no tratamento, sendo a busca pelo eletrólito tido como ideal alvo de inúmeros pesquisadores da área. Importante pontuar que existem pontos negativos no uso de técnicas eletroquímicas de reparo, os quais podem ser facilmente minimizados apenas monitorando o processo de reparo. Além disso, essas técnicas são incapazes de restaurar a seção da barra de aço que foi perdida com a dissolução do ferro metálico, o que inviabiliza sua utilização em casos de armaduras em avançado estado de deterioração.

**Palavras-chave:** Corrosão. Concreto. Carbonatação. Íons cloreto. Realcalinização eletroquímica (RAE). Dessalinização.

## **ABSTRACT**

*The present work exposes the method used in the electrochemical treatments of realkalinization (ERA) and desalination, treatments used in the repair of structures with corrosion problems by carbonation and the action of chloride ions. Due to the lack of knowledge about electrochemical methods, it is usual to use conventional repair, an archaic method of low efficiency, structural compromise and high environmental impact. Electrochemical rehabilitation techniques, in addition to being free of all the above mentioned characteristics pertinent to conventional repair, are less costly and better fit the corrosion dynamics, since corrosion reactions are also electrochemical processes. The methodology employed by the ERA and desalination are quite similar, since they start from the same foundation. The treatment consists of fixing an external mesh surrounded by an electrolyte on the surface of the region to be treated and applying direct current to the system, raising the pH in the regions adjacent to the reinforcement and restoring the passive film responsible for its protection. There is still controversy as to the electrolyte to be used in treatment and the search for the ideal electrolyte is the target of many researchers in the area. It is important to consider that there are negative points in the use of electrochemical repair techniques, which can be easily minimized just by monitoring the repair process. Moreover, these techniques are not able to restore the section of the steel bar that was lost with the dissolution of the metallic iron, which makes impossible its use in cases of reinforcement in an advanced state of deterioration.*

**Keywords:** Corrosion. Concrete. Carbonation. Chloride ions. Electrochemical realkalinization (ERA). Desalination.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - Representação esquemática do avanço da carbonatação	22
<b>FIGURA 2</b> - Correlação entre o custo de intervenção e a fase em que ocorre	28
<b>FIGURA 3</b> - Arranjo da fonte retificadora empregado na RAE	32
<b>FIGURA 4</b> - Aplicação do sistema anódico sobre a estrutura para início da ERA	32
<b>FIGURA 5</b> - Representação esquemática migração de íons durante a RAE	34



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	água / cimento
A/m <sup>2</sup>	ampère por metro quadrado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
m <sup>2</sup>	metros quadrados
MPa	mega Pascal
PNB	Produto Nacional Bruto
ERA	realcalinização eletroquímica
pH	potencial hidrogeniônico
V	volts

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	por cento
C <sub>2</sub> S	silicato bicálcico
C <sub>3</sub> A	aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	silicato tricálcico
Ca(OH) <sub>2</sub>	hidróxido de cálcio
CaCl <sub>2</sub>	cloreto de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	carbonato de cálcio
Cl <sup>-</sup>	ânion cloreto
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
E <sup>0</sup>	potencial padrão
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	hematita (ou óxido de ferro III)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O	óxido de ferro III tri-hidratado
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	magnetita
FeCl <sub>3</sub>	cloreto de ferro III
FeO	óxido de ferro II
Fe(OH) <sub>2</sub>	hidróxido de ferro II
Fe(OH) <sub>3</sub>	hidróxido de ferro III
H <sub>2</sub> O	água
H <sub>2</sub> S	gás sulfídrico
HCl	ácido clorídrico
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ânion bicarbonato
KOH	hidróxido de potássio
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	carbonato de potássio
NaOH	hidróxido de sódio
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	carbonato de sódio
O <sub>2</sub>	oxigênio molecular
OH <sup>-</sup>	ânion hidroxila
SO <sub>2</sub>	dióxido de enxofre

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	11
1.1 PROBLEMA	12
1.2 HIPÓTESES	12
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 OBJETIVO GERAL	12
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.4 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	13
1.5 METODOLOGIA DO ESTUDO	14
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
<b>2 PRINCÍPIOS DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA</b>	15
2.1 INTRODUÇÃO	15
2.2 MECANISMOS DA CORROSÃO DE ARMADURAS	16
2.2.1 COMPORTAMENTO DO FERRO FRENTE À CORROSÃO	16
2.2.2 PASSIVAÇÃO DA ARMADURA	18
<b>3 CINÉTICA DAS REAÇÕES E PERDA DA PROTEÇÃO</b>	20
3.1 CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO	20
3.1.1 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	22
3.2 CORROSÃO POR ÍONS CLORETO	24
3.2.1 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO	26
<b>4 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS</b>	28
4.1 VISÃO SISTÊMICA E MONITORAMENTO DO PROCESSO DE CORROSÃO	28
4.2 INTRODUÇÃO A REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS	29
4.3 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA (RAE)	31
4.3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS	31
4.3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA TÉCNICA	31
4.3.3 FATORES QUE INFLUEM NA RAE	35

4.3.4 FINALIZAÇÃO DO TRATAMENTO	36
4.4 DESSALINIZAÇÃO	37
4.4.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS	37
4.4.2 FINALIZAÇÃO DO TRATAMENTO	39
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	40
<b>REFERÊNCIAS</b>	41

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o momento em que a utilização do concreto armado passou a ser amplamente difundida, disseminava-se também a ideia de que esse era um sistema construtivo de durabilidade ilimitada (ROCHA, 2015). Entretanto, hoje já se tem uma noção mais clara de que há uma variedade de fatores ambientais e construtivos que atuam contribuindo e/ou influenciando o surgimento de patologias.

Com a verticalização das construções atuando como ferramenta principal na reorganização do espaço urbano, tornou-se comum a observação de manifestações patológicas na construção civil. Devido a elevada durabilidade do concreto armado, este tipo de estrutura está sujeito a diversos fenômenos de deterioração, sendo a corrosão de armadura o tipo mais frequente.

A corrosão de armaduras é a manifestação patológica que mais vem preocupando os profissionais da área. Além do alto índice de incidência, este tipo de patologia gera problemas que podem ocasionar sérios danos estruturais devido à redução na seção transversal do aço e ao surgimento de fissuras e trincas, as quais são resultantes do acúmulo dos produtos da corrosão depositados na parede da barra de aço. Outro fator preocupante é o custo oneroso do processo de recuperação da estrutura, agravado pelo diagnóstico tardio que, por sua vez, tem origem na complexidade do processo corrosivo como um todo.

Segundo Sales et al. (2014, p.1), “não é fácil nem rápido justificar o porquê de uma estrutura corroída quando tantas outras, em tudo semelhante e similares, não apresentam ou até nunca apresentarão o problema”. Nesta frase, Sales et al. apresenta um dos motivos causadores da ausência de diagnóstico prévio e retrata de forma abstrata a complexidade do processo corrosivo, subentendendo a amplitude e a profundidade que pode se tornar um estudo com objetivo de entender o exposto nos casos práticos.

A fim de evitar a ocorrência de corrosão em obras que ainda estão por vir, é necessário, segundo Helene (1993, p.7), “conhecimento técnico atualizado e abrangente do problema”. Porém, devido à falta de divulgação dos problemas patológicos no Brasil, o desenvolvimento de técnicas inovadoras na forma de se projetar e construir visando obras menos suscetíveis ao aparecimento de patologias tem sido retardado.

Dentro deste contexto, este estudo acadêmico propõe o entendimento acerca do comportamento das estruturas de concreto armado perante dois dos principais meios de corrosão: a carbonatação e a corrosão por íons cloreto. Inicialmente serão abordados os métodos de avaliação e monitoramento do processo de corrosão. Posteriormente será discutida a implementação e adequação correta das técnicas de reparo de armaduras.

## 1.1 PROBLEMA

Quais são as etapas envolvidas no processo de reparo de armaduras em estado de corrosão por carbonatação e por íons cloreto?

## 1.2 HIPÓTESES

Todo processo de corrosão do aço presente em estruturas de concreto é de natureza eletroquímica, dado seu envolvimento em meio aquoso. Em face disto, o processo de reabilitação deve conter etapas dedicadas a eliminação do fator gerador da patologia e recuperação das propriedades iniciais do aço.

Tanto na corrosão por carbonatação quanto na corrosão por íons cloreto, o processo de reabilitação ocorre de forma similar, embora apresentem resultados diferentes. Em ambos os casos são realizados procedimentos como: fixação de uma malha metálica (imersa em um eletrólito) na superfície externa do concreto e a imposição de um campo elétrico ao sistema armadura-malha.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GERAL

Discutir quais são as principais etapas e os cuidados a serem empregados na recuperação de elementos de concreto armado com danificação oriunda de processos de corrosão por carbonatação e por íons cloreto.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) discutir quais são os fatores que influenciam no processo de corrosão de uma estrutura de concreto armado;
- b) investigar quais são os métodos empregados na avaliação, monitoramento e recuperação da corrosão na armadura;
- c) elucidar os processos corrosivos mais frequentes nas edificações em concreto armado.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Problemas envolvendo corrosão causam prejuízos anuais em todo o mundo. Ao contrário do que se subentende da abordagem de muitos autores da área (quando associam os custos do reparo apenas as atividades de realização do mesmo), o maior gasto que se tem hoje com problemas de corrosão está relacionado ao consumo de aço, que representa em torno de 20% da produção mundial de ferro (ZEMPULSKI LN; ZEMPULSKI MFS, 2007, p.1). Estima-se que, no Brasil, os gastos com corrosão correspondam a 0,6% do PNB (Produto Nacional Bruto) (FIGUEIREDO, 1994, p.391, *apud*. TORRES, 2011, p.2). Esses dados estão relacionados ao processo de reparação, desconsiderando os custos indiretos e sociais.

O motivo pelo qual os gastos com reparos de estruturas de aço são altos é o diagnóstico tardio do processo de corrosão. Nesses casos, é frequentemente mais viável a demolição completa da estrutura para a reconstrução de uma nova. Outro fator que causa forte impacto no custo de recuperação é a disponibilidade do método de reparo a ser utilizado, variando de acordo com o país, região, etc. Os aspectos econômicos devem ser sempre considerados no momento de se realizar intervenções de qualquer espécie, visando, em apenas um procedimento, abarcar custo menos dispendioso e efetividade (MONTEIRO, 2002, p.5).

No Brasil, são poucos os dados disponíveis sobre corrosão de armaduras (SALES et al., 2014, p.5), sendo a comunidade americana responsável por maior parte das pesquisas na área. O comitê americano “*Concrete Durability*” informou, em 1987, que os gastos com reparos de estruturas por ano representavam aproximadamente 16% dos custos associados as atividades construtivas e materiais (National Research Council, 1987). Transcorridos 32 anos, esta porcentagem não sofre alterações abruptas: o custo com atividades construtivas teve aumento considerável ao longo dos anos; porém, com o decorrer do tempo ocorre simultaneamente o aumento no

número de construções e alterações nas condições ambientais, acarretando a elevação na quantidade de manifestações patológicas.

Diante do exposto, é importante a realização de pesquisas no intuito de viabilizar e tornar mais eficientes os processos de reparo de armaduras com danificação provinda de processos de corrosão. Nesse contexto, o presente trabalho é relevante por possibilitar a difusão de conhecimentos relativos a esse tema.

## 1.5 METODOLOGIA DO ESTUDO

O método de pesquisa utilizado no presente trabalho é o descritivo e exploratório, uma vez que cada etapa visa estabelecer a razão e o porquê da incidência dos fenômenos mais casuais ligados ao tema. Este trabalho assume caráter qualitativo, destinando-se a avaliar as vantagens e as desvantagens das etapas envolvidas no processo de reabilitação das estruturas de concreto armado.

A coleta de dados para o desenvolvimento será feita por meio de revisão bibliográfica, fazendo uso de artigos e publicações acadêmicas encontrados na internet, bem como de livros disponíveis no acervo da biblioteca do UniAtenas.

As palavras chave empregadas nas buscas por informações foram: corrosão, carbonatação e extração de cloretos.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente monografia apresenta cinco capítulos que visam expor as técnicas de dessalinização e recalibração eletroquímica. Inicialmente, o capítulo 1 refere-se à introdução, onde é estabelecido a problemática, expostos os objetivos a serem alcançados e apresentados a justificativa do trabalho, a metodologia adotada e possíveis respostas para o problema em questão. O capítulo 2 tem por objetivo revisar os conceitos gerais que tangem o processo de corrosão, assim como o funcionamento da película passivadora. No capítulo 3 foi introduzido o conceito de corrosão por carbonatação e pela ação de íons cloreto e as variáveis que interferem em seu desenvolvimento. No capítulo 4, fez-se a abordagem das técnicas empregadas no tratamento de estruturas que apresentam problemas de corrosão, do princípio básico da metodologia de reparo e das características do processo. Por fim, foram apresentadas as considerações finais pertinentes aos objetivos da monografia.



## 2 PRINCÍPIOS DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Na natureza, as substâncias são encontradas, na maior parte das vezes, em sua forma química de maior estabilidade (estado físico, estado alotrópico, organização cristalina, estado de oxidação). No caso dos metais, muitos apresentam-se disponíveis na forma de óxidos, como é o caso dos minerais hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e óxido de ferro II ( $\text{FeO}$ ), por exemplo. É possível ainda que os metais estejam presentes na natureza na forma de sulfatos, sulfetos, cloretos, nitratos, entre outras possíveis formas. Normalmente, o ferro é encontrado na composição mineral da hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), tecnicamente denominada de óxido de ferro III. (ATKINS; JONES, 2012).

O processamento dos óxidos de ferro para a extração do metal ocorre submetendo-os a ação de agentes redutores e fornecendo energia, obtendo-se o ferro metálico. De fato, o ferro é extraído por pirometalurgia, processo que emprega o aquecimento do minério, o que diminui sua estabilidade e, junto ao agente redutor (monóxido de carbono), promove a dissociação do minério de ferro (SILVA, 2011, p.69).

Quando o metal processado entra em contato com o meio ambiente, passa a reagir espontaneamente por meio da perda de elétrons e, assim, retornando ao seu estado de menor energia. Esse processo é denominado de oxidação. Segundo Sales et al. (2014, p.2):

“[...] em estruturas de concreto, é preferível denominá-lo de corrosão, pois sempre se dá em presença de água, enquanto a oxidação do aço é um mecanismo genérico que pode ocorrer mesmo sem água, como, por exemplo, a formação de carepa de laminação durante a fabricação das armaduras em siderúrgicas e metalúrgicas.”

O processo de corrosão do aço sempre é eletroquímico, ou seja, existe a transferência de elétrons e a formação de íons, que se encontram em constante fluxo por meio de um eletrólito. A interação da armadura com o meio ambiente resulta na formação de óxidos, causando aumento da pressão interna, rompendo as ligações químicas do concreto e causando fissuras em sua estrutura (em casos mais

acentuados, causando o lascamento do concreto), deixando a armadura mais suscetível a intempéries.

## 2.2 MECANISMOS DA CORROSÃO DE ARMADURAS

### 2.2.1 COMPORTAMENTO DO FERRO FRENTE À CORROSÃO

O ferro reage com facilidade quando exposto ao ar atmosférico, onde há presença de oxigênio molecular (O<sub>2</sub>) e umidade. Nesse ambiente, a seguinte semi-reação de redução (ganho de elétrons) do oxigênio deve ser considerada:



Em solução aquosa a pH = 7,<sup>1</sup> o potencial padrão<sup>2</sup> (ou eletroquímico) da reação de redução do oxigênio é de E<sup>0</sup> = + 0,82 V (volts). Qualquer metal com E<sup>0</sup> inferior a + 0,82 V poderá ser oxidado e fornecer elétrons para que ocorra a redução do oxigênio. Nesse contexto, o ferro pode ser facilmente oxidado na presença de oxigênio, ao considerarmos a seguinte semi-reação:



Em decorrência das heterogeneidades (físicas e químicas), as reações de oxidação e redução não ocorrem de forma uniforme ao longo da superfície do metal (SALES et al., 2014, p.16). A ausência de uniformidade no concreto (regiões com diferentes teores de agregados, diferenças no adensamento, etc.) leva a concentrações diferentes de íons, água e oxigênio de região para região. Assim sendo, a oxidação do ferro não ocorre com mesma intensidade em toda a superfície da armadura, dando origem a formação de microrregiões anódicas e catódicas. A efeito de simplificação, consideramos que na região anódica ocorre apenas a

<sup>1</sup> A escala de pH (potencial hidrogeniônico) foi introduzida pelo químico dinamarquês Søren Sørensen, em 1909. É utilizada para medir o grau de acidez de um meio aquoso. A 25°C, essa escala varia de 0 a 14, sendo que as soluções com valores de pH < 7 são consideradas ácidas, as que apresentam valores de pH > 7 são consideradas básicas, e soluções com pH = 7 são neutras.

<sup>2</sup> Medida de poder de uma reação de puxar elétrons. Reações caracterizadas pelo ganho de elétrons possuem potenciais padrão positivos e reações onde há perda de elétrons possuem potenciais padrão negativos.

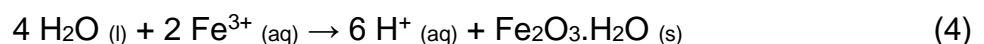
oxidação do ferro (regiões onde o contato do metal com o oxigênio pode ser considerado desprezível) e, na região catódica, apenas a redução do oxigênio.

Na região catódica, o ferro reage com o oxigênio, liberando elétrons e formando íons  $\text{Fe}^{2+}$ . Conforme os elétrons vão sendo liberados, criam-se diferenças de potencial entre este ponto e as regiões adjacentes de contato desprezível com o oxigênio. Esta diferença de potencial faz com que os elétrons migrem, através do metal (desempenhando o papel de condutor), em direção as regiões com presença de íons  $\text{Fe}^{2+}$ . Com o decorrer da transferência de elétrons, nos locais onde possui menor contato com oxigênio vão se formando íons  $\text{Fe}^{2+}$  (surgimento da região anódica), ao passo que nas regiões catódicas o ferro permanece no estado fundamental (metálico).

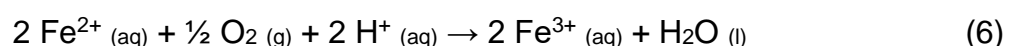
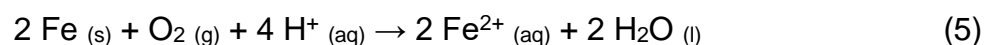
É possível ainda que o oxigênio molecular realize a oxidação do íon  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ . Isto ocorre porque a semi-reação de redução de  $\text{Fe}^{3+}$  possui potencial padrão inferior a + 0,82 V



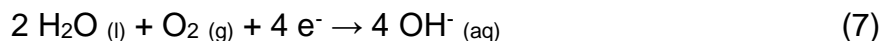
À medida que os átomos de ferro vão se transformando em cátions, os mesmos vão se desprendendo da estrutura metálica original. Estes íons em dissolução se movem em direção as regiões catódicas, por meio da água presente na composição do concreto (atuando como eletrólito), reagindo com a água situada entre os poros, segundo a reação 7.4. Esta reação produz íons  $\text{H}^+$  (aq) necessários à reação 7.1.



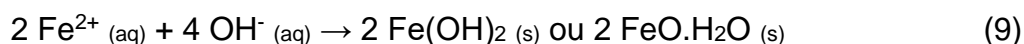
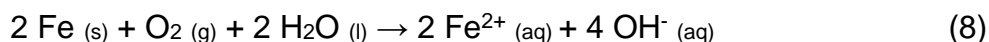
As reações de oxidação do ferro, levando-os aos estados de oxidação +2 e +3, bem como a reação do óxido de ferro III ( $\text{Fe}^{3+}$ ), possibilitam o início das seguintes reações:



Ao passo que não ocorra a formação de íons  $\text{Fe}^{3+}$ , a redução do oxigênio ocorre conforme expresso pela reação a seguir:



Como resultado, ocorrem as seguintes reações:



O processo de corrosão resulta na formação de óxidos e hidróxidos que vão se depositando na superfície do metal. Os óxidos e hidróxidos frequentemente encontrados nas estruturas de concreto armado são:  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  (hidróxido de ferro II),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (hidróxido de ferro III) e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . A definição do óxido ou hidróxido a ser formado vai advir das condições de pH do meio e do potencial de eletrodo do aço (SALES et al., 2014, p.17).

Uma característica pertencente a maioria dos compostos formados pela corrosão é sua elevada expansividade, ocupando volumes de 3 a 10 vezes o volume original do aço e gerando tensões internas da ordem de 32 MPa (CASCUDO, 1997 *apud*. ROCHA, 2015, p.8). O elevado aumento no volume original do metal acarreta a elevação na pressão interna, causando fissuras no concreto que, por sua vez, facilita o contato do meio externo com a armadura. Das interações da armadura com o meio externo, vale enfatizar o contato direto com compostos ácidos, que vão acelerar o processo de corrosão.

### 2.2.2 PASSIVAÇÃO DA ARMADURA

Com a deposição dos produtos da corrosão, forma-se uma fina película sobre a superfície da armadura. Essa película pode assumir duas formas: uma mais porosa (de menor compacidade e menos aderente ao aço) e outra mais aderente e compacta. O filme de maior aderência e compacidade recebe o nome de filme passivo, devido a sua capacidade de inibir de forma significativa o processo corrosivo (SALES et al., 2014, p.17). Este filme passivo forma uma barreira química que, juntamente com a barreira física, procura diminuir significativamente o progresso da corrosão.

O filme de caráter passivo é formado apenas em ambiente altamente alcalino, como é o caso do concreto. Segundo Helene (1993, p.45), “a alcalinidade do concreto tem sua origem nas reações de hidratação dos compostos principais do cimento, os silicatos de cálcio ( $C_2S$  e  $C_3S$ ), que liberam determinada porcentagem de hidróxido de cálcio,  $Ca(OH)_2$ ”. O hidróxido de cálcio confere ao cimento um pH entre 12 e 13, enquanto o potencial de eletrodo do aço no interior do concreto é usualmente encontrado dentro da faixa de  $-0,400$  V a  $+0,150$  V. Nessas condições de pH e potencial padrão, forma-se um filme passivo composto por  $Fe_3O_4$ .

Com a redução do pH, o filme passivo se torna instável, passando a ser comumente formado o óxido de ferro tri-hidratado ( $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ ), vulgarmente denominado de ferrugem. Em condições habituais não há diminuição no pH do concreto. Portanto, se faz necessário a presença de agentes agressivos para que haja a perda da passividade. De forma natural, a despassivação se dá principalmente pela presença de íons cloretos ou pelo fenômeno de carbonatação.

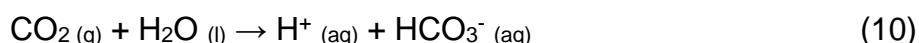
### 3 CINÉTICA DAS REAÇÕES E PERDA DA PROTEÇÃO

#### 3.1 CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO

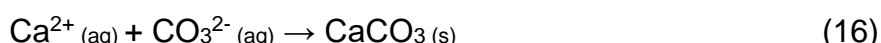
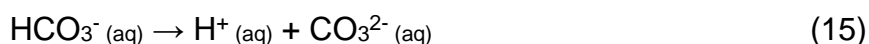
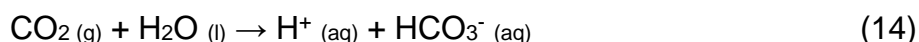
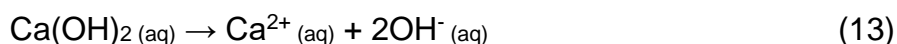
O fenômeno de carbonatação pode ser definido como a interação físico-química entre, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , resultando na redução do pH do concreto. Outros gases ácidos também podem ser responsáveis pela alteração do pH da solução, como o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Porém, no presente estudo serão abordados apenas os processos envolvendo o  $\text{CO}_2$ , por ser de maior disponibilidade no ambiente que os demais citados.

A deterioração da armação está diretamente associada a estrutura porosa do concreto e, no caso da corrosão por carbonatação, não é diferente. Dado a porosidade do concreto, o  $\text{CO}_2$  presente no ar penetra no concreto por difusão e se propaga em direção ao interior da estrutura. O dióxido de carbono, na presença de água, reage com os elementos alcalinos presentes no concreto, como o hidróxido de cálcio –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  -, o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH), formando carbonatos (SANTOS, 2015, p.5).

O hidróxido de cálcio é o composto alcalino em maior quantidade no concreto, sendo sua dissolução fator determinante para redução do pH da solução. A solubilidade do hidróxido de cálcio é inferior à dos demais álcalis por ser encontrado na forma de cristais, enquanto os hidróxidos de sódio e potássio são encontrados nos poros do cimento dissolvidos na forma de íons (HELENE, 1993, p.99). Como os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) presentes na solução intersticial dificultam a dissolução do hidróxido de cálcio, o fenômeno de carbonatação tem seu início com os álcalis KOH e NaOH (mais solúveis), formando íons  $\text{OH}^-$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  que reagem com os íons  $\text{H}^+$  e  $\text{HCO}_3^-$  (resultantes da dissolução do  $\text{CO}_2$  em água), formando os carbonatos de potássio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e  $\text{H}_2\text{O}$ . A seguir, estão expressas as reações simplificadas que representam a carbonatação dos hidróxidos de sódio e potássio:



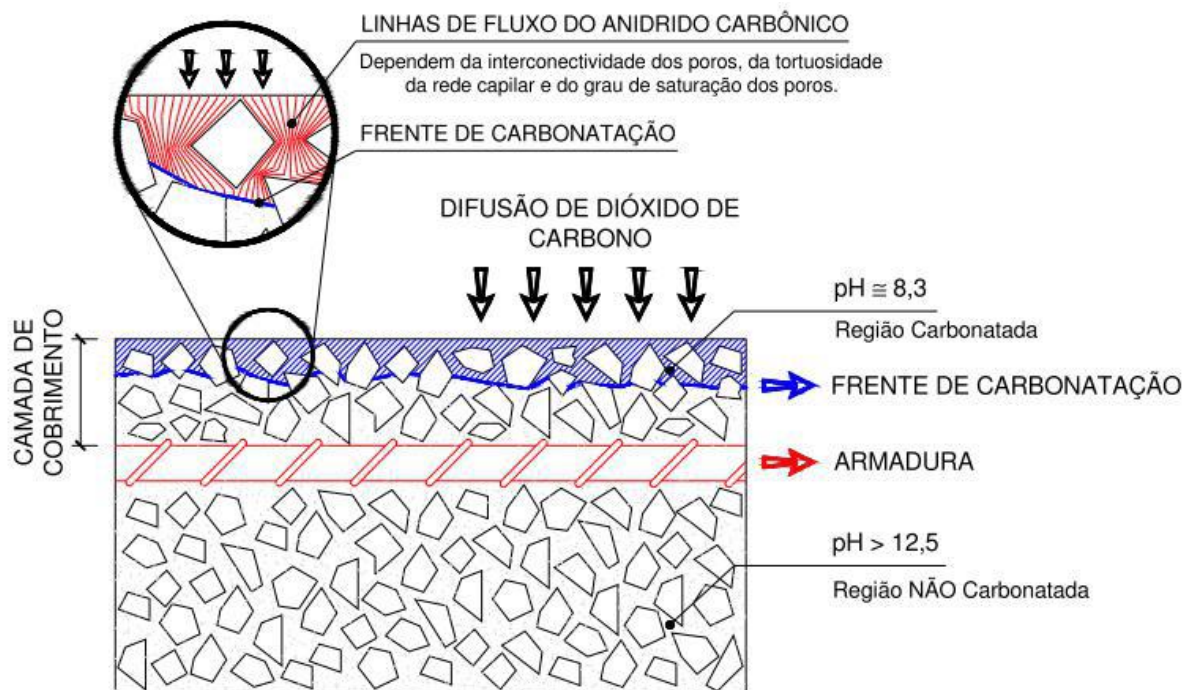
Com a redução na concentração de íons  $\text{OH}^-$ , o hidróxido de cálcio, na presença de água, inicia seu processo de dissolução. Os íons resultantes reagem com os íons produto da interação do  $\text{CO}_2$  com a água, formando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). As etapas envolvidas estão descritas a seguir.



A princípio, a carbonatação seria benéfica para a estrutura, pois confere ao concreto maior resistência mecânica e torna o mesmo menos suscetível a penetração de agentes agressivos devido a formação do  $\text{CaCO}_3$ , que promove o fechamento parcial dos poros do concreto. Entretanto, a formação dos carbonatos não é suficiente para cessar o andamento das reações, uma vez que o gás carbônico já presente no interior do material dá continuidade a lixiviação do  $\text{Ca(OH)}_2$ . Com o passar do tempo, a tendência é de que haja redução na intensidade das reações de carbonatação (ROCHA, 2015, p.6). O real problema se encontra na redução da alcalinidade na região próxima à superfície da armadura, criando condições favoráveis ao início da oxidação do aço.

A carbonatação inicia-se na superfície do concreto, constituindo uma frente de carbonatação que comporta uma sequência de reações complexas, onde o principal produto é o  $\text{CaCO}_3$ . A frente de carbonatação avança em direção ao interior do material, dividindo o concreto em duas regiões de pH bastante distintos, uma com valores em torno de 12 e outra com valores em torno de 8, conforme representado pela Figura 1. Ao aproximar-se da armadura, o filme passivo perde estabilidade (devido à redução na alcalinidade), despassivando a armadura e dando origem a um processo de corrosão generalizada. (ROCHA, 2015, p.6).

**FIGURA 1** - Representação esquemática do avanço da carbonatação



Fonte: Hoppe Filho (2008) *apud* Siqueira et. al. (2017)

### 3.1.1 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

#### 3.1.1.1 CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub>

A atmosfera urbana possui maior concentração em CO<sub>2</sub> que a atmosfera rural, o que torna as construções urbanas mais propensas ao fenômeno de carbonatação. Quanto mais elevado seu teor, mais acelerado será o processo de carbonatação. Em resposta as diferenças de agressividade, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) estipula cobrimentos mínimos para as estruturas de concreto armado, de acordo com a agressividade do ambiente ao qual está inserido. Esta medida visa assegurar a integridade da armadura, dificultando o alcance de agentes agressivos (sais, sulfatos, o próprio CO<sub>2</sub>, dentre outros) à armadura.

Atmosfera com elevado teor de CO<sub>2</sub> não é sinônimo de grande espessura carbonatada (SANTOS, 2015, p.9). De fato, se temos mais reagentes disponíveis, teremos maior formação de produtos; porém, a redução no pH do concreto depende de condições, físicas e químicas, favoráveis para que as reações aconteçam.

#### 3.1.1.2 TEMPERATURA



A temperatura não irá influir somente sobre a carbonatação, mas em toda e qualquer reação química, uma vez que temperaturas mais elevadas ocasionam maior agitação entre as moléculas, fornecendo energia cinética as mesmas e, conseqüentemente, aumentando a velocidade das reações. Segundo Helene (1993, p.107), “a temperatura tem grande influência no desenvolvimento das reações químicas e deve ser considerada na análise de durabilidade das estruturas de concreto”. Em regiões de clima tropical e equatorial, reações que dão origem a processos de degradação são mais comuns e mais intensas, ao contrário de regiões de clima temperado (HELENE, 1993, p.107).

Embora a temperatura influencie de forma favorável ao desenvolvimento da carbonatação, o mecanismo de difusão do CO<sub>2</sub> é o principal responsável por determinar sua velocidade.

### 3.1.1.3 UMIDADE

O concreto tem a característica de possuir ciclo de secagem extremamente lentos quando comparado ao ciclo de umedecimento, ou seja, o concreto necessita de um pequeno intervalo de tempo para ser umedecido e um grande intervalo de tempo para que aconteça a secagem. Isso faz com que estruturas submetidas a ciclos de secagem e molhagem (geralmente ambientes externos) permaneçam mais tempo úmidas. Em situações onde os capilares se encontram saturados de água (estruturas submersas) a difusão do CO<sub>2</sub> pode ser considerada desprezível. Já em concretos não submersos, alguns dos capilares estão parcialmente preenchidos por água. Esses capilares atuarão como retardadores (inibindo a passagem), enquanto os capilares com ar atuarão como canais transportadores de CO<sub>2</sub> (HELENE, 1993, p.107).

Ao passo que o excesso de água nos poros torna desprezível a difusão do CO<sub>2</sub> no interior do concreto, poros com quantidades extremamente pequenas de água, acompanhados por atmosfera de baixa umidade, também impossibilitam a formação da frente de carbonatação. O primeiro passo para a reação do CO<sub>2</sub> com os álcalis do cimento é a dissolução do mesmo. Assim, uma vez que não há água disponível para que a dissolução do CO<sub>2</sub> aconteça, as reações que culminam na redução do pH não acontecem ou não conseguem avançar o suficiente para que haja a precipitação do CaCO<sub>3</sub>. Portanto, em ambos os casos (ausência e saturação de

água), encontramos situações contrárias ao início da carbonatação: uma impossibilitando a difusão e outra impossibilitando a dissolução do CO<sub>2</sub>.

#### 3.1.1.4 *RELAÇÃO ÁGUA / CIMENTO*

O endurecimento do concreto é resultado de um complexo conjunto de reações de hidratação dos silicatos e aluminatos, principais compostos químicos do cimento Portland. Quando é adicionado quantidade de água superior a necessária para a hidratação da pasta, o excesso evapora, deixando espaços vazios no interior do concreto (SALES et al., 2014, p.78). Esses espaços vazios (poros e capilares) formam uma rede interconectada que permite o contato de agentes agressivos com o interior da estrutura. Quanto maior a relação água/cimento, mais permeável será o concreto e, conseqüentemente, a difusão do CO<sub>2</sub> ocorrerá de forma mais rápida, bem como alcançará profundidades mais elevadas (SANTOS, 2015, p.9).

Conforme exposto, não se pode definir um cobrimento adequado para uma estrutura apenas pela agressividade do ambiente ao qual está exposto: podemos encontrar estruturas com cobrimento superior ao estipulado por norma e que não desempenhe de forma adequada seu papel de proteção, como também podemos ter estruturas com cobrimentos extremamente inferiores ao estipulado por norma e que conferem proteção adequada a armação (HELENE, 1993, p.110).

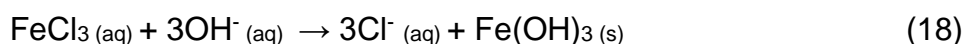
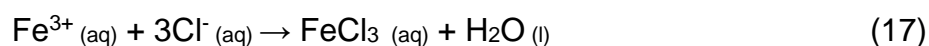
## 3.2 CORROSÃO POR ÍONS CLORETO

Hoje, dentro das condições ambientais as quais normalmente as estruturas de concreto armado estão submetidas, uma das que configura maior agressividade é a atmosfera salina. O contato direto da superfície da estrutura com águas saturadas em sais, com destaque para os cloretos (maior disponibilidade), a ação da maresia e demais compostos salinos é comum em estruturas próximas a áreas litorâneas e constante em estruturas situadas em regiões marítimas (a exemplo das pontes), onde o processo de corrosão ainda é agravado pelos ciclos de secagem e molhagem (ataques físicos e químicos ocorrendo de forma simultânea).

O transporte dos cloretos no interior do concreto ocorre por absorção capilar e difusão. Na região superficial do concreto, onde os efeitos de secagem e molhagem são relevantes para a concentração de água nos poros, o transporte ocorre

por absorção (gradiente de umidade); no interior do concreto, região onde os ciclos de secagem e molhagem não interferem na concentração de água, o transporte ocorre por difusão (gradiente de concentração) (MONTEIRO, 2002, p. 20).

Diferente da carbonatação, que desestabiliza o filme passivo, a ação dos ânions cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) é responsável por rompê-lo. Uma vez que o concreto possui cloretos livres em seu interior, a probabilidade de formação do filme passivo reduz consideravelmente e, em caso de existência de condições para sua formação, a presença de cloretos irá potencializar a passivação imperfeita da armadura (HELENE, 1993, p.113). Ainda não há um consenso sobre como de fato se dá o rompimento da película passivadora pela ação dos cloretos, havendo apenas teorias que tentam explicar como os íons  $\text{Cl}^-$  interagem com a superfície do aço, despassivando a armadura e acelerando permanentemente a corrosão, conforme as reações simplificadas expressas a seguir:



A partir das reações acima, constata-se a forma cíclica com que as mesmas ocorrem: a reação do cloreto de ferro III ( $\text{FeCl}_3$ ) com os íons  $\text{OH}^-$  produz íons  $\text{Cl}^-$ , responsáveis pela deterioração do aço (reação 7.18). Este mecanismo autossuficiente de deterioração gera preocupação por parte dos profissionais da área pois, mesmo em pequenas quantidades, o cloreto é capaz de desencadear intensos processos de corrosão.

Os defeitos gerados na produção do filme passivo são os pontos mais suscetíveis a ação dos íons cloreto (por serem os pontos mais frágeis, os íons penetram o filme mais facilmente nessas regiões). Logo, esse tipo de corrosão ocorre em áreas restritas da armadura, caracterizando um processo de corrosão localizada, diferente da carbonatação, que despassiva a armadura ao longo de todo seu comprimento, submetendo-a a corrosão uniforme. A corrosão localizada pode ser considerada a mais grave pois, embora resulte em perda de massa inferior a corrosão uniforme, apresenta elevadas taxas de crescimento (ROCHA, 2015, p.12).

Independente da atuação dos sais como intensificadores no processo de corrosão da armadura, as consequências do processo de deterioração são as mesmas: perda de seção de aço (causando redução na aderência aço/concreto),

destacamento da camada de revestimento (em alguns casos), depósito dos produtos da corrosão sobre a superfície do concreto (atribuindo a armadura coloração marrom-alaranjada) e redução na capacidade estrutural da peça.

### 3.2.1 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

#### 3.2.1.1 *RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO*

Conforme abordado anteriormente, a relação água/cimento influencia na microestrutura do concreto (ver item 3.1.1.4). Entretanto, o transporte de íons  $\text{Cl}^-$  não ocorre apenas por difusão, o que não nos permite estabelecer proporcionalidade direta entre fator água/cimento e a penetração destes íons.

Os íons  $\text{Cl}^-$ , assim como os demais sais presentes na atmosfera marinha, também percolam no interior da estrutura por absorção capilar. A absorção capilar é resultado de tensões superficiais presentes nas paredes do capilar que, por sua vez, tem origem nas forças de adesão do fluido com o concreto. Em princípio, quanto menor o diâmetro do capilar, maior fração do fluido se adere às paredes e, dessa forma, maiores e mais rápidas absorções capilares.

Podem existir casos em que, devido a elevada finura dos agregados utilizados na produção do concreto, as conexões entre os poros são extremamente finas e se cessam em um determinado ponto, bloqueando o transporte destes íons até a armadura (SALES et al., 2014, p.112).

#### 3.2.1.2 *COMPOSIÇÃO DO CONCRETO*

Os íons  $\text{Cl}^-$ , ao adentarem o concreto, inicialmente se ligam quimicamente ao aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) (SALES et al., 2014, p.112), componente químico do cimento Portland. A adsorção dos íons cloreto por parte do concreto diminui seu fluxo até a armadura, posto que tais reações resultam em redução de íons livres na solução aquosa presente nos poros do concreto (MONTEIRO, 2002, p.24). Deste modo, estruturas com maior teor de  $\text{C}_3\text{A}$  possuem atraso no início do processo de corrosão. É importante frisar que, por mais que o concreto possua grande tendência a adsorver os íons  $\text{Cl}^-$ , sempre haverá uma certa quantidade destes íons livres na fase líquida do concreto (SALES et al., 2014, p.110).

Embora o ingresso de íons cloreto na estrutura sempre esteja associado ao contato direto ou indireto da mesma com a água do mar, é comum a incorporação de agentes agressivos durante preparo do concreto: uso de agregados e água contaminados (facilmente encontrados em regiões litorâneas), junto ao uso cada vez mais frequente de aditivos aceleradores de pega (SALES et al., 1993, p.118). Aditivos aceleradores de pega têm grande papel na deterioração pela ação de cloretos porque são compostos formados por  $\text{CaCl}_2$  (cloreto de cálcio). O cloreto de cálcio, durante a hidratação, se dissocia e libera íons  $\text{Cl}^-$ , desencadeando a despassivação e o ataque à armadura.

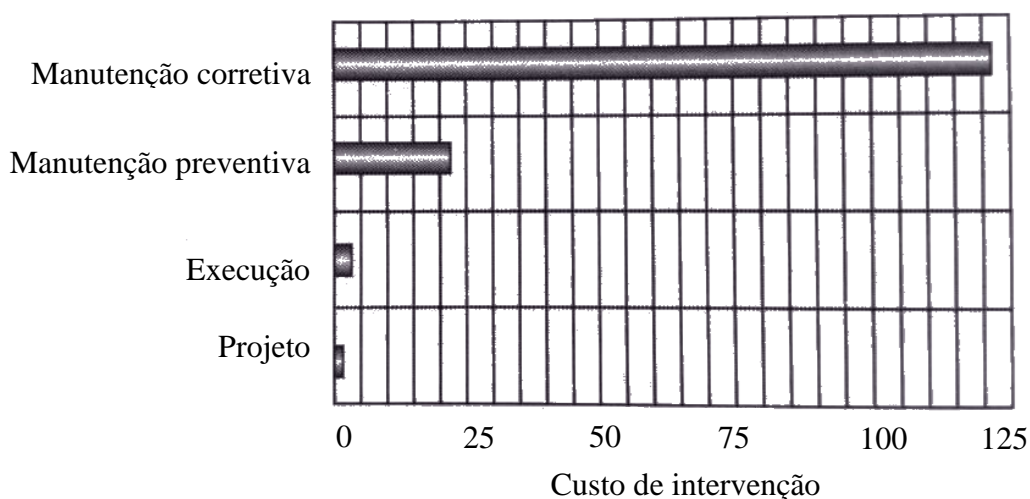
## 4 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS

### 4.1 VISÃO SISTÊMICA E MONITORAMENTO DO PROCESSO DE CORROSÃO

Toda estrutura deve apresentar elevada vida útil. A durabilidade de uma estrutura vai além da redução nos gastos com intervenção, manutenção e reparo, possuindo cunho sustentável: minimiza o uso dispendioso de energia promove a preservação dos recursos naturais, reduzindo o descarte de resíduos no ambiente e evitando o emprego de novos recursos.

O custo com reparos varia dependendo do grau de contaminação da camada de revestimento e corrosão da armadura, quando for o caso. Tendo em vista que o processo de corrosão cresce desproporcionalmente com o decorrer do tempo, quanto mais cedo houver preocupação com a durabilidade da estrutura, menores serão os danos presentes na estrutura, menor dificuldade para saná-los (ausência de técnicas complexas de recuperação) e, conseqüentemente, menor custo de reparo (SALES et al., 2014, p.45). A figura a seguir relaciona o custo de intervenção com a etapa em que a mesma é realizada.

**FIGURA 2** - Correlação entre o custo de intervenção e a fase em que ocorre



Fonte: SALES et al., 2014, p.45

Pelo fato de o processo de corrosão decorrer de um conjunto de reações químicas que acontecem no interior da estrutura, o aparecimento de um sintoma externo evidente (lascamento, fissuras, manchas na superfície do concreto, entre

outros) só ocorre após a armadura já ter sido gravemente comprometida. Conforme exposto e dado a complexidade do processo de corrosão, faz-se necessário o uso de técnicas para avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado, com a finalidade de diagnosticar a existência da corrosão em seu estado mais precoce e possibilitar a formação de um prognóstico acerca do problema (estimativa de vida útil residual, análise da evolução dos custos de intervenção no tempo, etc.).

A avaliação da estrutura pode tanto ser feita *in-loco* quanto em laboratório, sendo as técnicas eletroquímicas as mais utilizadas. A predominante utilização de técnicas eletroquímicas de avaliação em face as demais se deve pelo fato de analisarem o processo de corrosão como um processo eletroquímico e, como o processo de corrosão é de fato essencialmente eletroquímico, analisá-lo como tal se torna imprescindível para obter dados confiáveis e mais minuciosos, além ser mais rápido e não acarretar danos a estrutura.

Posto que o processo de corrosão se dá em duas etapas (contaminação da camada de revestimento e corrosão da armadura), a avaliação da camada de revestimento e da armadura é feita isoladamente, existindo técnicas destinadas a verificação da qualidade e contaminação do revestimento e técnicas destinadas a verificação do estado de deterioração da armadura. Dentre os diversos ensaios possíveis de serem empregados, os ensaios de determinação do teor de cloretos e de caracterização da profundidade de carbonatação são imprescindíveis para a avaliação da estrutura.

Diante do apresentado observa-se a relevância do conhecimento técnico sobre o processo de corrosão - necessário para a escolha correta das técnicas a serem empregadas na avaliação da estrutura - e, sobretudo, a importância do diagnóstico precoce do processo de corrosão, por ser fator determinante na escolha da estratégia de intervenção a adotar e no emprego de técnicas de reparo menos complexas e dispendiosas.

## 4.2 INTRODUÇÃO A REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS

Uma das decisões mais importantes a serem tomadas em se tratando de reabilitação de estruturas é determinar o método de intervenção que será utilizado. Nos casos em que a corrosão se dá pelo fenômeno de carbonatação e/ou pela ação

de íons cloreto, os métodos mais utilizados são os convencionais e os de natureza eletroquímica (SALES et al., 2014, p.223).

O método de reparação tradicional (ou convencional) consiste na substituição do material contaminado por material novo. Posto que, após a remoção da região contaminada, não haverá agentes agressivos presentes na estrutura, haverá relativa liberdade quanto a escolha do mecanismo de proteção a ser utilizado (dado a ausência de contaminação, basta dificultar a entrada do agente agressivo à estrutura ou impedir que as reações que desencadeiam a deterioração se iniciem), sendo eles: passivação, barreira, inibidor e proteção catódica (MONTEIRO, 2002, p.47).

Em teoria, o reparo convencional é altamente eficiente. Entretanto, é praticamente impossível a completa remoção de toda a área contaminada. Remover totalmente a área contaminada vai além de apenas remover o concreto da parte deteriorada, sendo necessário a remoção do concreto situado após a camada de cobertura e nas zonas não deterioradas, fazendo com que o reparo convencional se torne inviável em sua execução e, nos casos de corrosão pela ação de íons cloreto, seja responsável por acelerar processo de corrosão da armadura.

Ao contrário do reparo convencional, os métodos de tratamento eletroquímico não necessitam de remoção do material contaminado, caracterizando a reabilitação eletroquímica como um processo não destrutivo. Assim, descarta-se a possibilidade de deterioração da armadura, evitando que a segurança da estrutura seja comprometida, salvo benefícios como: redução dos impactos no meio ambiente e menor desgaste físico na execução (trabalho de menor intensidade).

Diante do elucidado, a utilização de processos eletroquímicos representa, na maioria das situações, a alternativa mais econômica e eficaz na reabilitação de estruturas. Nos casos de corrosão por carbonatação e ação de íons cloreto, os métodos eletroquímicos mais utilizados, de acordo com Sales et al. (2014, p.223), são, respectivamente, a realcalinização e a dessalinização. Dentre as técnicas mais utilizadas em casos de contaminação por sais, a dessalinização divide espaço com proteção catódica; porém, no decorrer deste capítulo será abordado apenas sobre a realcalinização e a dessalinização por serem métodos que tem aplicação temporária, ao contrário da proteção catódica, que perdura por toda a vida útil da estrutura.



## 4.3 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA (RAE)

### 4.3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS

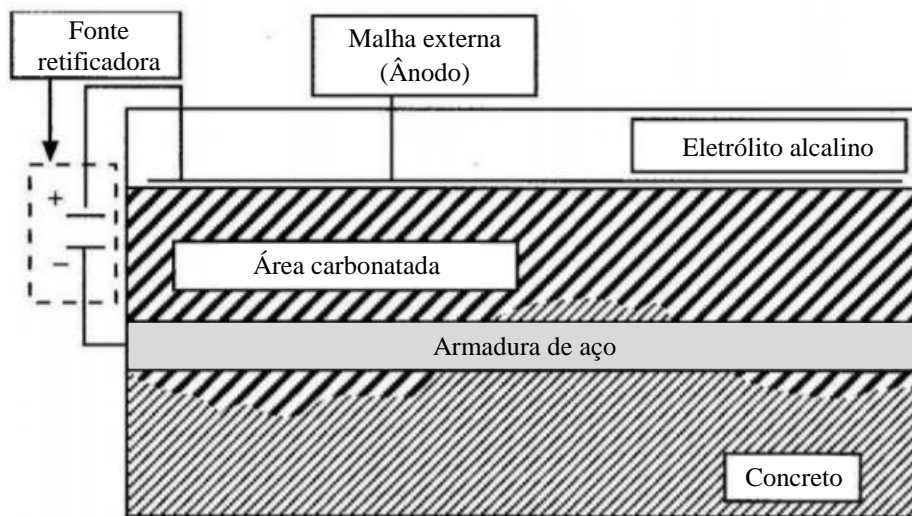
A técnica de realcalinização tem por objetivo restabelecer a passivação da armadura por meio da elevação do pH do concreto, sendo um tratamento não destrutivo (sem a necessidade de rompimento estrutural do concreto contaminado) e temporário. Esta técnica pode ser usada tanto na recuperação quanto na prevenção de estruturas que apresentem perda do filme passivo devido a presença de  $\text{CO}_2$  no interior do concreto.

Com a redução no pH do concreto, resultado da dissolução do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , o filme passivo perde estabilidade, se tornando menos aderente e compacto, deixando de atuar como barreira ao avanço da corrosão. Em face disso, a realcalinização objetiva retomar a estabilidade inicial do filme passivo trazendo o pH de volta às condições originais, através do transporte de solução alcalina para o interior do concreto.

A incorporação de solução alcalina, responsável no concreto pode ser efetuada tanto pelo processo de realcalinização química (RAQ) quanto pelo processo de realcalinização eletroquímica (ERA), objeto de estudo desse item. Na RAQ, a solução alcalina penetra o concreto apenas por meio de mecanismos de difusão e absorção capilar, sem aplicação de corrente e ação de campo elétrico. Já na RAE, a solução alcalina penetra o concreto mediante a aplicação de corrente e conseguinte formação de campo elétrico.

### 4.3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA TÉCNICA

A aplicação da RAE envolve a aplicação de corrente elétrica, criando um campo elétrico entre a superfície do concreto e a armadura. A aplicação de corrente é realizada com o auxílio de uma fonte retificadora, conectando a armadura a uma malha externa fixada na superfície da estrutura. A fonte retificadora é acoplada à estrutura de forma que a malha externa funcione como ânodo (sendo conectada ao polo positivo da fonte) e a armadura funcione como cátodo (sendo conectada ao polo negativo da fonte), conforme esquema apresentado na figura a seguir.

**FIGURA 3 -** Arranjo da fonte retificadora empregado na RAE

**Fonte:** Mietz (1998) *apud.* Ribeiro (2009)

A malha externa (ânodo) deve ser imersa em fibra de celulose saturada com solução alcalina (eletrólito) e projetada sobre a superfície do concreto carbonatado. Existem outras alternativas para garantir o contato da solução eletrolítica com a superfície do concreto carbonatado, onde a escolha da melhor alternativa vai depender das situações reais de operação. A fixação da malha e do eletrólito na superfície da estrutura acontece da seguinte forma: primeiramente é fixado sobre o concreto uma camada de fibra de celulose saturada de eletrólito, que receberá a malha externa (Figura 4a); após acoplada a malha externa, a mesma é revestida por uma segunda camada de eletrólito e, por fim, revestido com película de plástico, responsável por dar sustentação ao sistema (Figura 4b).

**FIGURA 4 -** Aplicação do sistema anódico sobre a estrutura para início da ERA

(a)



(b)

**Fonte:** Bertolini (2008) *apud.* Ribeiro (2009)

A malha utilizada na RAE usualmente é de titânio por oxidar mais lentamente e apresentar produtos de corrosão menos expansivos (ARAÚJO, 2009, p.28). De acordo com SALES et al. (2014, p.240), não convém o uso de barras de aço para desempenhar o papel de ânodo no processo de realcalinização; como o tratamento é de curta duração, a malha consegue desempenhar seu papel sem ser consumida por completo.

No que tange a escolha do eletrólito a ser empregado, grande parte das bibliografias adotam o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), alegando maior eficiência frente as demais opções. Todavia, outras soluções alcalinas têm sido buscadas, não havendo hoje um consenso entre os pesquisadores sobre qual a melhor solução para recuperação de estruturas carbonatadas, como pode ser observado na Tabela 1.

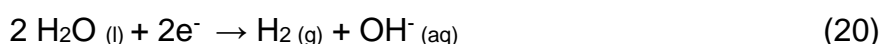
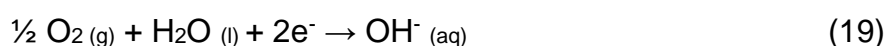
**TABELA 1** - Composição e pH de soluções alcalinas propostas por diferentes autores para reabilitação de estruturas carbonatadas.

Composição	pH	Pesquisador
1 M $\text{K}_2\text{CO}_3$	-	Fosroc (s/d)
2 N $\text{Li}_3\text{BO}_3$	12	Matsumoto et al. (2003)
Solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	12,5	Moreno et al. (2004)
KOH (15g / 100ml)	13	Araújo (2004) e Sá (2006)

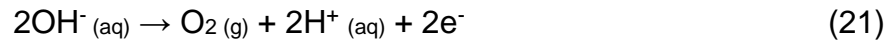
**Fonte:** Adaptado de Araújo (2009).

A corrente aplicada ao sistema permite o reestabelecimento do pH do concreto mediante dois mecanismos: aumento da alcalinidade nas proximidades da armadura por meio do processo de eletrólise da água, e o fluxo de solução alcalina em direção a armadura, predominantemente de caráter eletro-osmótico.

A eletrólise é um processo físico-químico não espontâneo gerado pelo fornecimento de energia elétrica, capaz de promover a dissociação ou a formação de compostos. O caso da RAE, a diferença de potencial entre a malha e a armadura é responsável pela eletrólise da água presente no interior do concreto. Em condições aeradas (presença de  $\text{O}_2$ ), a hidrólise apresenta-se conforme descrito na reação 7.19; já em condições onde o  $\text{O}_2$  já foi consumido pela reação 7.19, a hidrólise tem continuidade conforme expresso na reação 7.20 (RIBEIRO, 2009, p.43).

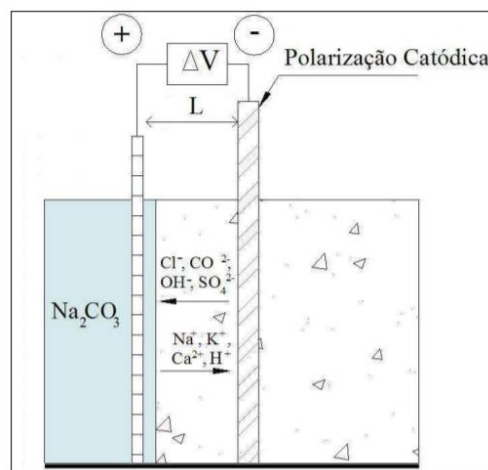


A água consumida no processo de hidrólise encontra-se aderido à parede dos poros do concreto, extraída por meio da influência do campo elétrico. Já os elétrons consumidos pela eletrólise têm-se origem em uma das reações de desprendimento do oxigênio na superfície da malha de titânio:



Devido a diferença de potencial, os íons de carga positiva migrarão em direção a armadura (cátodo) e os íons de carga negativa migrarão em direção a malha de titânio (ânodo), conforme representado pela Figura 5.

**FIGURA 5** - Representação esquemática migração de íons durante a RAE



Fonte: Ribeiro (2009)

A medida que os íons  $\text{Na}^+$  presentes na solução intersticial do concreto são transportados para a região catódica, os mesmos reagem com parte dos íons  $\text{OH}^-$ , produzindo compostos alcalinos e, com isso, elevando o pH da região do entorno da armadura para valores acima de 13,5 (SALES et al., 2014, p.) e passivando-a. Em paralelo a migração dos íons de carga positiva ocorre a migração de íons  $\text{HCO}_3^-$  e parte dos íons  $\text{OH}^-$  para região anódica. Quando os íons  $\text{HCO}_3^-$  aproximam-se do eletrólito, a interface concreto/eletrólito passa a comportar-se de forma similar a uma membrana: de um lado, existe um excesso de cargas de mesmo sinal que são contrabalanceadas por um excesso de cargas de sinal contrário do outro lado. Os íons

$\text{Na}^+$  presentes no eletrólito movem-se em direção aos íons  $\text{HCO}_3^-$  presentes na face do concreto, formando  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (composto alcalino), que passa a ser transportado para a armadura. Vale ressaltar que as reações químicas e os compostos formados vão variar conforme o eletrólito a ser utilizado no tratamento.

Com o avanço da RAE, vão sendo produzidos íons  $\text{H}^+$ , composto ácido e de elevada mobilidade iônica. Para que o excesso de acidez não tenda a reduzir o pH do concreto durante o tratamento, realiza-se a substituição este eletrólito por uma nova camada de fibra de celulose saturada em  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Embora os mecanismos de hidrólise e eletro-osmose sejam os mais relevantes no tratamento por RAE, também estão presentes mecanismos de eletromigração, absorção capilar e difusão. Há casos em que, segundo Bertolini et al. (2008) *apud*. Ribeiro (2009, p.51), a eletromigração se sobrepõe a eletro-osmose.

#### 4.3.3 FATORES QUE INFLUEM NA RAE

No processo de RAE geralmente é realizado sob uma densidade de corrente variando de 1 a  $2\text{A}/\text{m}^2$ , durante um período de 3 dias a 3 semanas (BERTOLINI et al., 1996, p.52). Os limites máximos e mínimos levam em consideração a resistividade do concreto a passagem de corrente elétrica e os efeitos prejudiciais decorrentes da aplicação de elevada corrente elétrica. O tempo de duração vai depender de fatores como: distribuição da corrente, da profundidade de carbonatação e da espessura e qualidade da camada de cobrimento (RIBEIRO, 2009, p.51).

A camada de cobrimento da estrutura atua como barreira a passagem de corrente devido a sua resistividade. Como a perda de energia por efeito Joule<sup>3</sup> é desprezível, tem-se concreto atuando como resistor ôhmico, o que facilita na previsão de densidade de corrente passante pelo sistema. Para que o processo de tratamento por RAE seja bem-sucedido, é necessário que haja uniformidade no fluxo de corrente (ARAÚJO, 2009, p.29). As condições necessárias para a eficácia do processo de realcalinização devem ser verificadas antes de iniciar o tratamento.

Cobrimentos com baixa relação a/c influenciam na dinâmica da RAE, uma vez que elevam a resistividade do concreto, demandando maior densidade de carga

---

<sup>3</sup> Efeito Joule: resultado da aplicação de corrente elétrica, onde os elétrons em movimento colidem com outras partes do condutor, produzindo efeito de aquecimento. O efeito Joule é proporcional a resistência do condutor.

e, conseqüentemente, maior tempo de reparo (ideia válida para camada de cobrimento de maior espessura).

No que tange a espessura do cobrimento, é importante que a espessura seja uniforme em toda a extensão da área a ser tratada, de forma que o fluxo de corrente seja uniforme (cobrimentos de espessura não uniforme propicia o fluxo mais intenso de corrente nas regiões de menor espessura, ocasionando a formação de macropilhas). Outro fator que influencia na uniformidade do fluxo de corrente é a existência de ninhos de concretagem e/ou fissuras, o que também deve ser observado antes do início do tratamento. Nos casos onde for constatado a existência de fissuras e/ou ninhos de concretagem, é necessário reparar essas áreas, removendo o concreto e substituindo-o por concreto compatível ao original.

A verificação de todas as condições apresentadas é dificultada quando se trabalha com extensas áreas de tratamento. Quanto menor a área de tratamento, maior praticidade no controle das características do cobrimento e maior precisão durante a RAE. Segundo Araújo (2009, p.30), “como regra geral não é recomendada que as zonas de tratamento tenham uma extensão maior do que 100m<sup>2</sup>”.

#### 4.3.4 FINALIZAÇÃO DO TRATAMENTO

Segundo Sales et al. (2014, p.240), o fim do tratamento é determinado através da medição regular do pH. O pH a ser alcançado com a realcalinização deve preferencialmente situar-se entre 13 e 14, visto que passados alguns meses o pH obtido com a RAE passa por um decréscimo. Tal fenômeno deve ser previsto no momento de estimar o tempo de duração da RAE, uma vez que se trata de um processo natural de equilíbrio com as regiões adjacentes não realcalinizadas.

A fim de analisar a eficiência do processo de RAE, uma das ferramentas utilizadas são os indicadores químicos de pH, aplicado sobre a armadura e sobre a superfície do concreto realcalinado. Porém, a indicação colorimétrica se faz insuficiente como parâmetro capaz de definir a eficiência da realcalinização, uma vez que estabelece apenas uma faixa de pH para o concreto, e não o valor real (ARAÚJO, 2009, p.41). Para análise completa da eficiência do processo de RAE, se faz necessário o uso de técnicas eletroquímicas para avaliação da repassivação em adição ao uso dos indicadores de pH.

Para verificação do grau de repassivação da armadura, as técnicas utilizadas em estruturas reais divergem das técnicas utilizadas em corpos de prova (ensaios realizados em laboratório). *In-loco* são utilizadas técnicas de potencial de corrosão e resistência de polarização (ELSENER, 2001, *apud.* RIBEIRO, 2009, p.64). Entretanto, técnicas de caráter eletroquímico carecem de avaliação minuciosa dos resultados, uma vez que a armadura se encontra polarizada após o término do tratamento (ARAÚJO, 2009, p.41). Outra alternativa pode ser o emprego das técnicas eletroquímicas após a despolarização da armadura.

Por fim, após todas as etapas pertinentes a RAE, é realizado o revestimento da estrutura. O revestimento da região realcalinizada é opcional e tem por objetivo restringir o transporte de CO<sub>2</sub> para o interior do concreto. O revestimento pode ser realizado, de acordo com Ribeiro (2009, p.63), por meio de pintura ou concreto projetado sobre a superfície da estrutura. Em caso de preferência pela pintura, deve-se ater ao seguinte detalhe: a base dos materiais utilizados para pintura (tintas, vernizes, etc.) são os ácidos graxos, que reagem com compostos alcalinos formando sal orgânico. Portanto, ao se fazer uso de pinturas, deve-se procurar por materiais com alta resistência a bases fortes. Antes da aplicação do revestimento, é necessário a limpeza da superfície de concreto realcalinizada, a fim de remover partículas remanescentes (fibras de celulose) da fixação do eletrólito, garantindo a boa aderência do mesmo.

## 4.4 DESSALINIZAÇÃO

### 4.4.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS

O procedimento de dessalinização (também denominado extração eletroquímica de cloretos), adotado na reabilitação de estruturas contaminadas por sais, funciona de forma similar à técnica de realcalinização eletroquímica: devido a diferença de potencial (fruto da aplicação de campo elétrico), as cargas negativas se movem em direção ao exterior da estrutura e as cargas positivas se movem em direção ao interior da estrutura, processo denominado eletromigração. Uma vez que os íons Cl<sup>-</sup> possuem carga negativa, os mesmos migrarão em direção ao ânodo, culminando na remoção do agente agressivo da estrutura e aumento do pH na região próxima a armadura, resultado da eletrólise. Diante disso, temos que as técnicas de

RAE e dessalinização partem do mesmo princípio, portanto, apresentam mesmo procedimento de reparo. As diferenças entre a dessalinização e a RAE são pontuais e, no geral, estão ligadas a detalhes que visam otimizar o processo de tratamento da estrutura.

Diferente da corrosão por carbonatação, o início da corrosão por íons cloreto não está ligada a redução no pH da estrutura, e sim pelas falhas existentes no filme passivo (resultante da presença de  $\text{Cl}^-$ ), por onde os estes íons passam e reagem diretamente com o ferro metálico. Logo, em estruturas contaminadas por sais, a eletromigração é tão importante quanto a hidrólise pois é responsável pela extração dos íons  $\text{Cl}^-$  da estrutura, fazendo com que o mecanismo autossuficiente de produção destes íons se cesse. Assim, a eletrólise possui duplo papel na dessalinização, elevando o pH do concreto e estimulando as reações de dissolução do  $\text{FeCl}_3$ ; enquanto, por eletromigração, os íons  $\text{Cl}^-$  vão sendo transportados em direção ao eletrólito projetado na face da estrutura. Com o decorrer do tratamento, a concentração de  $\text{FeCl}_3$  vai sendo reduzida, interrompendo a produção de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

Devido à autossuficiência do processo de corrosão por íons cloreto, o tempo de duração do tratamento varia, segundo Sales et al. (2014, p.237), entre quatro a sete semanas. A malha a ser utilizada no tratamento pode ser de titânio ou de aço carbono, onde a escolha da malha mais adequada ao tratamento vai depender de sua viabilidade técnica e custo.

Quanto ao eletrólito, o mais utilizado na dessalinização é a água tratada. Na RAE o eletrólito sempre é um composto alcalino, obrigatoriedade que não necessita ser atendida com a dessalinização. Isso porque, na RAE, parte dos íons  $\text{CO}_3^-$  reagem com os íons  $\text{Na}^+$  (presentes no eletrólito) formando  $\text{NaCO}_3$  (por meio do fluxo eletro-osmótico) e outra parte reagem com os íons  $\text{OH}^-$  formando  $\text{NaOH}$ , o que não se faz necessário na dessalinização. Na dessalinização, os íons  $\text{Cl}^-$  transportados para o eletrólito reagiriam com os íons  $\text{Na}^+$  e ter-se-ia então a formação de sais no interior da estrutura, sendo prejudicial ao tratamento. Além disso, a água tratada é de mais fácil acesso e possui menor custo, tornando seu uso ainda mais atrativo.

Durante o processo de dessalinização, é importante monitorar o pH do eletrólito, que se acidifica com o decorrer do tratamento devido a produção de íons  $\text{H}^+$ . Além de diminuir o pH do eletrólito, os íons  $\text{H}^+$  migram em direção a armadura, onde reagem com os íons  $\text{Cl}^-$ , formando  $\text{HCl}$ , composto de acidez elevada. Em situações onde o eletrólito se encontra em condições de pH inferiores a 6 (SALES et



al., 2014, p.238), realiza-se a substituição do eletrólito. Outro problema presente nos reparos de estruturas contaminadas por íons cloreto é a produção de gás cloro no sistema anódico, altamente tóxico e prejudicial à saúde (MONTEIRO, 2002, p.58).

Diante dos contratempos apresentados durante a dessalinização, buscam-se outros eletrólitos, no intuito de suavizar os infortúnios ocasionados com o decorrer do reparo. Segundo Monteiro (2002, p.58), o  $\text{Ca(OH)}_2$  demonstra ser uma alternativa em potencial, uma vez que, por ser um composto básico, é um eletrólito com menor possibilidade de se tornar ácido, amenizando problemas com relação a acidificação do eletrólito.

#### 4.4.2 FINALIZAÇÃO DO TRATAMENTO

Na dessalinização, o fim do tratamento é determinado pelo conteúdo de íons cloreto no interior da estrutura. Para tal, é preciso determinar também o teor de íons cloreto antes do tratamento, a título de obtenção de parâmetros para comparação. De acordo com Sales et al. (2014, p.238), o tratamento deve ser finalizado quando o teor de íons cloreto na região próxima a armadura alcançar valores em torno de 0,2 a 0,4% da massa de concreto.

É importante frisar a impossibilidade de completa extração de cloretos e que, como na realcalinização, existe o risco de início de uma nova corrosão, tanto pelo cloreto existente nas regiões de concreto situadas atrás da armadura quanto pelo cloreto remanescente do processo de reparo.

Finalizado o tratamento, todo o sistema anódico é removido (malha e eletrólito), a superfície do concreto passa por um procedimento de limpeza e, então, aplica-se a pintura. No processo de dessalinização, a etapa de limpeza é tão importante quanto a pintura: devido ao seu maior tempo de duração, a utilização de malhas de material consumível pode resultar em deposição de óxidos na superfície da estrutura. Nesses casos, é preciso remover toda a mancha de óxido para dar prosseguimento com a execução do revestimento.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o desenvolvimento deste estudo, pôde-se concluir que entender como o mecanismo de corrosão se processa (desde a incorporação de agentes agressivos até a infinidade de reações químicas ocorrendo simultaneamente no interior da estrutura) é imprescindível para o emprego das técnicas adequadas para a reabilitação da estrutura. Entender o processo de corrosão permite entender a necessidade de cada passo a ser seguido na etapa de tratamento bem como a capacidade de intervir em algum estágio do processo de reparo, de forma a contribuir beneficentemente para o restabelecimento das características iniciais do elemento estrutural (seja para aumentar a eficiência do tratamento, minimizar efeitos indesejados decorrentes da recuperação, entre outros.).

O tratamento pelo uso de técnicas eletroquímicas põe-se como uma alternativa mais atrativa perante o reparo convencional (sem riscos de deterioração da armadura, menor impacto aos trabalhadores e ao meio ambiente pela geração de poeira e barulho, etc.). É uma metodologia de reparo que possui pontos potencialmente negativos (resultado do próprio princípio do tratamento), porém, que podem ser mantidos em um nível tolerável (ou até mesmo evitado) apenas submetendo o sistema a baixos valores de densidade de carga passante total e de densidade de corrente.

O mecanismo de funcionamento do processo de reabilitação eletroquímica propõe o encerramento do processo de corrosão, mas não prevê a reposição da área de aço perdida pelo processo de corrosão. Em estágios avançados de corrosão, as técnicas de tratamento eletroquímicas deixam de ser viáveis, tanto pela perda da eficiência do tratamento quanto pela substancial redução na resistência da estrutura, devendo, nesses casos, ser descartado seu emprego.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Fernanda Wanderley C. de. **Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatado através da técnica de realcalinização química**. São Paulo, 2009.
- ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- BERTOLINI, Luca; BOLZONI, Fabio, BERNHARD Elsener; PEDEFERRI, Pietro; ANDRADE, Carmen. La realcalinización y la extracción electroquímica de los cloruros en las construcciones de hormigón armado. **Materiales de Construcción**, v.46, n. 244, p. 45-55, octubre – noviembre – diciembre. 1996
- HELENE, Paulo Roberto do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA: **Tabela de recursos e usos – 2017 – valores correntes**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html?=&t=downloads>. Acesso em: 13 abr. 2019.
- MONTEIRO, Eliana Cristina B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras**. São Paulo, 2002.
- National Research Council. **Concrete Durability: A Multibillion-Dollar Opportunity**. Washington, DC: The National Academies Press, 1987.
- RIBEIRO, Philippe Hypólito Lins C. **Realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas inseridas no meio urbano – influência de características da estrutura no comportamento do tratamento**. João Pessoa, 2009.
- ROCHA, Ivan. Corrosão em estruturas de concreto armado. **Especialize**, Goiânia, v. 1, dez. 2015.
- SALES, Almir; SOUSA, Carlos Alberto C. de; ALMEIDA, Fernando do Couto R.; CUNHA, Manuel Paulo T.; LOURENÇO, M. Zita; HELENE, Paulo. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- SANTOS, Aleilson Vilas-Bôas. Corrosão de armaduras de concreto armado devido a carbonatação. **Especialize**, Salvador, v. 1, dez. 2015.
- TORRES, Ariela da Silva. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise**. Porto Alegre, 2011.

ZEMPULSKI, Landislau N.; ZEMPULSKI, Marina Fernanda S. **Dossiê técnico.**  
Disponível em: <http://respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MTM0>.  
Acesso em: 18 mar. 2019.