

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Bruno Lopes de Oliveira

**CORROSÃO DO AÇO NO CONCRETO ARMADO INDUZIDA POR  
CARBONATAÇÃO: PRINCIPAIS TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO**

Santa Maria, RS  
2019

**Bruno Lopes de Oliveira**

**CORROSÃO DO AÇO NO CONCRETO ARMADO INDUZIDA POR  
CARBONATAÇÃO: PRINCIPAIS TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti

Santa Maria, RS  
2019

**Bruno Lopes de Oliveira**

**CORROSÃO DO AÇO NO CONCRETO ARMADO INDUZIDA POR  
CARBONATAÇÃO: PRINCIPAIS TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

**Aprovado em 18 de julho de 2019:**

---

**Marcos Alberto Oss Vaghetti, Prof. Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Tobias Pigatto Ottoni, Eng. Civil**

---

**Mirela Schramm Tonetto, Prof<sup>a</sup>. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, em especial meu pai e minha mãe que estiveram sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Agradeço a minha namorada Fernanda que esteve presente em grande parte da minha graduação, me incentivando e dando apoio e auxiliando nas decisões necessárias da vida.

Agradeço aos meus amigos a qual se fizeram presente na minha trajetória acadêmica.

Agradeço a todos os professores da UFSM que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica e em especial ao professor orientador que me auxiliou para a realização e elaboração do trabalho de conclusão de curso.

## RESUMO

### CORROSÃO DO AÇO NO CONCRETO ARMADO INDUZIDA POR CARBONATAÇÃO: PRINCIPAIS TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO

AUTOR: Bruno Lopes de Oliveira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti

A corrosão nas estruturas de concreto armado é um fenômeno preocupante para o profissional da Engenharia Civil, visto que há uma grande ocorrência do mesmo nas edificações, e pode vir a comprometer a função da estrutura. A carbonatação é um dos principais fenômenos que tem grande influência na durabilidade das estruturas por ser um agente facilitador do processo da corrosão. Por mais que sua atuação seja mais lenta comparada aos íons cloretos, representa uma deterioração perigosa, pois diminui a alcalinidade do concreto, conseqüentemente a alteração da estabilidade química da película passiva da armadura. Desse modo, o presente trabalho consiste em realizar uma revisão bibliográfica acerca do fenômeno da corrosão ocasionado pela carbonatação, bem como as suas manifestações e causas. A partir de tal revisão, o enfoque do trabalho consiste em identificar as principais técnicas de recuperação do aço quando o agente de deterioração é a carbonatação do concreto. A partir do estudo das técnicas de recuperação, sendo elas a reparação convencional, a realcalinização e a proteção catódica, foi possível constatar, ao realizar um comparativo entre os métodos, a grande eficiência da proteção catódica em relação às demais, uma vez que é a técnica mais valiosa para a reabilitação de estruturas de concreto. Dessa maneira, fica evidente a necessidade de analisar as manifestações patológicas da estrutura, para então, indicar a melhor técnica para recuperar a corrosão frente à carbonatação na estrutura de concreto armado.

**Palavras chave:** Manifestações patológicas; Corrosão do aço; Recuperação; Proteção.

## ABSTRACT

### **CORROSION OF STEEL IN ARMED CONCRETE INDUCED BY CARBONATING: MAIN RECOVERY TECHNIQUES**

AUTHOR: Bruno Lopes de Oliveira  
ADVISOR: Prof. Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti

Corrosion in reinforced concrete structures is a worrying phenomenon for the Civil Engineering professional, since there is a great occurrence of the same in the buildings, and can compromise the function of the structure. Carbonation is one of the main phenomena that has a great influence on the durability of the structures because it is an agent that facilitates the corrosion process. Although its performance is slower compared to chloride ions, it represents a dangerous deterioration, because it reduces the alkalinity of the concrete, consequently the alteration of the chemical stability of the passive film of the armature. Thus, the present work consists in carrying out a bibliographical review about the phenomenon of corrosion caused by carbonation, as well as its manifestations and causes. From this review, the focus of the work is to identify the main techniques of recovery of the steel when the deteriorating agent is the carbonation of the concrete. From the study of the recovery techniques, which were the conventional repair, the realcalinization and the cathodic protection, it was possible to verify, when comparing the methods, the great efficiency of the cathodic protection in relation to the others, since it is the most valuable technique for the rehabilitation of concrete structures. In this way, it is evident the need to analyze the pathological manifestations of the structure, to indicate the best technique to recover the corrosion against carbonation in the reinforced concrete structure.

**Keywords:** Pathological manifestations; Steel corrosion; Recovery; Protection.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	9
1.2 OBJETIVOS .....	10
1.2.1 Objetivo geral.....	10
1.2.2 Objetivos específicos.....	10
<b>2 METODOLOGIA .....</b>	<b>10</b>
<b>3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DA CORROSÃO DO AÇO NO CONCRETO ARMADO .....</b>	<b>11</b>
<b>4 PATOLOGIAS DO AÇO NO CONCRETO ARMADO: CORROSÃO .....</b>	<b>12</b>
4.1 TIPOS DE CORROSÃO.....	14
4.2 AGENTES FACILITADORES DA CORROSÃO DA ARMADURA.....	15
4.2.1 Relação meio ambiente.....	15
4.2.2 Relação água/cimento na qualidade do concreto.....	17
4.2.3 Concreto de cobrimento .....	18
4.3 AGENTE CAUSADOR: CARBONATAÇÃO .....	20
<b>5 TÉCNICAS DE PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO DA CORROSÃO NA ARMADURA .....</b>	<b>27</b>
5.1 TÉCNICAS DE PREVENÇÃO À CORROSÃO DA ARMADURA .....	27
5.1.1 Uso de aditivos inibidores.....	27
5.1.2 Armaduras especiais.....	28
5.1.3 Revestimento do concreto.....	29
5.1.4 Proteção catódica.....	31
5.2 TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO À CORROSÃO DA ARMADURA .....	34
5.2.1 Reparo convencional .....	34
5.2.2 Realcalinização .....	41
5.2.3 Proteção catódica.....	44
5.2.4 Considerações e comparativo entre as técnicas apresentadas .....	48
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>51</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em algum momento, o profissional da engenharia civil poderá ser submetido a questionamentos ou estará diante de algum problema sobre corrosão nas estruturas de concreto armado e nem sempre será fácil encontrar tal explicação, visto a complexidade do assunto. Um exemplo é o fato de uma estrutura estar corroída e enquanto outra, em tudo semelhante e/ou similar, não apresentar ou não chegar a vir apresentar o problema da corrosão.

As armaduras de aço são introduzidas como componentes estruturais, pois possuem a função de absorver os esforços de tração na estrutura, e estas são os elementos atingidos pela corrosão. Estas são protegidas pelo concreto de cobertura, o qual é responsável por barrar os agentes causadores da degradação da armadura. Caso ocorra uma falha na mesma, há possibilidade da ocorrência de processos corrosivos, em especial pela carbonatação do concreto. Tais processos levam à ocorrência de sintomas visíveis no concreto de cobertura ou em toda estrutura.

As manifestações patológicas, os sintomas visíveis das estruturas, servem como indicador de que algo na estrutura está acontecendo, servindo como indicativo de que a estrutura possa estar com alguma “doença”, como a corrosão do aço, e possibilita ações preventivas contra os processos corrosivos, visto que é um fenômeno que pode vir a desenvolver custos elevados. Tais ações possibilitam reparos mínimos, reduzindo os custos e evitando situações desconfortáveis a seus usuários.

Os problemas de corrosão das estruturas, os denominados sintomas visíveis, aparecem, geralmente, após vários anos da estrutura em uso, que pode ser acima de 10 a 15 anos. Em casos raros, o problema de corrosão pode se manifestar a curto prazo (menos de dois anos) ou mesmo na fase de execução, sendo importante ressaltar a existência de agentes facilitadores para tal processo (HELENE, 1993).

Em detrimento dessa razão, há certa dificuldade perante a escolha da medida preventiva a se adotar durante a aparição dos sintomas, como por exemplo, aumento da resistência característica, aumento da espessura de cobertura, redução da relação água/cimento, dentre outras. Já em relação a corrosão da armadura, patologia já em curso na armadura, há diversas técnicas de recuperação,



porém, muitas de custos elevados, levando a escolhas entre as mais baratas, porém nem sempre a mais efetiva.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Por mais que haja uma grande evolução dos materiais e técnicas de construção e execução dos projetos, é constatado grande número de edificações apresentando alguma manifestação patológica. Uma das ocorrências é o fato de projetistas optarem pela redução da espessura de cobrimento em nome da pseudoeconomia da obra. Tal redução pode acarretar diminuição na durabilidade e vida útil das estruturas, conseqüentemente, a deterioração prematura do concreto armado.

O início da corrosão se dá por agentes que podem acarretar em uma desestabilização dos processos químicos do concreto, sendo os principais a carbonatação e os íons cloretos. Em geral, o ataque dos íons cloretos se dá em ambientes marítimos, já a carbonatação, é mais corriqueira, visto que é comum a presença de  $\text{CO}_2$  em todo tipo de atmosfera, e há grandes agentes facilitadores ao início desse processo, como o concreto de cobrimento, a qualidade do concreto, o meio a qual a estrutura está inserida, entre outros. Porém, vale ressaltar que tais agentes, sozinhos, não conseguem dar início à corrosão, sendo indispensável a existência de agentes causadores, como os já mencionados íons cloreto e carbonatação (HELENE, 2018).

Como os problemas visíveis de corrosão tem um período longo, em geral, para dar início às suas aparições, é negligenciado ou passado despercebido quando inicia sua ocorrência. Um programa eficiente é a inspeção/manutenção periódica, o que garantirá durabilidade e permite estabelecer prioridades para as ações necessárias em detrimento da vida útil prevista, porém, tal programa, é praticamente nulo em execução.

Nesse sentido, o tratamento tardio, inadequado ou inexistente das manifestações acarreta na ocorrência do processo corrosivo, que pode gerar perda significativa na resistência dos elementos estruturais, podendo levar ao colapso da edificação.

Partindo desse pressuposto, faz-se a necessidade de um estudo com o intuito de identificar a origem das manifestações patológicas corrosivas, o estudo dos

processos corrosivos já em vigor apresentando soluções que possam gerar a erradicação total ou parcial da patologia, proporcionando a recuperação da estrutura, conservando sua resistência, vida útil e durabilidade. Também, um comparativo entre as técnicas de recuperação, relacionando a questão custo x benefício em suas execuções para identificar a mais vantajosa para execução.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Estudar as principais técnicas de recuperação do aço na estrutura de concreto armado a partir da avaliação das manifestações patológicas e consequente degradação sofrida pelos elementos estruturais, provenientes de processos corrosivos induzidos pela carbonatação do concreto.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar as manifestações patológicas na estrutura de concreto armado proveniente da corrosão no aço;
- Identificar os principais agentes facilitadores de processos corrosivos do aço no concreto armado;
- Analisar a carbonatação do concreto como causador do processo corrosivo da armadura;
- Estudar as principais técnicas de recuperação do aço no concreto armado;
- Comparar as técnicas mais utilizadas conforme custo X benefício.

## 2 METODOLOGIA

Este trabalho se trata de uma pesquisa de ordem qualitativa com revisão bibliográfica. Para a realização do mesmo, foram efetuadas pesquisas nos mais diversos meios a fim de adquirir conhecimento acerca do tema sobre o fenômeno da corrosão. Após obter o aporte teórico, deu-se início ao desenvolvimento da presente pesquisa.

Em seguida, através da sintomatologia, foram analisadas de forma breve as manifestações patológicas na estrutura de concreto armado provenientes da corrosão no elemento estrutural, identificando suas possíveis causas e formas de ocorrência, bem como suas principais características. Após identificar tais sintomas, foram estudadas as causas mais corriqueiras, como, por exemplo, o meio ambiente a qual a edificação está inserida pode afetar o processo corrosivo nos elementos estruturais.

Por fim, como objetivo do mencionado trabalho, foram investigadas as principais técnicas de recuperação do aço na estrutura de concreto armado e com o auxílio de tal pesquisa, foi possível realizar um comparativo entre tais técnicas, analisando as mais utilizadas e a relação custo x benefício entre as mesmas.

### **3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DA CORROSÃO DO AÇO NO CONCRETO ARMADO**

Entende-se por manifestação patológica a expressão resultante de um mecanismo de degradação, diferente do termo patologia, o qual é entendido como o conjunto de teorias que servem para explicar o mecanismo e a causa da ocorrência de tal manifestação.

De forma simplificada, aplicando o conceito à estrutura, a manifestação patológica se trata do sintoma apresentado pela mesma por possuir determinada “doença”. Dado isso, é nesse pressuposto que parte a complexidade do assunto, afinal, tomando como exemplo a fissura, esta se trata de um sintoma da suposta “doença” que a estrutura possa estar submetida (figura 01), como, por exemplo, a corrosão de armaduras, deformação excessiva das estruturas, recalque de fundação, entre outros, para que, a partir dessa definição, possa ser definida a patologia (figura 02), e indicada a melhor forma de recuperação para tal.

Figura 01: Exemplo de manifestação patológica – fissura.



Fonte: AEC Web, 2019.

Figura 02: Demonstração da corrosão do aço na estrutura (patologia).



Fonte: AEC Web, 2019.

Conforme Helene (2018), em concreto, o processo de corrosão da armadura se manifesta:

(...)na forma de manchas superficiais causadas pelos produtos de corrosão, seguidas por fissuras, destacamento do concreto de cobrimento, redução da secção resistente das armaduras com frequente seccionamento de estribos, redução e eventual perda de aderência das armaduras principais, ou seja, deteriorações que levam a um comprometimento estético e da segurança estrutural ao longo do tempo. (HELENE, 2018, p. 01)

#### **4 PATOLOGIAS DO AÇO NO CONCRETO ARMADO: CORROSÃO**

As estruturas de concreto armado, a partir do seu dimensionamento e uso, apresentam certo período de durabilidade. Porém, este período pode ser reduzido

devido a falhas, como de projeto, execução ou no próprio material, demonstradas pelas manifestações patológicas, causando a deterioração da estrutura. Tais demonstrações, segundo Siemes et al. (1985), podem estar relacionadas aos efeitos físico-químicos (reação álcalis-agregados), efeito de gelo e degelo, ataques químicos (água contaminadas, carbonatação, sulfatos e cloro) e a corrosão nas armaduras, tendo como foco de estudo a carbonatação.

A corrosão de armaduras pode causar sérios danos estruturais, sendo a patologia mais recorrente nas estruturas de concreto armado, ocasionando problemas tanto estéticos, quanto na capacidade de resistência aos esforços solicitantes. Este processo é caracterizado por causar danos no aço, e conseqüentemente, danos estruturais. Tais avarias podem ser compreendidas como a perda de aderência entre o concreto e armadura, diminuição da área de seção transversal, e a fissuração do concreto, ocasionadas pelo agrupamento de produtos corrosivos junto às barras de armadura, onde nos estágios mais avançados, há o destacamento do concreto. Além disso, não só a resistência é comprometida, como se torna mais suscetível à penetração de outros agentes nocivos, o que se torna um fator ainda mais agravante, como pode ser visualizado na figura 03.

Figura 03: Estrutura danificada pela corrosão.

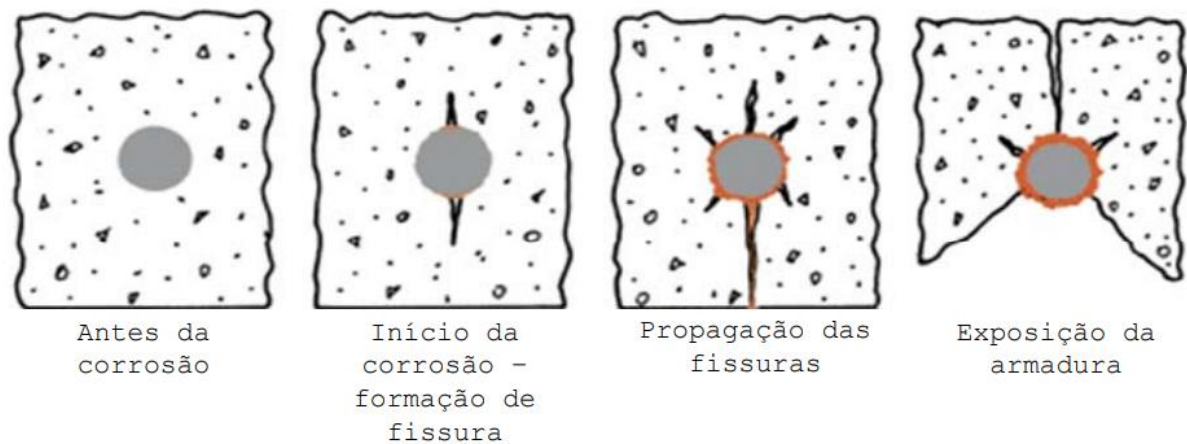


Fonte: Tecnosil, 2018.

A proteção do aço na parte interna do concreto, é compreendida por camada passivadora, a qual é formada e mantida devido ao elevado pH presente no soluto dos poros do concreto. Sendo assim, a corrosão se dá quando a camada passivadora é destruída, denominada despassivação. Por consequência, dá-se

início ao processo corrosivo se atender as condições, como, por exemplo, a diferença de potencial, agentes agressivos, umidade e oxigênio em torno da armadura. O início desse processo ocorre como na figura 04, e conseqüentemente, a formação de fissuras como um sintoma.

Figura 04: Processo corrosivo da armadura.



Fonte: Panossian, 2010.

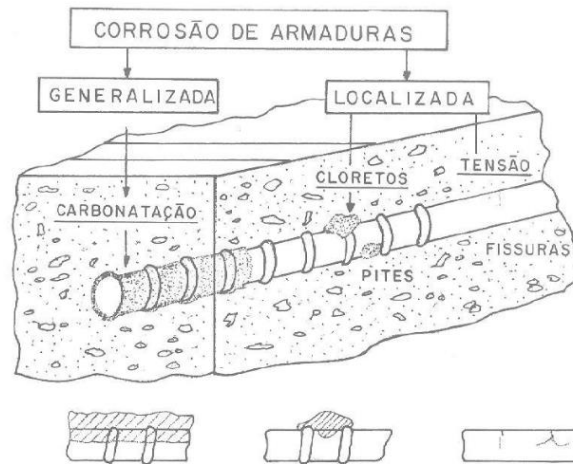
#### 4.1 TIPOS DE CORROSÃO

Conforme Ribeiro (2018), existem duas formas de ocorrência da corrosão de acordo com sua natureza: a oxidação, também chamada de corrosão “seca”, e a corrosão eletroquímica, ou aquosa, sendo esta última a que ocorre na estrutura de concreto. Os tipos de corrosão eletroquímica que a armadura pode sofrer são:

- Corrosão uniforme: ocorre em toda a extensão da armadura quando exposta ao meio corrosivo.
- Corrosão puntiforme ou por pite: desgastes localizados levando à criação de pequenas cavidades, também denominadas alvéolos. Extremamente perigosa e pode atingir os aços inoxidáveis.
- Corrosão intragranular: ocorre entre os grãos dos cristais do metal, fazendo com que ao sofrer tensões de tração, a armadura venha a fissurar ou fraturar, perdendo sua estabilidade.
- Corrosão transgranular: ocorre no interior dos grãos do metal, que quando submetido à esforços mecânicos, pode levar a fratura da estrutura.

Essas formas de corrosão são extremamente graves “quando existe ação conjunta de solicitação mecânica e meio corrosivo (bastante provável), pois ocasionam a corrosão sob tensão fraturante, possivelmente a mais grave.” (RIBEIRO, 2018, p. 140) A figura 05 apresenta um esquema dos tipos de corrosão e seus principais fenômenos causadores.

Figura 05: Esquema dos tipos de corrosão e fenômenos causadores.



Fonte: TECNOSIL, 2018.

## 4.2 AGENTES FACILITADORES DA CORROSÃO DA ARMADURA

### 4.2.1 Relação meio ambiente

É essencial conhecer as influências e efeitos que os diversos tipos de ambiente possam influenciar sobre as estruturas de concreto, para que possam obter a durabilidade necessária a resistir ao meio ambiente a qual estão inseridas. Portanto, estas influências devem ser consideradas desde a concepção do projeto estrutural, visto que o nível de agressividade do ambiente determinará parâmetros, como o tipo de concreto, classe de resistência, cobrimento de armaduras, entre outros (ALMEIDA; SALES, 2018).

Bertolini (2010) classifica as condições microclimáticas, a qual a estrutura de concreto possa estar exposta, em quatro tipos: Condições de concreto seco, condições de total e permanente saturação do concreto, condições de umidade intermediária do concreto e condições em que o concreto sofre ciclos de molhagem e secagem. Entre estes, os dois primeiros ambientes não são agressivos quanto a

corrosão das armaduras, já no terceiro “os elementos estruturais podem ser submetidos tanto à corrosão das armaduras quanto à degradação direta do concreto” (BERTOLINI, 2010) e o quarto apresenta condições que são

(...) geralmente, as mais críticas para a corrosão das armaduras, pois permitem, mesmo que em momentos diferentes, a penetração tanto de água (e dos sais eventualmente dissolvidos) como das substâncias em estado gasoso (como o  $O_2$  e  $CO_2$ ) (BERTOLINI, 2010)

Já Helene (1999), classifica quanto à agressividade ambiental considerando interações do macroclima, ligadas aos tipos de atmosfera em que a estrutura está introduzida. Estas podem ser: rural, urbana, marinha, industrial e viciada.

Quanto à atmosfera rural, esta se trata de uma região ao ar livre que sofre pouca influência da poluição do ar, ou seja, é lento o processo agressivo contra as armaduras, portanto, não influencia a corrosão. Diferente da atmosfera urbana, que por mais que seja considerada região ao ar livre, é estabelecida nos centros populacionais maiores, onde estão expostas à impurezas, como o óxido de enxofre, fuligens ácidas, entre outros agentes agressivos como  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $H_2S$ ,  $SO_4^{-2}$ , etc., e além disso, a umidade do ar, que é um fator importante que influencia a velocidade de corrosão atmosférica (HELENE, 1999).

Já a atmosfera marinha, também considerada região ao ar livre, é estabelecida sobre o mar e em região costeira. Estruturas inseridas nessa atmosfera sofrem em maiores proporções, pois possuem índice elevado de cloretos ( $Cl^-$ ) e sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ), os quais são extremamente agressivos às mesmas, e aceleram o processo corrosivo das armaduras, mesmo em pequenas proporções (HELENE, 1999).

Em relação à atmosfera industrial, também considerada região ao ar livre, onde é possível verificar a presença de ácidos, gases, cinzas, entre outros agentes agressivos, os quais proporcionam a aceleração do processo de carbonatação nas armaduras, que comparado à um ambiente rural, corresponde de 60 a 80 vezes mais (HELENE, 1999).

Por fim, a atmosfera viciada, considerada região em locais fechados com baixa taxa de renovação de ar. Em tais locais há uma possibilidade de intensificação da concentração e até geração de gases agressivos às armaduras, como em coletores e interceptadores de esgoto, por exemplo, que geram ácidos sulfúricos,



sulfatos e gás sulfídrico, o que influencia na aceleração do processo corrosivo nas armaduras de concreto armado (HELENE, 1999).

Em resumo, seguindo os conceitos apresentados por Helene (1999), pode-se fazer a relação com a figura 06, da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), a qual expõe o nível de agressividade que cada atmosfera possa apresentar e posterior risco para a estrutura.

Figura 06: Relação entre a classe de agressividade ambiental e risco de deterioração da estrutura.

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

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

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

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de Estrutura de Concreto - Procedimento

#### 4.2.2 Relação água/cimento na qualidade do concreto

A relação água/cimento, segundo Souza e Ripper (1998), determina certas características do concreto, entre elas a densidade, compacidade, porosidade, permeabilidade, fissuração, capilaridade e resistência mecânica. Esta relação é definida pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), a qual apresenta a relação água/cimento de acordo com a classe de agressividade e tipo de concreto, como mostra a figura 07.

Figura 07: Relação entre a classe de agressividade ambiental e água/cimento.

Concreto <sup>a</sup>	Tipo <sup>b, c</sup>	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.  
<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de Estrutura de Concreto - Procedimento

Entretanto, para fins econômicos e de trabalhabilidade, a norma nem sempre é seguida à risca, visto que, com o aumento do volume de água proporciona maior fluidez da mistura, resultando em uma maior facilidade em sua execução. Sendo assim, há comprometimento da qualidade do concreto, tornando-o mais suscetível à corrosão. Souza e Ripper (1998) afirmam que:

Do ponto de vista das falhas técnicas, e a título de melhorar uma pseudotrabalhabilidade do concreto, é comum adicionar-se água a ele além do especificado, elevando-se substancialmente o fator água/cimento, o que torna o concreto poroso, de baixa resistência e com elevada retração. Outro agente de aumento do fator a/c é a utilização de areia úmida, sem que se faça qualquer redução na quantidade de água adicionada à mistura. (SOUZA E RIPPER, 1998, p.34)

#### 4.2.3 Concreto de cobrimento

Uma das causas mais recorrentes da corrosão do aço, se refere ao cobrimento do concreto, que mantém a relação de quanto maior a sua espessura, maior a proteção do aço. Porém, essa proteção deve buscar uma espessura ideal, para que não haja desperdícios de material e custos, aumento do peso da estrutura, e que ainda assim, possa garantir a proteção adequada à armadura.

Desse modo, se comporta como uma barreira física sobre o aço, fazendo com que a sua alcalinidade elevada desenvolva sobre o mesmo uma camada passiva, o que o mantém inalterado por um certo tempo. Todavia, o concreto resulta de uma mistura que, quando entra em contato com a água, forma um conglomerado sólido e

compacto, mas poroso (figura 08). Sendo assim, apresenta uma certa permeabilidade quanto aos líquidos e gases, permitindo o acesso dos mesmos ao aço, causando a corrosão e o destacamento do mesmo, como podemos ver na figura 09 (ANDRADE, 1992).

Figura 08- Demonstração da porosidade do concreto.



Fonte: Tecnosil, 2018.

Figura 09- Exemplo de estrutura onde ocorreu o destacamento do concreto de cobertura.



Fonte: Técnica, 2011.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), por meio da NBR 6118, o cobrimento mínimo das armaduras de acordo com a classe de agressividade ambiental para cada elemento estrutural em concreto armado ou protendido, conforme mostra a figura 10.

Figura 10: Relação entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de Estrutura de Concreto - Procedimento

#### 4.3 AGENTE CAUSADOR: CARBONATAÇÃO

Entre os agentes desencadeadores da corrosão, dois se destacam: os íons cloreto e a carbonatação, sendo a última a mais recorrente em meio urbano, devido à grande quantidade de CO<sub>2</sub> presente na atmosfera.

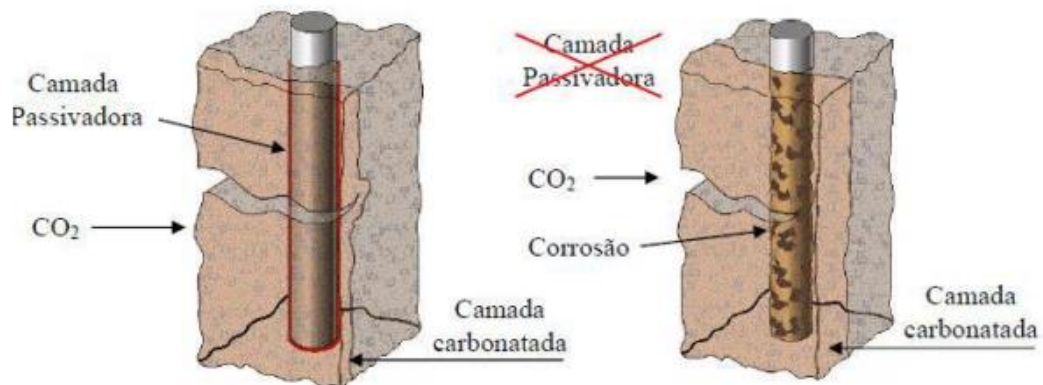
A carbonatação é um fenômeno de grande influência na durabilidade das estruturas por ser um agente facilitador do processo da corrosão. Ainda que sua atuação seja mais lenta se em comparação aos íons cloretos, representa uma deterioração perigosa, pois diminui a alcalinidade do concreto, conseqüentemente a alteração da estabilidade química da película passiva da armadura. De acordo com Vagheti (2005), se trata

(...) de um fenômeno físico-químico decorrente da reação entre os constituintes ácidos do meio ambiente (CO<sub>2</sub> principalmente) com o líquido intersticial existente nos poros do concreto, que se encontra saturado por hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento. Esse mecanismo

resulta na diminuição da alcalinidade da solução dos poros do concreto, induzindo à despassivação do aço e à possibilidade de desencadeamento da corrosão. (VAGHETTI, 2005, p. 6)

E pode ser observado na figura 11 uma exemplificação do processo.

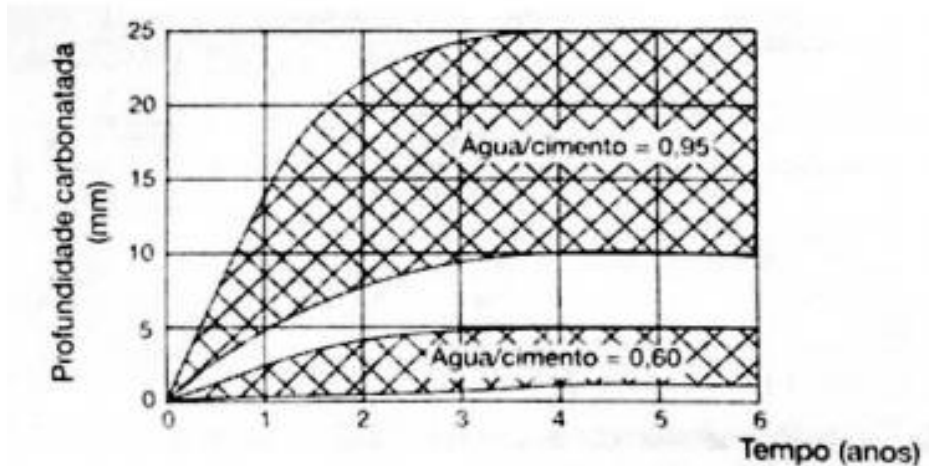
Figura 11: Representação do avanço da carbonatação na estrutura.



Fonte: Carmona, 2005.

Ainda, conforme Ribeiro (2018), este fenômeno é desencadeado a partir da perda da alcalinidade no processo de neutralização pela ação dos gases, em especial o  $\text{CO}_2$ , que faz com que haja uma transformação dos compostos do cimento em carbonatos. E tal processo aumenta, inicialmente, com maior velocidade e tende a ficar mais lento até que atinja assintoticamente a uma profundidade máxima. Este comportamento à estabilização é explicado pelo fato da hidratação crescente do cimento, aumentando gradativamente a compacidade do concreto caso haja água suficiente, como pode ser visto na figura 12. Juntamente a ação dos produtos de transformação, obstruindo os poros superficiais que dificultam o acesso do  $\text{CO}_2$ , que é facilmente encontrado em centros urbanos, no interior do concreto.

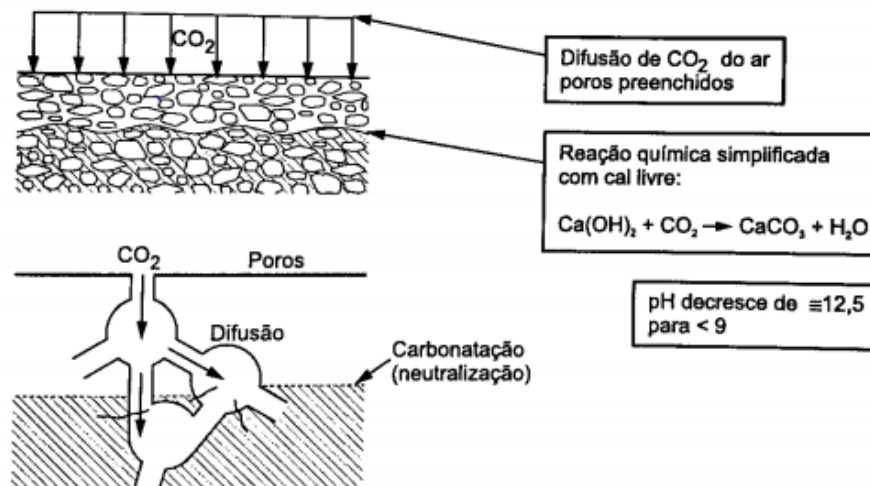
Figura 12: Variação da profundidade da carbonatação em função da relação água/cimento e anos.



Fonte: Ribeiro, 2018.

A frente da carbonatação avança com certa velocidade dependendo da rede de estrutura dos poros do material, das suas condições de umidade relativa, tempo, relação água/cimento, cura, tipo de cimento, permeabilidade do concreto etc. é exemplificado na figura 13 como funciona o avanço da carbonatação através dos poros.

Figura 13: Representação do avanço da carbonatação na estrutura através dos poros.

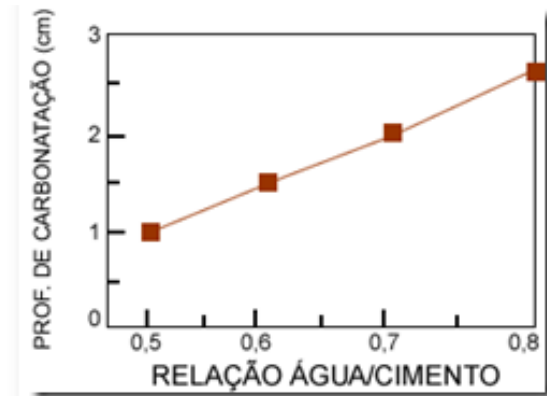


Fonte: Cascudo, 1997.

A relação água/cimento tem um papel importante na permeabilidade do concreto em relação à entrada dos gases, influenciando na velocidade da carbonatação. Sendo assim, ela define a porosidade capilar, pois é a partir dos poros que ocorre o fluxo de água e CO<sub>2</sub>, uma vez que os poros são interligados. A

partir de dados experimentais, foi construído um gráfico com a relação água/cimento e a profundidade da carbonatação, como pode se ver na figura 14.

Figura 14: Gráfico da influência da relação água/cimento com a profundidade da carbonatação.



Fonte: Ribeiro, 2018.

Objetivando a diminuição do consumo do cimento, tem-se utilizado adições minerais, e segundo Ribeiro (2018), tem-se obtido benefícios em suas adições, como uma melhor resistência à fissuração térmica, aumento da resistência final, refinamento dos poros, melhoria das características das zonas de transição. Porém, concretos com tais adições apresentam reservas alcalinas menores, mas que pode ser suprida com uma cura úmida e adequada, pois reduz a porosidade e a permeabilidade superficial do concreto fazendo com que impeça a entrada do  $\text{CO}_2$ . Ribeiro (2018) comenta que

(...) a incorporação dessas adições, em substituição parcial ao cimento, melhora a microestrutura do concreto, proporcionando o refinamento de poros e interrupções da rede porosa interconectada, diminuindo, assim, a permeabilidade do concreto, além de reduzir o efeito parede na zona de transição entre pasta e o agregado, além de promover uma maior resistência ao ataque de sulfatos e à expansão álcali-agregado. Assim, esse efeito físico da presença das adições conduz a uma redução da difusividade do  $\text{CO}_2$  na matriz cimentícia, retardando, dessa forma, o avanço da frente da carbonatação, o que se dá por um mecanismo essencialmente físico de bloqueio dos capilares. (RIBEIRO, 2018, p. 133)

A condição de cura é proporcional ao tempo e método, quanto maior o tempo e melhor o método, mais hidratado ficará o cimento, menor porosidade e permeabilidade e, por consequência, menor será a taxa de carbonatação, fazendo com que a cura empregada seja de grande importância para a carbonatação. Quando há presença de fissuras, elas facilitam a penetração do  $\text{CO}_2$  ao concreto, ocasionando

um aumento na taxa de carbonatação, tais fissuras podem vir a ocorrer devido a cura indevida no concreto, exemplo da figura 15.

Figura 15: Fissuras provenientes da cura indevida ao concreto.

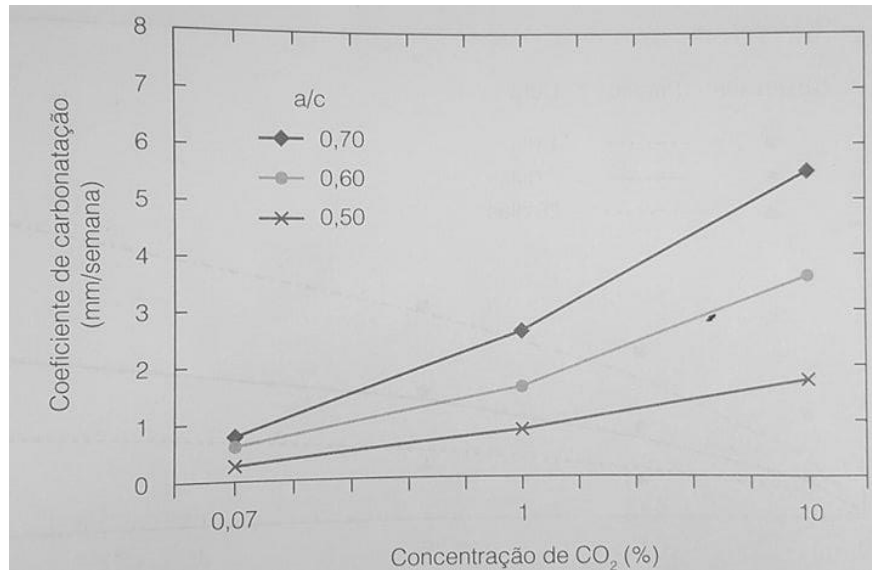


Fonte: Tecnosil, 2018.

A concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera na qual o concreto está inserido, é diretamente ligada à velocidade da carbonatação pois, junto com o hidróxido de cálcio, é fundamental para o acontecimento do processo. Ainda, o mesmo é diretamente proporcional, visto que quanto maior a concentração de  $\text{CO}_2$ , maior será a velocidade de carbonatação, onde concretos com relação/água cimento maior, a velocidade tende a ser maior também. Conforme Ribeiro (2018), independente da relação água/cimento que for utilizada, há aumento na profundidade de carbonatação em relação ao teor de  $\text{CO}_2$  no ambiente, porém é mais atenuante em concretos com maior relação água/cimento, visto que são mais porosos, demonstrado na figura 16.



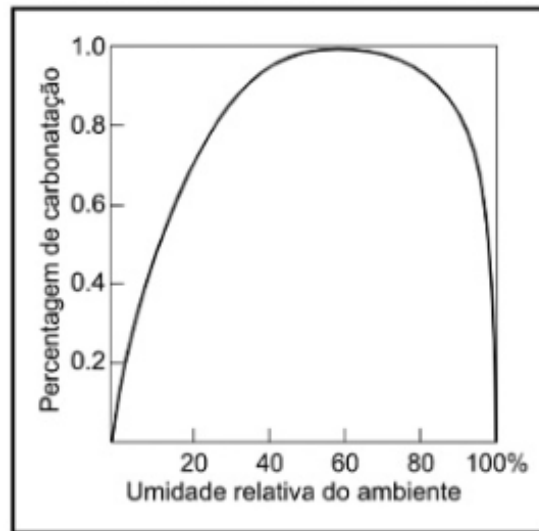
Figura 16: Concentração de CO<sub>2</sub> influenciando no Coeficiente de carbonatação em diferentes relações água/cimento.



Fonte: Ribeiro apud Visser, 2014.

Em relação à umidade relativa do ar, pode-se dizer que ela está conectada ao grau de saturação dos poros, visto que, condiciona a taxa de difusão do CO<sub>2</sub> entre os poros do concreto. Esta difusão é mais lenta em meio líquido se comparado ao meio gasoso, sendo neste princípio que, em concretos completamente saturados com água, a penetração de CO<sub>2</sub> é praticamente inexistente, visto que terá baixa difusão do dióxido de carbono na água que em comparação no ar, sendo 10 mil vezes menor. Já se for feito um comparativo entre ambientes climatizados e ambientes úmidos, a carbonatação pode chegar a ser 10 vezes mais intensa no ambiente climatizado, pois há diminuição na permeabilidade do CO<sub>2</sub> no concreto devido a presença de água. O teor de umidade mais ríspido para a ocorrência da carbonatação está na faixa compreendida de 50 a 65% da umidade relativa, conforme figura 17 (RIBEIRO, 2018).

Figura 17: Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente.



Fonte: Ribeiro, 2018.

Em relação ao concreto seco, Ribeiro (2018) explica

(...) difunde facilmente até as regiões mais internas, porém a reação de carbonatação não ocorre na ausência de água. Portanto, a situação mais favorável para a ocorrência da carbonatação com um avanço rápido é aquela em que os poros estão parcialmente preenchidos com água devido à ocorrência simultânea da difusão do  $\text{CO}_2$  para o interior dos poros e a existência de água necessária para a reação, com a formação de um filme de umidade nas paredes capilares e livre acesso à entrada de  $\text{CO}_2$ . (RIBEIRO, 2018, p. 136)

Considerando a temperatura, em relação a ambientes onde as temperaturas estão entre 20 e 40°C, o controlador do processo é a difusão, conseqüentemente, quando dentro dessa faixa, a influência da temperatura no processo da carbonatação não é significativo. Já em temperaturas elevadas, a velocidade tende a aumentar apenas se o efeito de secagem exceder o efeito da temperatura. Também, após a umidade interna do concreto estar em equilíbrio com a do meio, a umidade e temperatura influenciarão diretamente, tanto na existência de vapor ou saturação dos poros capilares, na velocidade de carbonatação.

## **5 TÉCNICAS DE PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO DA CORROSÃO NA ARMADURA**

Após iniciar uma obra, deve-se levar em consideração a possibilidade de ocorrência do fenômeno da corrosão. Sendo assim, existem métodos de prevenção que são utilizados para oferecer uma durabilidade maior à armadura, porém, tais métodos elevam o custo inicial da obra, mas, no entanto, a implantação destes deve considerar a diminuição dos custos de manutenção e transtornos causados pelas paralisações de reparo e manutenção. Contudo, quando não for possível realizar estas medidas e vir a ocorrer a corrosão, técnicas de recuperação deverão ser aplicadas à estrutura para a sua normalização.

### **5.1 TÉCNICAS DE PREVENÇÃO À CORROSÃO DA ARMADURA**

Quando a estrutura for executada conforme as normas, a armadura deve ser protegida contra a corrosão. No entanto, quando tal estrutura for submetida à ambientes agressivos, a proteção pode não ser suficiente para impedir esse fenômeno. Sendo assim, é recomendada a adoção de medidas que ofereçam uma proteção adicional à armadura.

Nesse contexto, as principais medidas adicionais para a proteção da corrosão na armadura são: a utilização de aditivos inibidores de corrosão; revestimento da armadura por meio de um depósito à base de zinco ou de uma camada polimérica; substituição da armadura de aço carbono por materiais resistentes à corrosão, tais como o aço inoxidável e compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro; revestimento do concreto com recobrimentos protetores, e a proteção catódica da armadura, as quais serão explanadas brevemente a seguir.

#### **5.1.1 Uso de aditivos inibidores**

São considerados inibidores de corrosão na armadura produtos químicos que “quando presentes num sistema de corrosão em concentração conveniente, diminuem a velocidade de corrosão sem alterar significativamente a concentração de qualquer agente corrosivo” (LOURENÇO; SOUZA, 2018, p. 244). O uso de tal,

quando em concentrações adequadas, retarda o processo corrosivo, aumentando a vida útil da estrutura.

Conforme Lourenço e Souza (2018), quando o concreto sofre o processo de carbonatação em temperatura ambiente, os aditivos inibidores devem, além de inibir a corrosão do aço, seja em meio alcalino ou neutro, apresentar a capacidade de misturar-se entre o concreto até o local que se encontra a armadura, para que assim proteja a mesma contra o processo corrosivo, sem que prejudique as propriedades químicas e físicas do concreto, como a sua resistência mecânica.

Deve-se realizar a utilização de produtos diferentes, pois a estrutura pode ser considerada nova ou existente, fazendo com que o uso dos inibidores seja distinto para cada situação. Como método preventivo, quando a estrutura é nova, o objetivo consiste em evitar ou retardar o início da corrosão das armaduras, sendo aplicadas, ainda no concreto fresco, em quantidade adequada para tal. No caso das estruturas existentes, os aditivos podem ser aplicados nas argamassas ou concretos de recuperação, tanto na superfície do concreto, quanto em furos ou sulcos realizados na superfície do mesmo, dependendo do tipo de produto, para que acelere a sua difusão pela camada de recobrimento das armaduras na estrutura (LOURENÇO; SOUZA, 2018).

Ainda segundo Lourenço e Souza (2018), os inibidores são divididos em “anódicos, catódicos ou mistos, consoante atuam na redução da reação anódica, da reação catódica ou em ambas as reações” (LOURENÇO; SOUZA, 2018, p. 244). Os mais utilizados nas estruturas de concreto armado são os nitritos, os quais são utilizados essencialmente por adição à mistura do concreto fresco, e as misturas de aminas e alcanolaminas, que atuam como inibidores catódicos ou mistos.

### **5.1.2 Armaduras especiais**

Lourenço e Souza (2018) descrevem as armaduras em:

- Armaduras poliméricas reforçadas com fibras (PRF): quando comparada à armadura de aço, a armadura PRF tem como vantagem não estar sujeita à ação corrosiva dos íons cloreto e à corrosão pelo processo de decarbonatação do concreto, sendo uma alternativa para ambientes corrosivos. Também possui maior resistência mecânica específica (resistência mecânica X densidade do material), por

possuir menor peso e maior facilidade de manejo, maior resistência à fadiga e neutralidade eletromagnética.

- Armaduras em aço inox: é uma opção viável quando a estrutura é submetida à ambiente altamente corrosivo, apresentado resistência superior ao processo corrosivo quando comparada a de aço carbono, resultando em menor custo de manutenção e reparo da estrutura, bem como vida útil superior. A estimativa é de que a armadura em aço inox necessite de 10 vezes mais de concentração crítica de íons cloreto para causar a corrosão, comparada à armadura de aço carbono. Em relação à proteção catódica, a utilização de tal exige custo de manutenção menor, não exigindo mão de obra especializada.

- Armaduras revestidas com epóxi: é uma das técnicas mais utilizadas, a qual eleva a vida útil da armadura de aço. Tal camada tem como objetivo a criação de uma barreira física entre a superfície da armadura contra os agentes corrosivos presentes no concreto. Além disso, possui elevada resistência elétrica, criando um empecilho para o fluxo de elétrons, impedindo que o mesmo contribua para a corrosão eletroquímica. Estima-se que a resistência da armadura revestida com epóxi seja elevada entre duas a três vezes em relação à não revestida.

- Armaduras galvanizadas: pode-se considerar um dos revestimentos mais utilizados em armadura de concreto para sua proteção, onde um substrato de aço é revestido por um depósito de zinco, aplicado através da imersão a quente, que pode também ser denominada galvanização a fogo. Este processo, em média, eleva a vida útil de quatro a cinco vezes, se comparada à armadura sem revestimento, implicando menos custo de manutenção, o que compensa o custo inicial da armadura, pois quando revestida eleva seu custo até cerca de 1,5 vezes.

### **5.1.3 Revestimento do concreto**

Considerado um dos métodos mais utilizados, com frequência utilizado no Brasil, o revestimento da superfície do concreto consiste na aplicação de uma cobertura aderente e impermeável, com objetivos de evitar ou minimizar a entrada de agentes que possam dar início ao processo corrosivo da armadura, tais como a água, o CO<sub>2</sub> e o oxigênio.

Os revestimentos mais utilizados nesse método para proteção contra a corrosão são as tintas orgânicas, exemplo as tintas à base de resina epóxi, acrílica,

vinílica, betume, poliuretana e tintas asfálticas. E para sua aplicação, Lourenço e Souza (2018) descrevem:

(...) para que a camada tenha uma aderência adequada à superfície do concreto, é essencial que essa superfície esteja isenta de materiais que possam prejudicar essa aderência, tais como graxa, óleo, gordura, poeira etc. A limpeza da superfície do concreto é geralmente feita por meio de uma ação mecânica, como lixamento e o jateamento. É importante também que a superfície de concreto que vai receber o revestimento seja polida, o que geralmente é feito pelo lixamento. (LOURENÇO; SOUZA; 2018, p. 282)

Para executar o polimento, deve-se realizar um preparo para tal, em geral, recomenda-se a aplicação, na superfície do concreto, de uma nata de cimento aditivada com um material polimérico como uma resina acrílica, visando a obstrução dos poros existentes na superfície, resultando num impedimento da entrada da água no concreto. Realizado o polimento, obtém-se uma superfície mais uniforme, conseqüentemente, uma diminuição da área onde a água pode ser absorvida, um aumento na velocidade de escoamento da água, diminuindo assim a quantidade que possa entrar no concreto e favorecendo então a resistência contra a corrosão da armadura.

Enquanto a estrutura não for totalmente revestida, há a ocorrência da penetração da umidade, porém, quando é revestida, a água tenta evaporar, contudo, há revestimentos que não permitem sua passagem, o que possibilita a ocorrência de danos ao revestimento. Nesse sentido, quando sujeita à essas situações, a escolha deve ser por um revestimento que iniba significativamente a entrada de água, mas que permita a saída do vapor a partir do concreto, para que não ocorra como mostra a figura 18 (LOURENÇO; SOUZA, 2018).

Figura 18: Umidade penetra o concreto sem o revestimento, após revestido encontra dificuldade para evaporar.



Fonte: Lourenço e Souza, 2018.

#### 5.1.4 Proteção catódica

A proteção catódica pode ser aplicada em estruturas novas como método de prevenção. Quando utilizada nessa situação, designa-se prevenção catódica. É comum a utilização em estruturas alocadas em ambientes considerados bastante agressivos, em geral, ambientes marítimos, com a função de assegurar o seu tempo de vida útil, evitando sua deterioração precoce. Pode ser aplicada na totalidade da estrutura ou em parte, para sua prevenção devido à problemas de qualidade na construção ou agressividade do ambiente, para minimizar os custos de manutenção (LOURENÇO; SOUZA, 2018).

Segundo Lourenço e Souza (2018), quando comparada a execução em uma estrutura existente já contaminada, a aplicação como medida preventiva na fase de construção apresenta diversas vantagens.

O método consiste na utilização permanente de corrente elétrica contínua, seguindo o mesmo princípio da proteção catódica. Esta corrente deve ser de baixa intensidade, entre as armaduras do concreto e um ânodo externo. O concreto, quando novo e conseqüentemente não contaminado, apresenta elevada resistividade e requer longa durabilidade em estruturas novas. A prevenção mais utilizada são os sistemas por corrente imposta. Esta requer os mesmos equipamentos e materiais utilizados na proteção catódica, como ânodos, eletrodos de referência/sensores, sistema de controle e monitoramento e fontes de alimentação, já a verificação da eficácia se dá de maneira idêntica (LOURENÇO; SOUZA, 2018).

Ainda conforme Lourenço e Souza (2018), a proteção catódica tem por objetivo o controle do processo existente de corrosão das armaduras, e reestabelece, com o tempo, as condições passivas. Já na prevenção, o impedimento do início da corrosão estabilizando o filme passivo é o seu objetivo.

Em estruturas novas, não contaminadas, é suficiente decrescer o potencial do aço para a zona de passivação imperfeita, onde a iniciação de picadas é impedida, ainda que o nível de cloretos, provenientes do exterior e acumulando-se nas armaduras, seja elevado. Também (...) é mais fácil polarizar o aço no estado passivo do que no ativo. Uma vez que a densidade decorrente necessária para obter a mesma polarização, em prevenção, é menor, também se distribui mais profundamente do que a corrente de proteção, alcançando-se maior polarização em pontos mais afastados do ânodo. Como a densidade de corrente e a quantidade de

ânodo necessário são menores, o projeto de prevenção é mais simples que o de proteção (LOURENÇO; SOUZA, 2018, p. 248).

Por mais que haja igualdade entre os materiais e equipamentos entre a prevenção e a proteção catódica, a instalação possui diferentes métodos, sendo a da prevenção significativamente mais simples, do que em uma estrutura já deteriorada. O ânodo deve apresentar um tempo de vida elevado e de fácil instalação durante a construção. Normalmente é utilizado ânodo à base de titânio (Ti/MMO) em forma de malha ou fita, sendo estas fixadas às armaduras através de espaçadores/isoladores apropriados antes da concretagem, conforme figura 19 e 20.

Figura 19: Malha de titânio fixada às armaduras antes da concretagem.



Fonte: Lourenço, 2019.

Figura 20: Malha de titânio fixada às armaduras antes da concretagem.



Fonte: Lourenço, 2019.



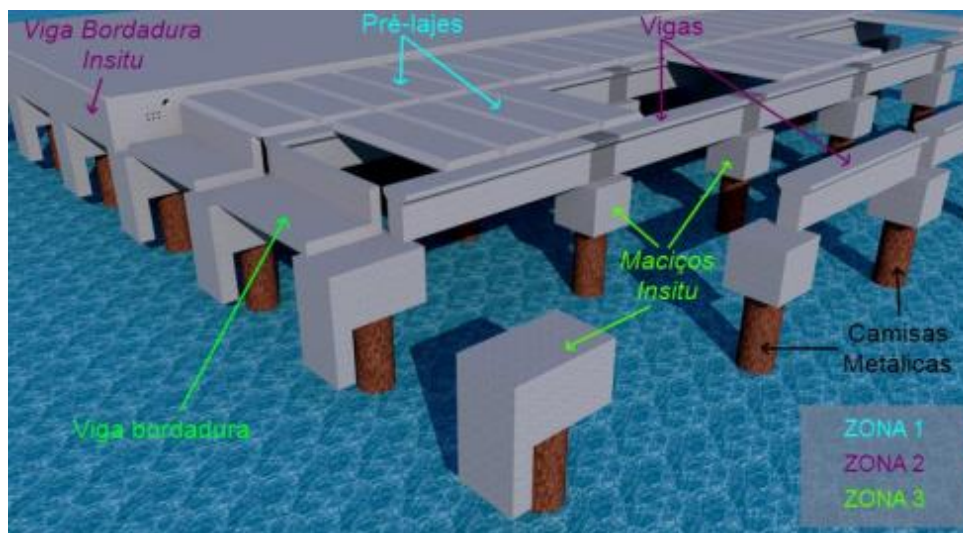
Por fim, quanto à concepção de um sistema de prevenção catódica, conforme Lourenço e Souza (2018), esta deve incluir

(...) seleção do sistema de ânodo mais adequado; determinação do número, dimensão, localização e método de instalação dos ânodos; divisão do sistema em zonas anódicas independentes, considerando as diferentes necessidades de corrente, as variações antecipadas na resistividade do concreto e o ambiente de exposição, a fim de assegurar a polarização adequada e uniforme a todas as partes da estrutura (LOURENÇO; SOUZA, 2018, p. 249).

Já quanto ao tipo de sistema de alimentação, controle e monitoramento, este “deverá ser selecionado baseado na complexidade da estrutura e do sistema e numa análise da relação custo-benefício” (LOURENÇO; SOUZA, 2018, p. 249).

Um exemplo prático de grande porte onde tal método foi utilizado, é o cais do Jardim do Tabaco, que possui cerca de 680 metros de comprimento, localizado em Lisboa (figura 21). Por sua concepção se dar em ambiente marítimo, a estrutura é considerada de elevado risco de corrosão. Utilizou-se a prevenção catódica, por corrente imposta, tendo por objetivo minimizar os custos totais do ciclo de vida, sendo todos os elementos protegidos catodicamente, exceto as estacas. Com área total de aproximadamente 48.000m<sup>2</sup> de concreto protegido.

Figura 21: Esquema da estrutura do cais.



Fonte: Lourenço, 2019.

## 5.2 TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO À CORROSÃO DA ARMADURA

Após identificar as causas da corrosão em uma estrutura de concreto armado, deve-se adotar uma estratégia de intervenção de modo a utilizar a solução que seja tecnicamente e economicamente mais apropriada para cada situação. Quando a estrutura necessitar de reabilitação para corrosão devido a contaminação do concreto por íons cloreto, as técnicas mais utilizadas são a reparação localizada e os métodos eletroquímicos, como a proteção catódica e a dessalinização. Já em estruturas carbonatadas, as técnicas mais utilizadas são o reparo convencional e a realcalinização. Cada vez mais, a proteção catódica vem sendo utilizada em edifícios de concreto armado devido à carbonatação. Sendo assim, o foco será a reabilitação de estruturas que sofrem o processo corrosivo devido à carbonatação, pois a corrosão em ambiente urbano será o foco do estudo, com a explicação das técnicas de reparo convencional, realcalinização e proteção catódica, e por fim, uma comparação de tais métodos.

### 5.2.1 Reparo convencional

A reparação convencional consiste na remoção mecânica do concreto contaminado e então, através de um material novo, a substituição do local removido. Ou seja, deve ser feita a limpeza na região e/ou a substituição das armaduras que apresentarem corrosão e a reconstituição do concreto danificado, sendo que deve tomar o cuidado de verificar a compatibilidade entre o material de substituição com o degradado, a fim de evitar diferenças de retrações e falhas precoces.

Esta reparação é utilizada em estruturas carbonatadas, e se trata da eliminação total do concreto danificado pela corrosão das armaduras e realizando a reconstituição com material saudável em sua forma original ou aumento na sua seção.

A primeira etapa para a recuperação da estrutura perante a corrosão das armaduras consiste na remoção do concreto danificado até o encontro do concreto sadio no interior da peça estrutural (figura 22), sendo recomendada a remoção das partículas soltas para não prejudicar a ancoragem do material de reparo e realizar a retirada de concreto em volta das armaduras corroídas em torno de 1 a 2 centímetros (figura 23), para então garantir a limpeza e aderência por completo da

peça. Uma técnica para remoção do concreto é denominada apicoamento, que pode ser tanto um processo mecânico quanto manual (ANDRADE, 1992).

Figura 22: Remoção do concreto contaminado pela ocorrência da corrosão na armadura.



Fonte: Policrete Engenharia, 2019.

Figura 23: Após remoção do concreto danificado.



Fonte: Policrete Engenharia, 2019.

Logo após, de acordo com Souza e Ripper (1998), a fim de garantir boa aderência entre o material restaurador e a peça que irá ser reconstituída, a corrosão deverá ser removida da superfície das armaduras, conforme já mostrado na figura 23, que além da retirada do concreto em torno da armadura de 1 a 2 centímetros, realiza a limpeza da corrosão no elemento estrutural. Há diversos métodos para a realização da limpeza das armaduras, onde após análise, deverá ser escolhida a melhor opção. São elas:

- Limpeza com soluções ácidas: remoção de compostos como tintas, ferrugens, graxas, carbonatos, resíduos e manchas de cimentos, visto que tais elementos não são removidos apenas com jato d'água;
- Limpeza com soluções alcalinas: características semelhantes às ácidas, porém não tão agressivas;
- Jato de água: bastante utilizado para remoção de substrato e preparação de superfícies, é um procedimento que assegura a limpeza para o material a ser adicionado como reparação. Tem baixo custo operacional, sendo um bom método e/ou complemento para a limpeza, podendo a água ser fria ou quente, conforme a necessidade;
- Jato de areia: o método de jato de areia é uma das técnicas mais tradicionais, sendo utilizada na grande parte dos casos após o apicoamento do concreto, sendo importante ressaltar que a areia para a execução do processo deve estar limpa, totalmente seca e sem nenhum resquício de matéria orgânica, e não pode ser muito mole nem fina;
- Jato de ar comprimido: é uma técnica apenas de procedimento complementar, servindo para a retirada de pequenas partículas ou poeira. Será utilizada apenas nos casos onde o jato de areia e o jato de água não forem suficientes para retirada total dos resíduos, e na limpeza de áreas de difícil acesso;
- Jato com limalha de aço: similar às técnicas anteriores, tendo seu poder de abrasão potencializado em relação ao jato de areia, portanto, não é indicado para situações em que a armadura esteja exposta ou corroída, pois pode reduzir a sua seção transversal;
- Escovação manual: é executada em pequenas áreas corroídas, sendo o movimento repetitivo onde as cerdas metálicas possam remover a corrosão, necessitando serviços complementares de lixas de ferro e posterior jato de ar comprimido.

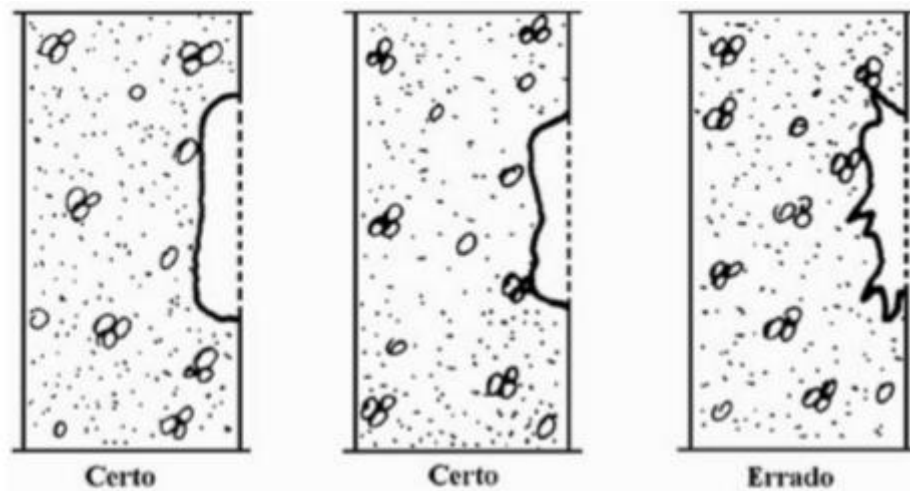
O tratamento para a recuperação do concreto ao seu estado inicial é necessário para uma boa aderência do material de reparo. Conforme Andrade (1992),

A aderência é sempre favorecida com certa rugosidade superficial. Umedecer a superfície do concreto original ou utilizar resinas denominadas de ponte de aderência dependerá do tipo de material de reparo. Em certos

casos pode recorrer a chumbadores que são ancorados no concreto original ou velhos e embutidos no novo material de reparo (ANDRADE, 1992, p. 98).

Utiliza-se a remoção profunda do concreto degradado em áreas afetadas por processos corrosivos para proporcionar maior adesão do material de reparo. Souza e Ripper (1998) demonstram algumas características na forma que deve ser removido o concreto, tendo seus cantos arredondados, como na figura 24.

Figura 24: Formas corretas de remoção do concreto, priorizando cantos arredondados.



Fonte: Souza e Ripper, 1998.

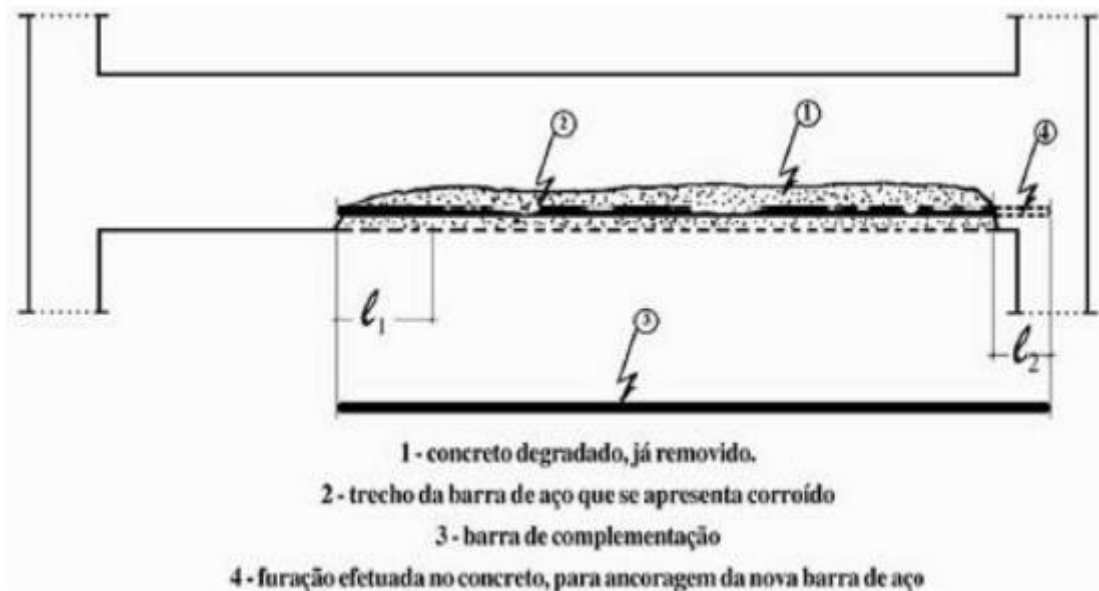
Quando a corrosão toma conta de grandes superfícies ou se encontra em estado avançado, faz-se necessária a troca ou reposição das armaduras. Para realizar esse processo, é indispensável atentar para os comprimentos de ancoragem e emendas a serem aplicados, a fim de reparar a peça mantendo-a com as mesmas resistências mecânicas (SOUZA; RIPPER, 1998).

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), através da NBR 6118, declara que as armaduras devem ser ancoradas de modo que seus carregamentos sejam transmitidos de maneira uniforme e integral para o concreto através da sua aderência. Nesse sentido, conforme as instruções da normativa, as emendas podem ser realizadas por transpasse, luvas de preenchimento metálico, rosqueadas ou prensadas ou por solda.

O exemplo de Souza e Ripper (1998) na figura 25 apresenta um esquema de uma peça estrutural, demonstrando a partir do comprimento L1 a extensão do corte do concreto além do necessário, para garantir que a emenda entre as barras de aço seja satisfatória, enquanto no comprimento L2 pode-se perceber que o pilar foi

perfurado, também com o intuito de obter uma boa ancoragem, e posteriormente, realizar o preenchimento, que pode ser com resina epóxida ou cimentícia.

Figura 25: Demonstração de corte no concreto para ancoragem das armaduras.



Fonte: Souza e Ripper, 1998.

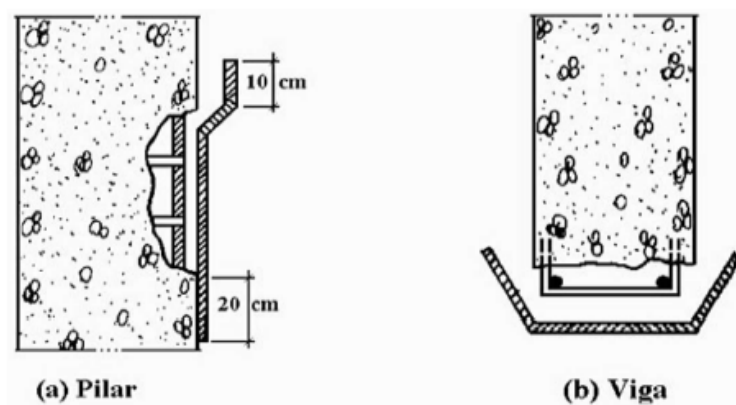
No que se refere ao reparo em elementos estruturais, de acordo com Souza e Ripper (1998), pode-se classificar em: reparos superficiais ou rasos (aqueles que possuem profundidade inferior a 2 centímetros), reparos semiprofundos (que possuem entre 2 e 5 centímetros e já atingem as armaduras) e reparos profundos (valores superiores a 5 centímetros). Já entre as técnicas, podemos citar:

- Reparo com argamassa: indicada para reparos superficiais, na qual sua aplicação se dá para a substituição do concreto deteriorado e apenas para o cobrimento das armaduras, evitando sua exposição ao ambiente. Algumas argamassas restauradoras são a argamassa convencional composta de cimento e areia, argamassa farofa, argamassa com polímeros composta por resina sintética conferindo maior plasticidade ao material e argamassa epoxídica, que possui em sua composição resina epoxídica e apresenta níveis elevados de resistência mecânica e química, sendo esta última muito utilizada em reparos semiprofundos e profundos, pela sua boa aderência;

- Reparo com concreto convencional: essa técnica consiste na troca do concreto deteriorado por outro de boa qualidade e resistência igual ou superior à do

antigo, e compactado de forma adequada. Também é utilizado concreto composto com adesivo epóxi, que são projetados na área a ser restaurada, em busca de melhor desempenho, não sendo indicado que a camada de concreto projetada ultrapasse a espessura de 50 milímetros. Em alguns casos, onde a cavidade a ser restaurada é muito grande, é necessária a utilização de formas, como mostra a figura 26.

Figura 26: Utilização de formas no reparo da estrutura, onde forma com cachimbo para o pilar e forma com dispositivo de pressão para a viga.



Fonte: Souza e Ripper, 1998.

- **Reparo com graute:** utilizado em reparos semiprofundos e profundos, consiste em uma argamassa de graute a base mineral, que apresenta grande fluidez e resistência mecânica, além de não manifestar retração e ser auto adensável. Devido à sua elevada resistência inicial, permite que as formas sejam removidas em 24 horas e a cura realizada em 3 dias.

Os reparos devem ser realizados da melhor maneira possível ou o método se torna ineficiente. Conforme a figura 27, podemos ter uma base do resultado quando ocorre um mal adensamento do concreto, como há o problema quando se tem uma alta densidade e má distribuição das armaduras.

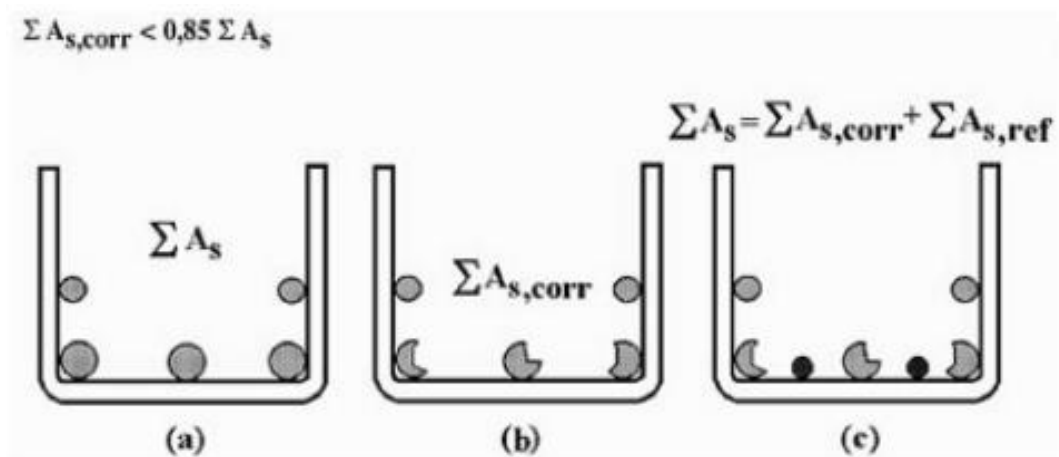
Figura 27: Mal adensamento do concreto resultando em armadura exposta.



Fonte: Tecnosil, 2019.

Quando a corrosão se encontra em estado muito avançado, estas técnicas não são suficientes para reparar a estrutura danificada, necessitando a realização de um reforço nos elementos estruturais. Conforme Souza e Ripper (1998), quando a corrosão causa a redução da seção transversal das armaduras, ocasiona a diminuição da resistência dos elementos estruturais, havendo a necessidade de reforçar as peças a fim de corrigir as falhas de execução e/ou projeto, aumentar a capacidade portante da estrutura e eliminar o desgaste e deterioração da peça. Geralmente, esse reforço se dá pela substituição do aço ou pela adição de novas barras, a qual ocorre quando a área da seção de aço corroído ultrapassar 15% da sua seção original, exemplificado na figura 28.

Figura 28: Reparo da estrutura com adição de barras de aço.



Fonte: Souza e Ripper, 1998.



O reparo convencional é a mais tradicional a ser utilizada em estruturas em processo corrosivo devido ao seu baixo custo e maior conhecimento geral, ou seja, não exige mão de obra tão qualificada como necessário às outras. Quando bem executadas, apresenta resultados satisfatórios, como na figura 29, contudo, não oferece garantias de que o problema não possa ocorrer novamente, tendo seu tempo de resolução menor que outros métodos para a reincidência do problema novamente.

Figura 29: Reparo realizado em um pilar devido ao processo corrosivo nas armaduras.



Fonte: Athos Engenharia, 2019.

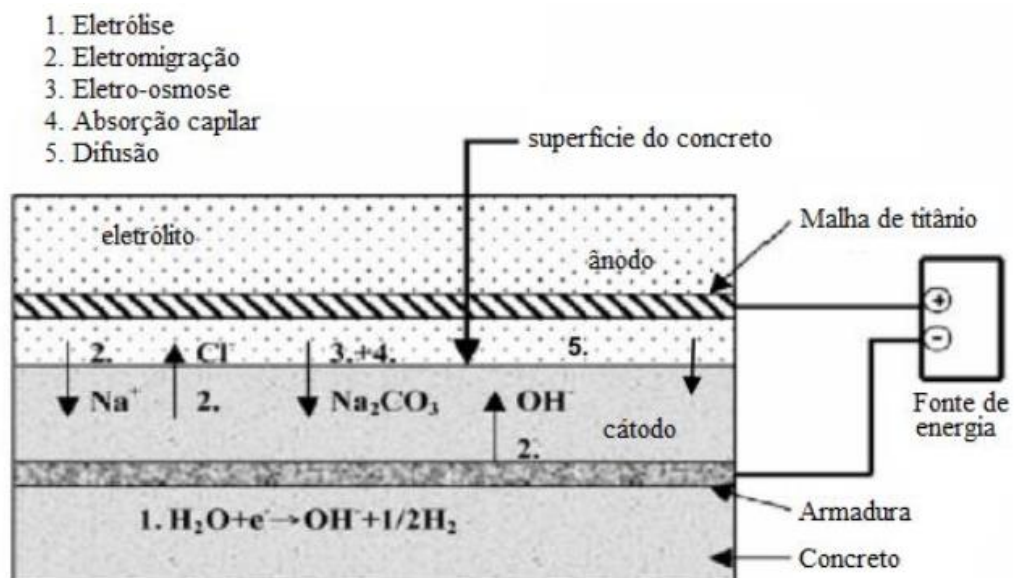
### 5.2.2 Realcalinização

A realcalinização é uma técnica utilizada no caso de estruturas carbonatadas, a qual tem por objetivo restaurar a alcalinidade do concreto, podendo ser realizada de forma química ou eletroquímica. Na forma eletroquímica, então, o objetivo é eliminar o agente agressor a partir da aplicação temporária de um campo elétrico (LOURENÇO, 2018). De acordo com Eggers e Oliveira (1997), esse método tem como função

(...) permitir que o concreto carbonatado readquirira uma condição suficientemente alcalina para o reestabelecimento e manutenção da camada passivadora de óxido de ferro sobre a superfície das armaduras, sem que com isso seja necessária a remoção do concreto são (EGGERS; OLIVEIRA, 1997, p. 42).

Dessa forma, o método da realcalinização eletroquímica consiste na aplicação de um campo elétrico entre a armadura de aço no interior do concreto e uma malha de aço inserida em uma solução alcalina, colocada sobre a superfície externa do concreto. Conforme o andamento do procedimento, a solução alcalina é transportada para dentro do concreto carbonatado pelo efeito de um fluxo eletroosmótico, enquanto, simultaneamente, a eletrólise produz um meio altamente alcalino na superfície da armadura, mantendo esse processo até que atinja os níveis de pH desejados para o controle da corrosão, como demonstram as figura 30 e 31 (EGGERS; OLIVEIRA, 1997).

Figura 30: Esquema da realcalinização eletroquímica.



Fonte: adaptação de (YEIH; CHANG, 2005).

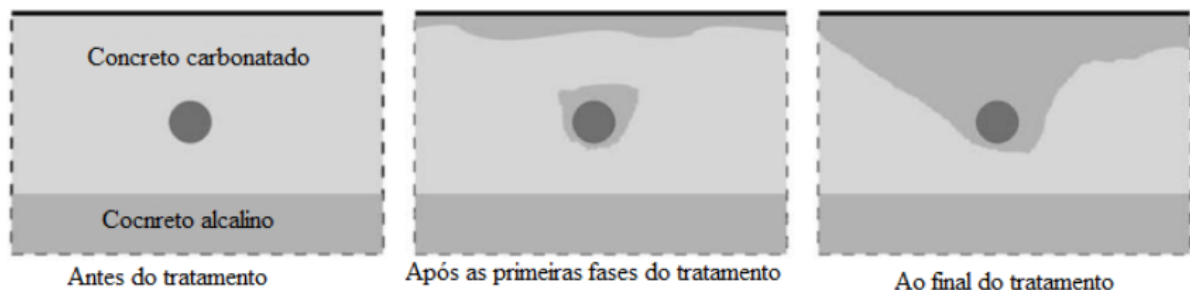
Figura 31: Aplicação da realcalinização eletroquímica em pilar de concreto.



Fonte: (BERTOLINI; CARSANA; REDAELL, 2008).

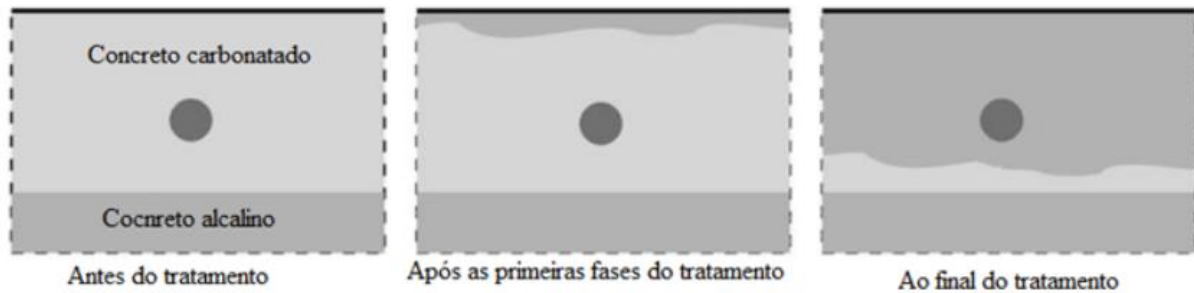
No caso da realcalinização eletroquímica, o pH é elevado primeiramente ao redor das armaduras e na superfície do concreto, e com o passar do tempo as regiões realcalinizadas passam a aumentar, como mostra o esquema da figura 32. Diferente do que ocorre na realcalinização química, a qual se dá através da absorção e difusão de soluções alcalinas, porém sem utilizar campo elétrico, sendo através da ação capilar e de forças hidráulicas. Sendo assim, o processo ocorre da parte externa da superfície para a parte interna, demonstrado no esquema da figura 33.

Figura 32: Evolução da realcalinização eletroquímica



Fonte: (BERTOLINI; CARSANA; REDAELL, 2008).

Figura 33: Evolução da realcalinização química



Fonte: adaptação de (BERTOLINI; CARSANA; REDAELL, 2008).

A realcalinização química é capaz de restabelecer a alcalinidade do concreto, o que possibilita a reconstituição da camada passivadora. Enquanto a eletroquímica é capaz de remover os cloretos presentes no concreto, fornecendo condições para que a película passivadora seja restabelecida. No entanto, aplicações eletroquímicas resultam, em geral, em soluções mais eficazes e econômicas no controle da corrosão.

Para verificar o final do tratamento, da eletroquímica, já que é mais eficaz, é realizado através da medição regular do pH. E Lourenço explica que,

Os testes são efetuados em corpos de prova e utilizando a solução alcoólica de fenolftaleína como indicador de pH. Os corpos de prova devem ser retirados em áreas representativas das diferentes condições da estrutura. Antes da aplicação desses tratamentos é necessário reparar as áreas visivelmente deterioradas com material de reparação compatível com o concreto original. No final do tratamento, o circuito elétrico é interrompido, o ânodo e suporte removidos, e a superfície limpa dos vestígios de tratamento antes da aplicação de pintura ou revestimento final (LOURENÇO, 2018, p. 366).

Este tratamento não é usualmente aplicado em estruturas com presença de aço protendido e concreto com agregados potencialmente reativos. À exceção de investigações, como a instalações-piloto, que tal tratamento não causará quaisquer danos às armaduras ou ao concreto. (LOURENÇO, 2018)

### 5.2.3 Proteção catódica

A proteção catódica é uma técnica que tem por objetivo reduzir a corrosão das armaduras a partir da aplicação de corrente contínua externa, durante toda a vida da estrutura. Segundo Dutra e Nunes (2011), a técnica se baseia nos princípios

da eletroquímica, transformando a estrutura metálica, a qual se deseja proteger, em uma pilha artificial e, conseqüentemente, evitando que a estrutura se deteriore.

De acordo com Lourenço (2018), a proteção catódica é reconhecida pela *Federal Highway Administration* nos Estados Unidos, desde 1982, como “a única técnica capaz de eliminar a corrosão de estruturas deterioradas, independentemente do teor de cloretos” (LOURENÇO, 2018, p. 352). Desde então, é utilizada principalmente na reabilitação de estruturas como pontes, edifícios, monumentos e estruturas portuárias e industriais. Ainda, Dutra e Nunes (2011) comentam que é devido à proteção catódica que milhares de quilômetros de tubulações enterradas para o transporte de petróleo, água, gás e produtos químicos, grandes estruturas portuárias, etc., operam com segurança quanto à processos corrosivos.

Segundo Lourenço (2018), é um método eletroquímico que faz uso de corrente contínua entre um eletrodo (ânodo) exposto ao ambiente e o metal a ser protegido (cátodo). Sendo assim,

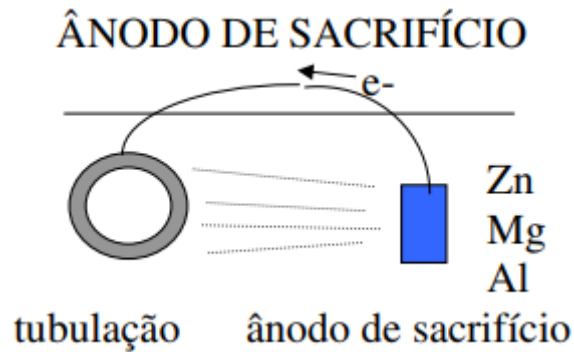
A aplicação de corrente no metal a proteger provoca um decréscimo do seu potencial de corrosão para um nível em que a velocidade de corrosão é zero ou suficientemente reduzida. (...) a proteção catódica efetiva consiste na supressão das reações anódicas, por meio da aplicação de uma corrente oposta, forçando as zonas catódicas locais a serem polarizadas ao potencial das zonas anódicas, eliminando, assim, o fluxo de corrente entre as zonas anódicas e as catódicas (LOURENÇO, 2018, p. 352).

Partindo desse pressuposto, do panorama termodinâmico, a aplicação da corrente de proteção causa a redução da velocidade de corrosão de um metal, baixando o potencial para valores inferiores ao potencial de equilíbrio do metal no ambiente exposto, ou seja, para a zona de imunidade do diagrama potencial-pH, ou para a zona de passivação.

Desse modo, existem duas formas de aplicação da proteção catódica: por ânodos galvânicos ou por corrente impressa. Na proteção por ânodos galvânicos, o metal a proteger deve ser ligado diretamente a outro metal mais ativo, ou ânodo galvânico, também denominado ânodo de sacrifício, que ao se dissipar gradualmente, liberta elétrons, gerando corrente elétrica entre os metais. “Como a corrente iônica flui do ânodo para as armaduras através do concreto, a sua resistividade é crucial para a eficácia do sistema. É essencial uma baixa resistividade para não opor resistência à passagem da corrente” (LOURENÇO, 2018, p. 353). A representação esquemática do processo funciona conforme a figura

34, onde os ânodos são conectados eletricamente ao equipamento a proteger. Este processo é conveniente quando a estrutura está sujeita à contaminação por cloretos (ambiente marinho) e, portanto, não será foco do estudo.

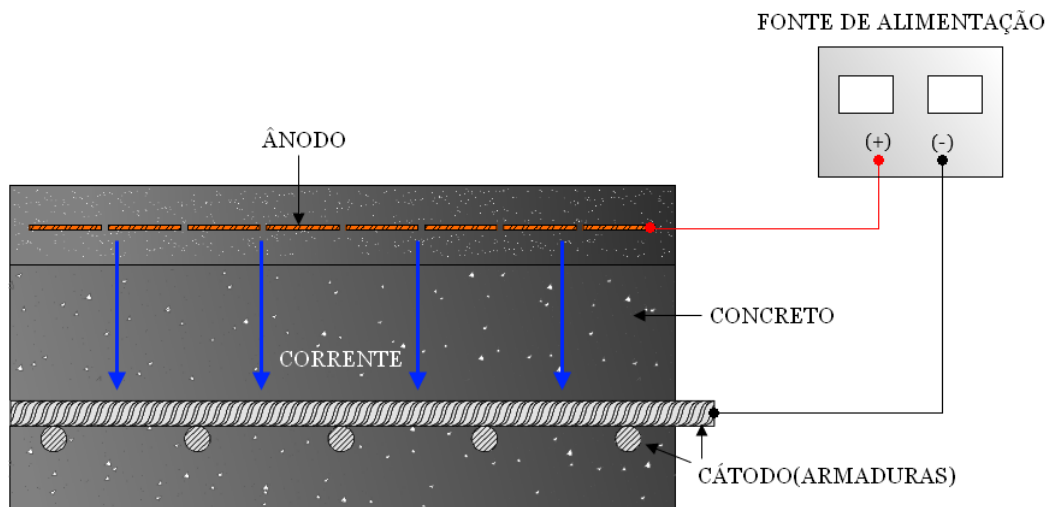
Figura 34: Esquema de aplicação da proteção catódica por ânodo de sacrifício.



Fonte: Lourenço, 2019.

Já na proteção por corrente impressa, método mais tradicional, é utilizado um ânodo inerte e uma fonte externa de alimentação de corrente contínua. Esse sistema é o mais utilizado em estruturas aéreas de concreto armado, devido à elevada resistividade do concreto. Os componentes básicos para realizar esse processo são: ânodo, cátodo (armaduras), concreto (eletrólito) e a fonte de corrente contínua, como mostra o esquema da figura 35.

Figura 35: Esquema de aplicação da proteção catódica por corrente impressa.



Fonte: Lourenço, 2019.

A proteção através da polarização do metal é alcançada através da aplicação de uma corrente catódica com o auxílio de um gerador de corrente contínua (ou retificador). Para que feche o circuito, há a necessidade, neste caso, também a participação de um eletrodo anódico. Diferente da proteção por ânodo de sacrifício, que a polarização acontece de forma espontânea entre o contato dos dois metais, neste processo, a corrente é fornecida externamente pelo gerador. Então, o ânodo é polarizado para valores de potencial superiores do valor de potencial o qual se estabiliza o cátodo. A diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo será suprida pela fonte de força eletromotriz, conseqüentemente, não há necessidade que o ânodo se dissolva, pois poderá ser um metal inerte que apenas sirva de sede de uma reação anódica qualquer. Permite a utilização de metais corrosíveis, como ligas de Fe-Si (corroem-se pouco) e sucata de aço ou ferro (custo bastante inferior). Mas também, pode-se utilizar ânodos que não se corroem, chamados de ânodos permanentes, que podem ser Ti, Ta ou Nb, por exemplo, que tem a vantagem de não dissolver e conseqüentemente, não necessitar de substituição periódica, visto que é algo importante a ser considerado, pois, se as estruturas a proteger são instaladas em locais de difícil acesso, se torna mais complicada a sua substituição.

Por ser a quantidade de corrente elétrica fornecida ao metal proporcional ao tamanho da área a proteger, a utilização desse método teria um custo muito elevado se necessário trabalhar com a superfície totalmente descoberta. Por isso, é comum o uso de algum material para revestir essa superfície, podendo ser pintura, revestimento polimérico, entre outros, para que a proteção catódica garanta sua ação quando houver falha desse revestimento. Com o passar do tempo e o aumento das falhas devido aos diversos tipos de degradação do recobrimento, vai sendo exigido cada vez mais do sistema de proteção catódica.

Deve-se considerar, para a instalação desse método, parâmetros como: a seleção do sistema de ânodo mais adequado; a determinação do número, localização, dimensão e método de instalação dos ânodos; a divisão do sistema em zonas anódicas independentes, levando em consideração as necessidades de corrente, as variações na contaminação e na resistividade do concreto, e o ambiente o qual cada parte da estrutura está exposto, a fim de que se assegure a polarização adequada e uniforme à todas as partes. O sistema de alimentação controle e monitoramento baseia-se na complexidade da estrutura e do sistema, e na análise custo X benefício (LOURENÇO, 2018).

Quando a armadura corroída já teve parte da sua seção transversal comprometida ou até mesmo perdida, a proteção catódica não possibilita a reconstrução da mesma, fazendo com que haja a necessidade de substituição da armadura e posterior instalação da proteção catódica para prevenção. Conforme Lourenço (2018), a definição do método de reparação das zonas deterioradas é um dos aspectos mais importantes no projeto de reabilitação da mesma.

O método de reparação do concreto, quando se utilizam métodos eletroquímicos, é diferente para a reparação convencional. A fim de que a reparação localizada seja eficaz, é necessário remover todo o concreto contaminado por cloretos, de modo a evitar a formação de novas zonas anódicas e a continuação da corrosão. Na reparação para métodos eletroquímicos, é somente necessário remover e repor a camada de concreto nas áreas que apresentem anomalias, delaminação, fissuração ou armaduras expostas. A intervenção de reparação nessas zonas consiste na remoção de uma camada superficial de concreto, até atingir as armaduras, na limpeza das armaduras e na posterior reposição da seção, por meio da aplicação de argamassa de reparação (LOURENÇO, 2018, p. 362).

No Brasil, não é usual a aplicação da técnica de proteção catódica em estruturas de concreto expostas em ambientes de alta agressividade. Normalmente, são adotados critérios rígidos de projeto, essencialmente uma elevada espessura de cobrimento e a especificação de um concreto de alta qualidade. No caso de estruturas deterioradas, é frequente a adoção de técnicas tradicionais de recuperação e do tratamento superficial do concreto. Na prática, nem sempre tais critérios são garantia da durabilidade, sendo questionável a sua eficiência na extensão da durabilidade de estruturas em condições ambientais adversas.

#### **5.2.4 Considerações e comparativo entre as técnicas apresentadas**

No que diz respeito à corrosão do aço em estruturas de concreto armado, sabe-se que ela pode se dar de maneira localizada ou generalizada, mas, em concreto carbonatado, geralmente ela é generalizada. No caso da carbonatação do concreto as reações anódicas (área que perde elétrons pela ocorrência da corrosão) e catódicas (área que ganha elétrons e há redução de oxigênio), são imediatamente adjacentes, caracterizando uma microcélula de corrosão, enquanto em concreto contaminado por cloretos a corrosão começa localizada, ou por pite, sendo as áreas de reações anódicas menores em relação às áreas de reações catódicas. No entanto, a corrosão se generaliza rapidamente devido à tendência natural da quebra



do filme passivante nas áreas adjacentes, também contaminadas. Esses mesmos mecanismos ocorrem para a carbonatação ou contaminação por cloretos que não se dá de forma homogênea no concreto de cobrimento, porém a corrosão generalizada fica limitada à região afetada. Sendo assim, pode se obter uma velocidade de corrosão elevada, causando a diminuição da seção do aço em um curto intervalo de tempo (ARAÚJO, 2013).

Em termos de recuperação da estrutura, na maioria dos casos o problema da corrosão é contornável. Nas estruturas de concreto armado, normalmente são realizados reparos localizados e/ou reforço das peças comprometidas, e em estruturas atmosféricas, é comum o seu revestimento após a recuperação, o que se justifica pela simplicidade e baixo custo de aplicação comparado às demais técnicas, além do acabamento estético conferido à estrutura. No caso de estruturas enterradas ou imersas, a proteção catódica é a técnica de recuperação mais eficaz, sendo mais utilizada em estruturas atmosféricas expostas em ambientes com íons cloreto, como ambientes marinhos e industriais. Ainda há a técnica da realcalinização, que pode ser utilizada para recuperar estruturas contaminadas pela carbonatação. Ainda, vale salientar que apenas a implantação de técnica de proteção não garante a sua eficácia, por isso, é fundamental um programa de manutenção consistente, além de um monitoramento da estrutura, fazendo com que o risco de corrosão da armadura possa ser estimado ao longo dos anos de utilização da mesma (ARAÚJO, 2013).

Diante do exposto acerca das técnicas de recuperação do aço mediante a corrosão pela carbonatação do concreto, pode-se chegar a uma conclusão, resumindo conforme mostra o comparativo a seguir, na tabela 01.

Tabela 01: Quadro comparativo das técnicas de recuperação estudadas.

<b>Método</b>	<b>Descrição</b>	<b>Custo</b>	<b>Mão de obra</b>
<b>Reparação convencional</b>	Método mais utilizado, porém, com pouca eficiência e durabilidade do reparo a longo prazo. Necessidade de remoção do concreto nas áreas degradadas, fazendo com que em certos casos não tenha a possibilidade da realização.	Baixo, porém possui menor durabilidade e eficiência.	Não necessita mão de obra especializada.
<b>Realcalinização</b>	Objetivo é a eliminação do agente agressor, não necessária remoção do concreto. Não pode ser utilizada em todas as estruturas, sendo necessário estudo para verificar viabilidade. Processo temporário, cessando após reestabelecimento da alcalinidade.	Médio, quando comparado às outras.	Necessária mão de obra especializada.
<b>Proteção catódica</b>	Método mais utilizado em ambientes marítimos e mais eficiente para a recuperação de estruturas corroídas, ainda tendo pouca aplicação em estruturas onde o agente causador é a carbonatação devido seu custo, porém o melhor método. Processo contínuo durante toda a vida útil da estrutura.	Elevado.	Necessária mão de obra especializada.

Fonte: Autor, 2019.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho proporcionou um estudo, a partir da revisão bibliográfica de autores renomados, sobre o fenômeno da corrosão nas estruturas de concreto armado, onde o foco de estudo foi voltado para as técnicas de recuperação do mesmo, visto que a corrosão é uma situação corriqueira na construção civil, e o profissional deverá lidar com muitos casos acerca desse tema, daí a importância de conhecer as técnicas adequadas para recuperação de tal fenômeno.

Ademais, a partir dessa pesquisa foi possível compreender os principais processos corrosivos nas edificações, bem como as causas e facilitadores pela qual ela ocorre, podendo ser pela influência do meio ambiente, relação água/cimento, cobertura do concreto e também pode-se compreender que os dois principais agentes causadores são a carbonatação e os íons cloreto, onde o foco do estudo foi a carbonatação, e que muitos casos podem ser reduzidos a partir dos métodos de prevenção, aumentando o investimento inicial na obra, porém reduzindo a frequência e custos de manutenção, o que resulta em um melhor custo benefício.

Em vista disso, considerando a grande frequência do aparecimento dessa patologia nas estruturas de concreto armado, é aconselhado investir em técnicas de prevenção, a fim de aumentar a durabilidade e vida útil da estrutura.

Sendo assim, pode-se concluir que é de extrema importância conhecer, primeiramente as causas da deterioração, e após, as técnicas de recuperação do aço no concreto armado causados pela carbonatação, para que, o Engenheiro Civil, ao se deparar com essa situação, possa atuar de modo a empregar a melhor técnica e economicamente mais apropriada para cada situação, e assim, assegurar a reparação correta do dano, pois isso faz-se extremamente necessário no atual cenário da construção civil.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEC WEB. **Patologias da alvenaria: como evitar?** São Paulo, SP, 2019. Disponível em <[https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/patologias-da-alvenaria-como-evitar\\_11988\\_10\\_0](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/patologias-da-alvenaria-como-evitar_11988_10_0)> Acesso em: 18 de junho de 2019.

AEC WEB. **Patologias de estruturas de concreto: identificação e tratamento.** São Paulo, SP, 2019. Disponível em <[https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/patologias-de-estruturas-de-concreto-identificacao-e-tratamento\\_14342\\_10\\_0](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/patologias-de-estruturas-de-concreto-identificacao-e-tratamento_14342_10_0)> Acesso em: 18 de junho de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: PINI, 1992. 104p ISBN

ARAÚJO, A. **Corrosão de estruturas: Como a galvanização pode ajudar a combater o problema.** Galvanisa, 2013. Disponível em <<http://www.galvanisa.com.br/noticia/43/corrosao-de-estruturas-como-a-galvanizacao-pode-ajudar-a-combater-o-problema>> Acesso em: 28 de junho de 2019.

ATHOS ENGENHARIA. **Recuperação estrutural.** Curitiba, PR, 2019. Disponível em <<http://athosengenharia.com/recuperacao-estrutural/>> Acesso em: 24 de junho de 2019.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; REDAELLI, E. **Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation.** Journal of Cultural Heritage, v. 9, n. 4, p. 376–385, 2008.

CARMONA, T.G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005, p. 94.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo: PINI, 1997.

DUTRA, L. de P.; DUTRA, A.C. **Proteção catódica: Técnica de Combate à Corrosão.** Editora Interciência, 5ª Ed., 2011.

EGGERS, M.; OLIVEIRA, P.S.F. **Realcalinização e dessalinização – Novas técnicas eletroquímicas de recuperação de estruturas de concreto**. Revista Techne nº 30. São Paulo: Editora Pini, p.41-45., 1997.

HELENE, P.R.L. Introdução. In: RIBEIRO, D. V. (Coord.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2018, p. 1-10.

HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado** (4 ed.) São Paulo, PINI: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1999.

LOURENÇO, M.Z. **Corrosão e proteção catódica em estruturas portuárias**. Apresentação, II- Encontro Dia Mundial da Sensibilização para a Corrosão, 2019.

LOURENÇO, M.Z.; SOUZA, C.A.C. Métodos de proteção e aumento da durabilidade do concreto armado. In: RIBEIRO, D. V. (Coord.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2018, p. 243-289.

LOURENÇO, M.Z. Uso de técnicas eletroquímicas para a reabilitação de estruturas. In: RIBEIRO, D. V. (Coord.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2018, p. 351-370.

PANOSSIAN, Z. **Novas tecnologias para reparo e proteção contra corrosão de concreto armado**. Apresentação, INTERCORR, 2010.

POLICRETO ENGENHARIA. Recuperação Estrutural do Concreto. Disponível em <<https://tratamentodeconcreto.com.br/recuperacao-estrutural-de-concreto.php>> Acesso em: 20 de junho de 2019.

RIBEIRO, D.V. Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos. In: RIBEIRO, D. V. (Coord.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2018, p. 125-158.

SOUZA, Vicente Custódio de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TECNOSIL. **Corrosão de armadura: o que causa e como amenizar esse dano?** Itupeva, SP, 2018. Disponível em <<https://www.tecnosilbr.com.br/corrosao-de-armadura-o-que-causa-e-como-amenizar-esse-dano/>> Acesso em: 14 de maio de 2019.

TECNOSIL. **Permeabilidade do concreto: qual sua importância para a construção?** Itupeva, SP, 2018. Disponível em <<https://www.tecnosilbr.com.br/permeabilidade-do-concreto-qual-sua-importancia-para-a-construcao/>> Acesso em: 11 de maio de 2019.

TECNOSIL. **Retração do concreto: o que é e como minimizá-la?** Itupeva, SP, 2018. Disponível em <<https://www.tecnosilbr.com.br/retracao-do-concreto-o-que-e-e-como-minimiza-la-2/>> Acesso em: 14 de maio de 2019.

TECHNE. **Patologia das construções: uma especialidade na engenharia civil.** São Paulo, SP, 2019. Disponível em <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/174/patologia-das-construcoes-uma-especialidade-na-engenharia-civil-285892-1.aspx>> Acesso em: 18 de junho de 2019.

VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da carbonatação do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições mineirais.** 2005. 264 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Metais, Metalúrgica e de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

VISSER, J. **Influence of the carbon dioxide concentration on the resistance to carbonation of concrete.** Construction and Building Materials, v.67, 2014, p. 8-13.

YEIH, W.; CHANG, J. J. **A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete.** Construction and Building Materials, v. 19, p. 516–524, 2005.