

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

HELOISE GOMES DE OLIVEIRA

**UMA DISCUSSÃO SOBRE A CORROSÃO DO AÇO INDUZIDA POR ÍONS
CLORETO E CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

HELOISE GOMES DE OLIVEIRA

**UMA DISCUSSÃO SOBRE A CORROSÃO DO AÇO INDUZIDA POR ÍONS
CLORETO E CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais na Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa

LONDRINA

2019



Apêndice 11

TERMO DE APROVAÇÃO

HELOÍSE GOMES DE OLIVEIRA

UMA DISCUSSÃO SOBRE A CORROÇÃO DO AÇO INDUZIDA POR ÍONS CLORETO E CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 29 de novembro de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Márcio Andreato B. Mendes
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Sílvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Sílvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus que me deu forças e orientação para seguir até o momento.

Aos meus pais, Celso e Elenice, que me educaram e me ajudaram a trilhar meus caminhos e completar as dificuldades enfrentadas, sempre aconselhando da maneira a tomar as melhores decisões.

Agradeço também ao apoio da minha professora e orientadora Silvia Midori Higa que pacientemente me acolheu como orientanda e me passou seus ensinamentos de forma brilhante e serena.

A todas as amigadas que fiz durante o período de graduação e que me fizeram crescer cada dia mais.

Por fim, agradeço a todos que participaram de forma direta ou indireta durante essa etapa cheia de dificuldades e sucesso que foi a graduação em Engenharia de Materiais na minha vida.

RESUMO

OLIVEIRA, H. G. de. **Uma discussão sobre a corrosão do aço induzida por íons cloreto e carbonatação em estruturas de concreto armado.** 2019. 40f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

A corrosão de armaduras é o mecanismo de deterioração de maior incidência no Brasil. Essas armaduras são protegidas contra a corrosão em virtude da formação de uma película passivadora na superfície. Quando essa película é destruída, o metal fica exposto ao meio corrosivo, o que o torna suscetível ao processo de corrosão. Esse processo pode ser iniciado a partir de uma redução do pH, pela presença de íons cloreto ou ainda pela lixiviação do concreto. Dessa forma, o trabalho teve como objetivo principal realizar uma revisão concisa sobre a corrosão das estruturas de concreto armado, a partir de duas das principais causas de desencadeamento do processo de corrosão: a presença de íons cloreto e a carbonatação, como também os mecanismos envolvidos nesses processos, e os métodos de prevenção e recuperação. Neste trabalho foi possível observar que a prevenção da corrosão da armadura a partir de tratamentos superficiais, inibidores de corrosão, pintura epóxi e galvanização é necessária para evitar o comprometimento do concreto armado e que no caso de recuperação, deve ser verificada a necessidade da substituição ou não de parte da armadura, conforme o grau de corrosão apresentada pela mesma.

Palavras-chave: Concreto armado. Corrosão. Vergalhão. Carbonatação. Cloretos.

ABSTRACT

OLIVEIRA, H. G. de. **A discussion of chloride ions-induced corrosion of steel and carbonation in reinforced concrete structures.** 2019. 40f. Completion of course work (Bachelor in Materials Engineering) - Academic Department of Materials Engineering. Federal University of Technology Paraná. Londrina, 2019.

Reinforcement corrosion is the most prevalent deterioration mechanism in Brazil. These reinforcements are protected against corrosion due to the formation of a passivating film on the surface. When this film is destroyed, the metal is exposed to the corrosive medium, which makes it susceptible to the corrosion process. This process can be started by reducing the pH, by the presence of chloride ions or by leaching the concrete. Thus, the main objective of this work was to perform a concise review on the corrosion of reinforced concrete structures, based on two of the main causes of the corrosion process: the presence of chloride ions and carbonation, as well as the mechanisms involved in these processes, and the methods of prevention and recovery. In this work it was observed that the prevention of reinforcement corrosion from surface treatments, corrosion inhibitors, epoxy paint and galvanization is necessary to avoid the compromise of reinforced concrete and that in case of recovery, the need for replacement or not part of the reinforcement, according to the degree of corrosion presented by it.

Keywords: Reinforced concrete. Corrosion. Rebar. Carbonation. Chlorides

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	— Barras e fios de aço: a) CA – 25; b) CA - 50 e c) CA - 60	15
Figura 2	— Mecanismo de corrosão de metais diferentes ou concentrações eletrolíticas diferentes.....	19
Figura 3	— Mecanismo de oxigenação diferente.....	20
Figura 4	— Corrosão decorrente da formação de micropilhas	21
Figura 5	— Corrosão decorrente da formação de macropilhas.	21
Figura 6	— Fases de instalação do processo de corrosão em um barra de aço	24
Figura 7	— Desplacamento do concreto provocado pela corrosão da armadura	24
Figura 8	— Esquematização do fenômeno da carbonatação.	26
Figura 9	— Representação do avanço da frente de carbonatação	26
Figura 10	— Tipos de tratamentos superficiais: (a) pinturas e selantes, (b) hidrofugantes, (c) bloqueadores de poros	29
Figura 11	— Danos em um pilar.....	34
Figura 12	— Colagem das lâminas de compósito de fibra de carbono	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado.....	15
Tabela 2 — Classes de agressividade ambiental.....	17
Tabela 3 — Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobertura nominal para $\Delta c = 10$ mm.....	17

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo geral	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	JUSTIFICATIVA	12
4	REFERENCIAL TEÓRICO	13
4.1	Aços	13
4.1.1	Propriedades dos aços	14
4.1.2	NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado.....	14
4.2	Concreto	15
4.2.1	Propriedades do concreto	16
4.3	Concreto armado	16
4.4	Corrosão das armaduras	17
4.4.1	O processo de corrosão.....	18
4.4.2	Corrosão das armaduras dentro do concreto.....	20
5	METODOLOGIA	22
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
6.1	Corrosão de estruturas de concreto armado	23
6.1.1	Mecanismos de Corrosão	25
6.1.1.2	Corrosão por íons cloreto.....	28
6.1.2	Prevenção da Corrosão em Armaduras	29
6.1.3	Métodos de recuperação	32
6.1.4	Estrutura recuperada.....	33
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Os aços são amplamente utilizados como materiais de construção, pois combinam resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo. Diante disso, compreende-se a sua importância e a extensão da sua aplicação em diversos campos da engenharia. Os aços para estruturas devem obedecer a alguns requisitos fundamentais como apresentar ductilidade e homogeneidade microestrutural, valor elevado da relação entre limite de resistência à tração e limite de escoamento, soldabilidade, suscetibilidade de corte por chama sem endurecimento e resistência razoável a corrosão (CHIAVERINI, 1988).

O concreto pode ser definido com uma mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos, com ou sem a incorporação de componentes minoritários, como aditivos químicos (retardadores ou aceleradores de pega, plastificantes e superplastificantes, etc.) e adições (escórias de alto-forno, pozolanas, microssílica, etc.), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (ARAÚJO, 2010; LIMA et al., 2014).

Já o concreto armado é um material compósito, obtido a partir da associação do concreto com barras de aço colocadas em seu interior. Devido à baixa resistência à tração do concreto, as barras de aço servem para absorver os esforços de tração na estrutura como também aumentar a capacidade de carga das peças comprimidas (ARAÚJO, 2010).

O processo de corrosão das armaduras de concreto ocorre quando a película passivadora existente sobre a superfície do aço é destruída. Há três diferentes causas para que ocorra essa destruição: presença de íons cloretos, carbonatação ou lixiviação do concreto. A corrosão de armaduras é o mecanismo de deterioração de maior incidência no Brasil, no qual o produto da corrosão do aço, apresenta um volume maior que o metal original, provocando fissuras e deslocamento de concreto (SACHS, 2015).

É comum que esse processo de corrosão em edificações se inicie na base dos pilares, por ser a área mais exposta à água e agentes químicos e, por ser um elemento estrutural de suporte, pode levar ao colapso da estrutura (SACHS, 2015). Dessa forma, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão e discussão sobre a corrosão das estruturas de concreto armado, a partir de duas das principais causas de desencadeamento do processo de corrosão: a presença de íons cloreto e

carbonatação, assim como fazer um levantamento das formas de se prevenir ou mesmo reparar os danos por ela causados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma revisão concisa sobre a corrosão das estruturas de concreto armado, a partir das duas principais causas de desencadeamento do processo de corrosão: a presença de íons cloreto e a carbonatação.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos foram definidos:

- Pesquisa sobre dois tipos de mecanismos de corrosão em armaduras:
 - Carbonatação e,
 - Íons cloreto
- Pesquisa dos métodos de prevenção da corrosão;
- Pesquisa dos métodos de recuperação da corrosão.

3 JUSTIFICATIVA

Sabendo-se que a corrosão de armaduras é o mecanismo de deterioração de maior incidência no Brasil (SACHS, 2015) e que há uma preocupação crescente com a durabilidade do concreto armado, seja por um apelo econômico (redução de custos com manutenção), social (grandes tragédias devidas à corrosão estão se tornando cada vez mais comuns) ou até ambiental, uma vez que materiais mais duráveis implicam em menor consumo de recursos naturais, é necessário realizar um estudo sobre suas causas e formas de se prevenir ou reparar tal degradação. Essa corrosão pode ser desencadeada por três causas principais, sendo elas, a presença de íons cloreto, a carbonatação e a lixiviação do concreto.

Pontes e viadutos no Brasil vem apresentando problemas, sendo dois problemas os mais comuns: as infiltrações e a exposição das armaduras. Essas infiltrações causa a deterioração do concreto e com o tempo expõem a estrutura (CARDILLI, 2012). A queda da estrutura na Marginal Pinheiros em São Paulo, ocorrida em novembro de 2018, teve como uma das causas a corrosão das armaduras, o que ocasionou a ruptura brusca de uma das travessas de apoio (CERQUEIRA, 2018).

Dessa forma, o trabalho tem por justificativa realizar uma revisão desse tema para os alunos do curso de engenharia, levando em consideração às frequentes tragédias relacionadas aos colapsos de estruturas de concreto armado.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Aços

Segundo Chiaverini (1988), os aços são uma liga ferro-carbono contendo entre 0,008% a 2,11% (em massa) de carbono, e outros elementos residuais, provenientes dos processos de fabricação.

Os aços podem ser classificados de acordo com seu teor de carbono, podendo ser de baixo, médio ou alto teor de carbono, e suas propriedades mecânicas são sensíveis ao teor desse elemento (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Os aços com baixo teor de carbono contêm geralmente menos que 0,25%C e possuem uma microestrutura constituída de ferrita e perlita. Que propicia baixa dureza e baixa resistência, mas ductilidade e tenacidade excepcionais, além de ser usináveis e soldáveis. Em geral, possuem um limite de escoamento de 275 MPa, limites de resistência à tração entre 415 MPa e 550 MPa (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Os aços com médio teor de carbono apresentam concentrações de carbono entre aproximadamente 0,25% e 0,60%C. Essas ligas podem ser tratadas termicamente por austenitização, têmpera e então revenido para melhorar suas propriedades mecânicas, sendo assim mais resistentes que os aços com baixo teor de carbono, porém perdem em ductilidade e tenacidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Os aços com alto teor de carbono apresentam teores de carbono entre 0,60% e 1,4%C, são os mais duros e mais resistentes, porém são menos dúcteis dentre os aços-carbono (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Os aços são amplamente utilizados como materiais de construção, pois combinam resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo. Podendo assim, compreender a sua importância e extensão da sua aplicação em diversos campos da engenharia (CHIAVERINI, 1988).

Os aços utilizados em estruturas podem ser divididos em dois grupos: os aços carbono e os aços de alta resistência e baixo teor em liga. Os aços carbonos para estruturas devem obedecer a alguns requisitos fundamentais: ductilidade e homogeneidade microestrutural, valor elevado da relação entre limite de resistência e limite de escoamento, soldabilidade, suscetibilidade de corte por chama sem endurecimento e resistência razoável a corrosão (CHIAVERINI, 1988).

4.1.1 Propriedades dos aços

Dentre os requisitos já citados, com exceção da resistência à corrosão, podem ser satisfeitos pelos aços carbono de baixo e médio carbono obtidos por laminação, com limites de resistência à tração de 390 a 490 MPa e alongamento de 20% (CHIAVERINI, 1988).

O teor de carbono relativamente baixo e o trabalho a quente devido a laminação garantem a ductilidade necessária, produzindo também uma homogeneidade microestrutural muito boa em toda a extensão das peças, com pequenas variações de resistência à tração e à compressão, mas que não chegam a prejudicar a peça. Essa ductilidade garante excelente trabalhabilidade em operações como corte, furação, dobramento, etc., sem que seja originada fissuras ou outros defeitos. O limite de escoamento, como também o módulo de elasticidade, são características de grande importância no projeto e nos cálculos das estruturas (CHIAVERINI, 1988).

Devido a soldagem de peças estruturais ser um processo comumente utilizado, a soldabilidade também é uma característica importante. Os aços carbono comuns podem ser soldados sem alteração de sua estrutura, satisfazendo esse requisito. O corte por chama, também é muito empregado em peças estruturais e pouco afeta a estrutura nas vizinhanças da zona de corte desses aços. A resistência a corrosão desses aços só é alcançada quando ocorre a adição de pequenos teores de cobre, que tem a capacidade de melhorar essa propriedade em torno de duas vezes quando comparado ao mesmo aço sem adição do mesmo (CHIAVERINI, 1988).

4.1.2 NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado

Segundo a NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação, as barras de aço destinada a armadura de concreto armado podem ser classificadas nas categorias CA-25 e CA-50, e os fios de aço na categoria CA-60, de acordo com o valor de resistência de escoamento.

São classificadas como barras de diâmetro nominal de 6,3 mm ou superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente, sem processo posterior de deformação mecânica. Classificam-se como fios aqueles de diâmetro nominal 10,0 mm ou inferior, obtidos a partir de fio-máquina por trefilação ou laminação a frio.

Em relação às características geométricas, as barras da categoria CA-50 são providas de nervuras oblíquas e as da categoria CA-25 devem possuir superfície lisa, desprovida de qualquer tipo de nervura ou entalhes. Os fios de aço da categoria CA-60 podem ser lisos, entalhados ou nervurados. Na Figura 1 são mostradas barras e fios de aço.

Figura 1 — Barras e fios de aço: a) CA – 25; b) CA - 50 e c) CA - 60



Fonte: Adaptado de GERDAU.

A Tabela 1 são apresentas as propriedades mecânicas exigíveis das barras e fios aço destinados a armaduras de concreto armado.

Tabela 1 — Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado

Categoria	Limite de tensão de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
CA – 25	250	300	18
CA – 50	500	540	8
CA – 60	600	660	5

Fonte: Adaptado de NBR 7480

4.2 Concreto

Concreto pode ser definido com uma mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos, com ou sem a incorporação de componentes minoritários, como, aditivos químicos (retardadores ou aceleradores de pega, plastificantes e superplastificantes, etc.) e adições (escórias de alto-forno, pozolanas, microssílica, etc.), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (ARAÚJO, 2010; LIMA et al., 2014).

Os agregados podem ser qualquer material granular, como areia, pedregulho, seixos, rocha britada, escória de alto-forno e resíduos de construção e de demolição. Quando as partículas de agregado forem maiores que 4,75 mm, essas são classificadas como agregados graúdos e, quando menores, são denominadas de agregados miúdos. Já os aditivos e adições são as substâncias químicas adicionadas ao concreto fresco, as quais alteram algumas de suas propriedades (LIMA et al., 2014).

Há diversos tipos de concreto, dentre os principais podem ser citados: concreto armado, concreto convencional, concreto bombeável, concreto protendido, concretos especiais, concreto auto adensável, concreto de alto desempenho, entre outros. Cada um atende um tipo de exigência nas construções (LIMA et al., 2014).

4.2.1 Propriedades do concreto

Segundo a NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, os concretos estruturais devem possuir um valor mínimo da resistência a compressão de 20 MPa para concretos apenas com armadura passiva (armado). Devem ainda ter massa específica normal, ou seja, depois de secos em estufa, devem ter massa específica compreendida entre 2000 e 2800 kg/m³ e um coeficiente de dilatação térmica igual a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

4.3 Concreto armado

O concreto armado é um material compósito obtido a partir da associação do concreto com barras de aço colocadas em seu interior. Devido à baixa resistência à tração do concreto, as barras de aço servem para absorver os esforços de tração na estrutura como também aumentar a capacidade de carga das peças comprimidas (ARAÚJO, 2010).

Essa associação só é possível devido à aderência, pois é essa aderência entre o aço e o concreto que faz com que as deformações das barras de ferro sejam praticamente iguais às deformações do concreto que a envolve. Devido a sua baixa resistência à tração, o concreto fatura na zona tracionada e a partir disso os esforços de tração passam a ser absorvidos pela armadura, evitando assim que ocorra o colapso brusco da estrutura. O concreto, além de absorver os esforços de

compressão, tem a finalidade de proteger as armaduras contra a corrosão. Um cobrimento mínimo de concreto, que depende da agressividade do meio, também é necessário para que a durabilidade seja garantida (ARAÚJO, 2010).

De acordo com a NBR 6118, há alguns critérios de projeto que visam a durabilidade das estruturas de concreto, dentre elas podem ser citadas a espessura e do concreto de cobrimento da armadura. Para que se garanta um cobrimento mínimo (c_{min}), o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (c_{nom}), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc). Leva-se ainda em conta, a agressividade do meio ambiente. Essa agressividade está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, sendo classificada conforme a Tabela 2.

Tabela 2 — Classes de agressividade ambiental.

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

Fonte: Adaptado de NBR 6118

Assim sendo, as dimensões das armaduras e os espaçadores devem respeitar os cobrimentos nominais, estabelecidos na Tabela 3, para $\Delta c = 10$ mm.

Tabela 3 — Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
			Cobrimento nominal (mm)		
Concreto armado	Lage	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50

Fonte: Adaptado de NBR 6118

4.4 Corrosão das armaduras

Devido ao fenômeno de passivação do aço, o qual ocorre devido à grande alcalinidade do meio, uma vez que o pH da água presente nos poros pode chegar até

a 12,5, as armaduras de aço dentro da massa de concreto estão protegidas. Essa proteção é dada pela formação na superfície das barras de aço de uma camada impermeável de óxido de ferro, chamada de película passivadora. Essa película é gerada a partir de uma reação eletroquímica, a qual é composta de duas camadas, uma mais interna, composta principalmente por magnetita e outra mais externa, composta por óxidos férricos. Sendo assim, essa película formada impede a dissolução dos íons Fe^{++} , tornando-se impossível a corrosão das armaduras, mesmo com a presença de umidade e oxigênio (FUSCO, 2008; SANTOS, 2015).

Quando essa película é destruída, poderá ocorrer a corrosão das armaduras dentro do concreto. Há três diferentes causas para que ocorra essa destruição:

- Redução do pH, abaixo de 9, por efeito da carbonatação da camada de revestimento da armadura;
- Presença de Cl^- ou de poluição atmosférica acima de um valor crítico;
- Lixiviação do concreto na presença de fluxos de água que percorrem através de sua massa (FUSCO, 2008).

Outras duas formas de ataque de aço ainda podem ocorrer: a corrosão sob tensão e a fragilização por hidrogênio, sendo esta última causada por um revestimento com uma espessura inadequada. Existem normas que especificam espessuras mínimas de revestimento, como a NBR 6118 já apresentada (FUSCO, 2008).

4.4.1 O processo de corrosão

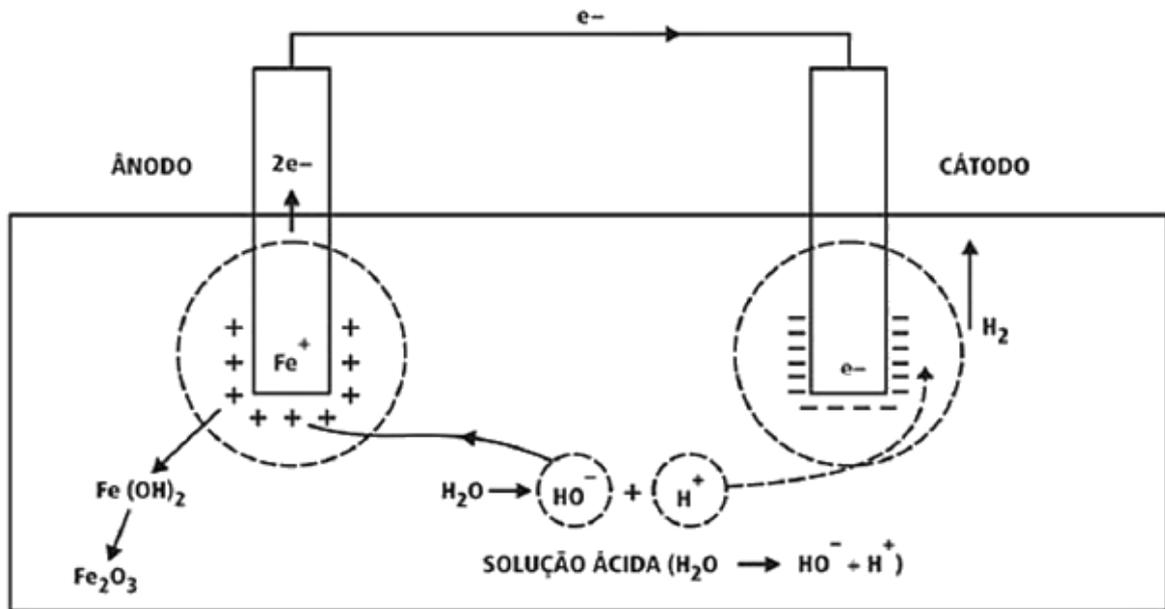
A corrosão pode ocorrer por dois diferentes processos, um em meio ácido com metais diferentes e outro em meio alcalino ou neutro, decorrente de uma oxigenação diferencial entre partes de um mesmo metal. Nos dois processos ocorrem duas reações eletrolíticas, sendo uma anódica e outra catódica (FUSCO, 2008).

Na reação anódica, o ferro fica carregado eletricamente de modo positivo, de forma que ocorra a dissolução pela passagem dos íons de Fe^{++} para a solução, essa reação anódica pode ser expressa pela equação 1. Já na reação catódica, o ferro funciona como um eletrodo, onde os elétrons liberados pelo ânodo passam pela solução, fechando o circuito elétrico (FUSCO, 2008).



A corrosão em meio ácido geralmente é estabelecida pelo emprego de dois metais diferentes (Figura 2). Nesse meio ácido ocorre a ionização da água no qual os íons H^+ dirigem-se ao cátodo, onde ocorre sua neutralização, formando em seguida H_2 . Os íons $(OH)^-$ dirigem-se ao anodo, onde reagem com os íons de Fe^{++} solubilizados, formando o $Fe(OH)_2$, que por reações forma a ferrugem, que é constituída basicamente de Fe_2O_3 (FUSCO, 2008).

Figura 2 — Mecanismo de corrosão de metais diferentes ou concentrações eletrolíticas diferentes.

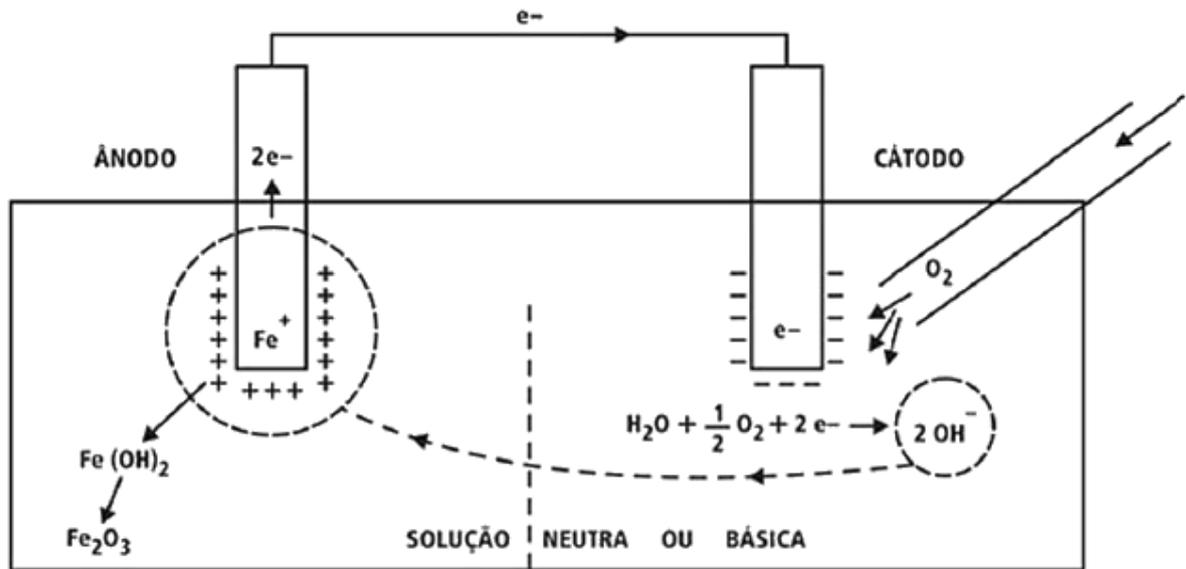


Fonte: FUSCO, 2008.

O mecanismo de corrosão em meio alcalino está mostrado na Figura 3. A reação catódica que ocorre pode ser descrita pela equação 2. No meio alcalino não ocorre a formação de íons H^+ . Devido à oxidação do metal, ocorre no cátodo a formação de íons hidroxila $(OH)^-$, que se dirigem ao ânodo, produzindo o Fe_2O_3 (FUSCO, 2008).



Figura 3 — Mecanismo de oxigenação diferente.



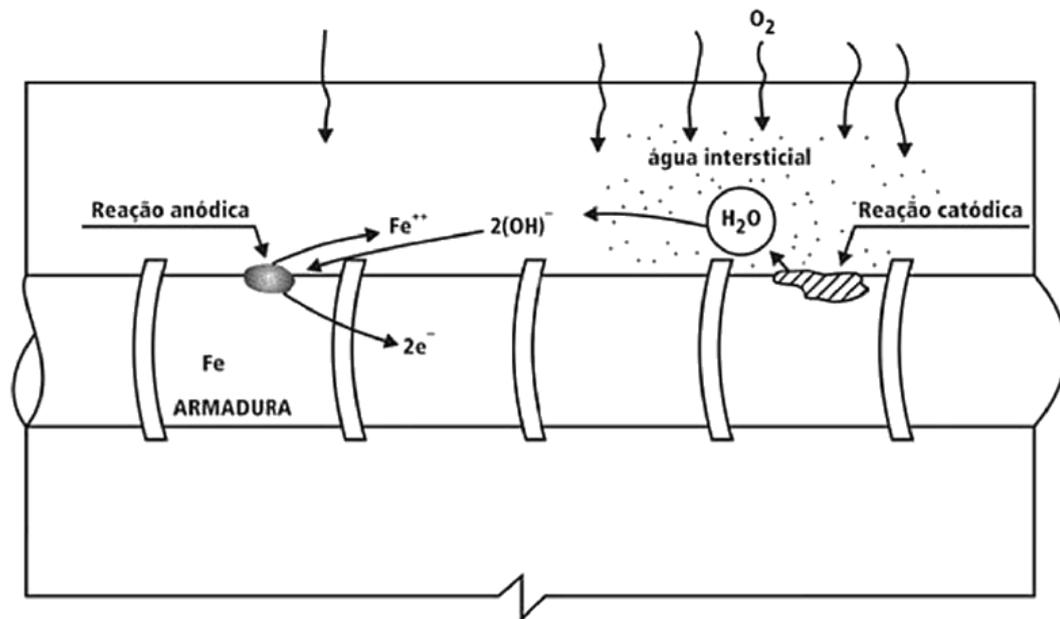
Fonte: FUSCO, 2008.

4.4.2 Corrosão das armaduras dentro do concreto

Para que ocorra o processo de corrosão do aço dentro do concreto é necessário que, juntamente com a armadura, haja umidade e oxigênio, já que o meio em que estão mergulhas é alcalino. Através da difusão da camada de recobrimento, ocorre a penetração do oxigênio proveniente do meio ambiente, o qual chega até o metal e provoca a corrosão caso a película passivadora esteja rompida (FUSCO, 2008).

O processo de corrosão só ocorre com a presença simultânea de água e oxigênio. Portanto, não haverá corrosão se o concreto estiver totalmente seco ou totalmente saturado. Na Figura 4 é mostrado um esquema da corrosão decorrente da formação de macropilhas eletrolíticas. Pode-se observar que na mesma barra de aço, um trecho pode apresentar um comportamento anódico e, outro, um comportamento catódico (FUSCO, 2008).

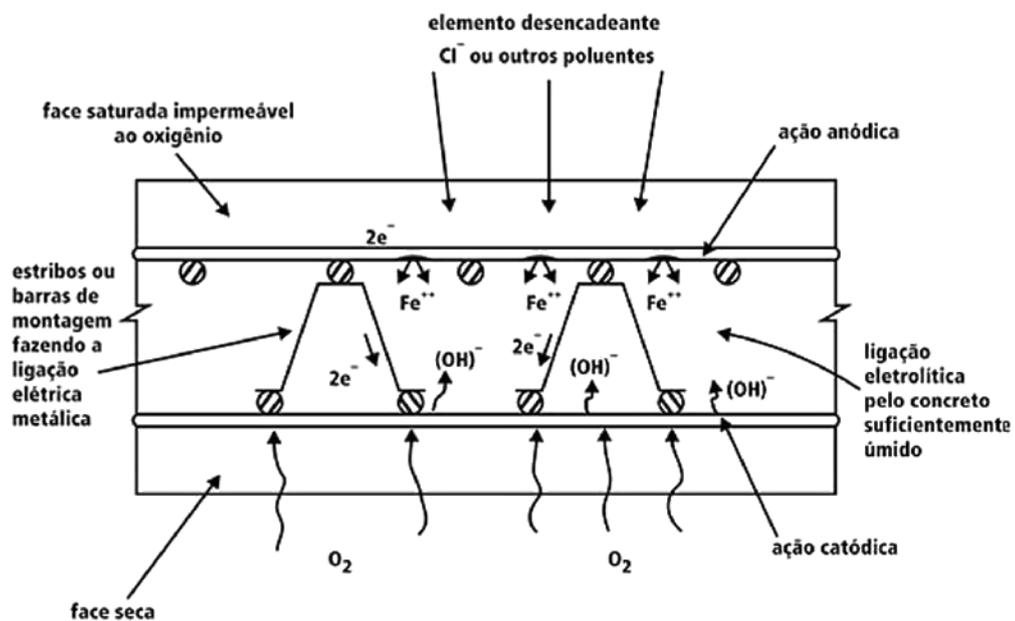
Figura 4 — Corrosão decorrente da formação de micropilhas



Fonte: FUSCO, 2008.

Porém, pode ocorrer a formação de macropilhas (Figura 5), na qual toda armadura de uma das faces da peça tem comportamento anódico, e a armadura da outra face tem comportamento catódico. Essa situação pode ocorrer quando partes da estrutura estão sujeitas ao intemperismo e outras partes estão protegidas (FUSCO, 2008).

Figura 5 — Corrosão decorrente da formação de macropilhas.



Fonte: FUSCO, 2008.

5 METODOLOGIA

Nessa pesquisa, optou-se como estratégia metodológica, a revisão bibliográfica sobre o processo de corrosão por íons cloreto e carbonatação que afetam as estruturas de concreto armado.

Essa revisão foi feita com base em livros, teses e em artigos recentes que abordam esse tema e conseqüentemente, seu impacto na construção civil, além das formas para prevenção ou reparo da mesma.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Corrosão de estruturas de concreto armado

A corrosão das armaduras é o mais frequente fenômeno de deterioração das estruturas de concreto armado, onde há o comprometimento tanto do ponto de vista estético, quanto do ponto de vista de segurança.

No Quadro 1 são mostrados os principais fatores de deterioração das estruturas e os sintomas que podem ser notados para cada caso.

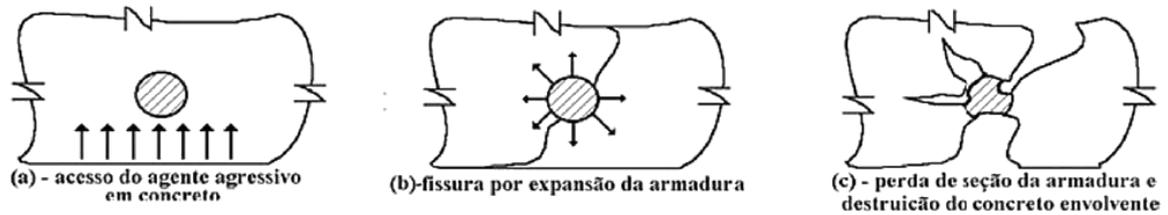
Quadro 1 — Principais fatores de deterioração das estruturas

	Decorre de:	Sintomas observados:
Deterioração mecânica	Choques, impactos, recalque diferencial das fundações	<ul style="list-style-type: none"> • Fissuração lascamento do concreto • Perda de armadura
Deterioração física	Desgaste superficial, cristalização de sais nos poros do concreto, retração hidráulica, gradiente térmico e ação do fogo	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste superficial • Fissuração • Desagregação do concreto
Deterioração química	Ataque por ácidos, água pura, carbonatação, ataque de cloretos, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Expansão por fissuração do concreto • Decomposição química da pasta
Deterioração eletroquímica	Corrosão das armaduras	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioração e perda da seção do aço • Perda da aderência aço/concreto

Fonte: Adaptado de SACHS, 2015.

A corrosão das armaduras é um processo que ocorre da periferia para o seu interior, onde ocorre a troca de seção de aço resistente por ferrugem, sendo o primeiro aspecto patológico da corrosão, o qual acarreta a diminuição da capacidade resistente da armadura, levando à diminuição da área de aço. Associada a essa troca há o surgimento de outros mecanismos de degradação da estrutura, como é mostrado na Figura 6 (SOUZA; RIPPER, 1998)

Figura 6 — Fases de instalação do processo de corrosão em um barra de aço



Fonte: SOUZA; RIPPER, 1998

Na Figura 7 é mostrado o deslocamento do concreto ocasionado pela corrosão da armadura, devido ao produto de corrosão gerado, que possui volume maior que o metal original.

Figura 7 — Deslocamento do concreto provocado pela corrosão da armadura.



Fonte: SACHS, 2015.

Para que a corrosão possa ocorrer são necessárias algumas condições, sendo elas (BÖHNI, 2005):

- Uma diferença de potencial suficiente entre dois pontos da armadura de forma a possibilitar o fluxo de elétrons;
- Umidade do concreto, garantindo a existência de um eletrólito;

- Oxigênio presente, possibilitando uma reação catódica;
- Rompimento da camada passivadora da armadura, que pode ocorrer a partir da ação de íons cloretos ou pela carbonatação do concreto.

6.1.1 Mecanismos de Corrosão

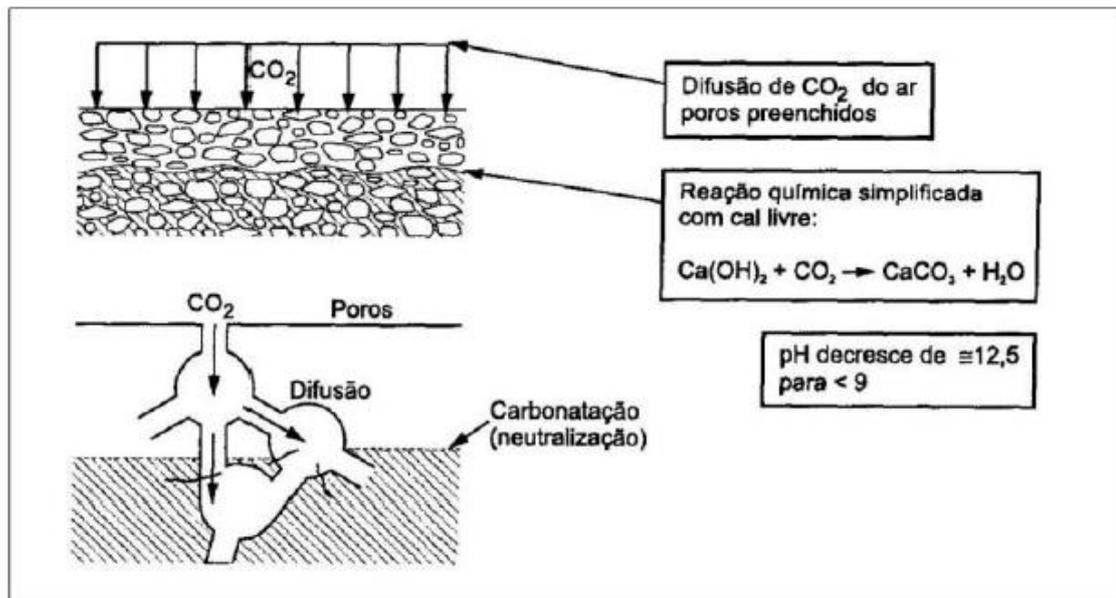
Dentre os mecanismos existentes, serão abordados a corrosão por carbonatação e a corrosão por íons cloreto.

6.1.1.1 Corrosão por carbonatação

A carbonatação pode ser definida como um processo físico-químico, o qual ocorre de forma progressiva no interior das estruturas de concreto devido a penetração de dióxido de carbono (CO_2) da superfície externa para a interna. Esse processo é um fenômeno que acontece de forma natural, e é considerada uma anomalia que associada ao ataque por cloretos, faz com que haja uma redução da durabilidade da estrutura, sendo um fator preponderante no desencadeamento da corrosão das armaduras (MAZZA, 2015).

O processo físico ocorre pelo processo de difusão do CO_2 na rede de poros, e o processo químico é decorrente da reação desse CO_2 com o CH e outros sólidos carbonatáveis, como hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH). O principal efeito da carbonatação é a redução do pH do concreto, que passa de valores acima de 12,5 para valores inferiores a 9, devido a transformação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) em carbonato de cálcio (CaCO_3). Na Figura 8 é apresentado esquematicamente o fenômeno de carbonatação, o qual ocorre a partir da superfície, pode-se dividir esse processo em duas zonas distintas, uma possui o pH superior a 12 e a outra um pH inferior a 9, entre essas duas zonas há uma zona intermediária denominada zona de neutralização (MAZZA, 2015).

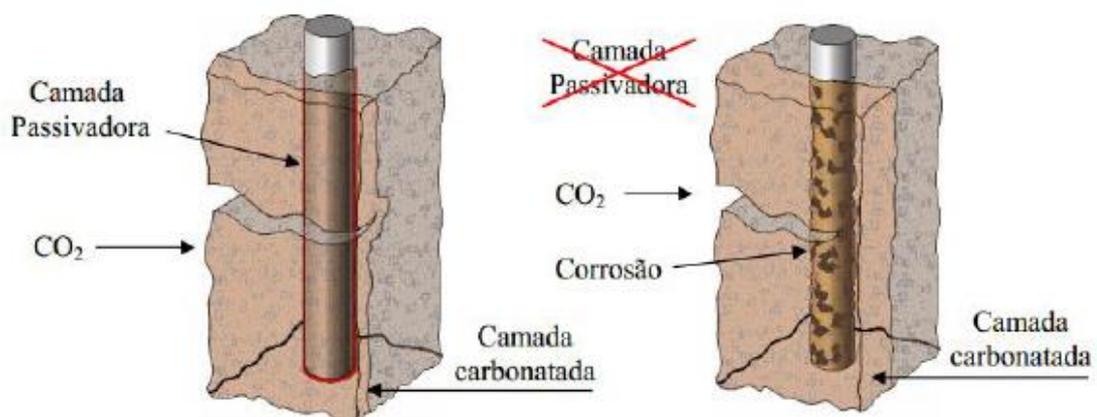
Figura 8 — Esquemática do fenômeno da carbonatação.



Fonte: BAKKER, 1988 apud MAZZA, 2015).

Caso essa redução da alcalinidade atinja a armadura, pode levar a despassivação, deixando o aço desprotegido e susceptível a corrosão. Na Figura 9 é mostrado o avanço da frente de carbonatação que ocorre a medida que o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aumenta, podendo iniciar o processo de corrosão da armadura devido à sua despassivação (MAZZA, 2015).

Figura 9 — Representação do avanço da frente de carbonatação



Fonte: TULA, 2000.

A carbonatação ocorre basicamente pela difusão do CO_2 na fase gasosa dos poros, onde se dissolvem na água dos poros resultando na formação do ácido

carbônico (H_2CO_3), conforme a Equação 3 (MAZZA, 2015 apud PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989).



O H_2CO_3 se comporta na água como um diácido fraco, onde sua dissociação ocorre em duas fases, conforme as equações 4 e 5 (MAZZA, 2015 apud PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989).



Com a passagem do CO_2 ocorre a diminuição de concentração de íons OH^- na solução intersticial dos poros, fazendo com que haja a redução do pH. A alcalinidade é reestabelecida através de uma dissolução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na água presente nos poros e por meio de uma difusão do mesmo das regiões de maior para menor alcalinidade, conforme a equação 6 (MAZZA, 2015 apud PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989).



A reação do CO_2 dissolvido com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dissolvido faz com que o CaCO_3 seja precipitado, conforma a equação 7 (MAZZA, 2015 apud PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989).



A principal reação da carbonatação ocorre com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, na qual ele é consumido pelo CO_2 e na presença de umidade se transforma em CaCO_3 , conforme a equação 8 (MAZZA, 2015).



6.1.1.2 Corrosão por íons cloreto

Os Cl^- têm a capacidade de dissolver a película protetora de óxido de ferro que reveste as armaduras de aço, iniciando a reação anódica de solubilização do Fe^{++} . A concentração desses íons pode ser originada dos componentes da mistura, como também, advindos no meio externo, os quais conseguem penetrar o interior da massa de concreto (FUSCO, 2008).

Quando os Cl^- estão em contato com a armadura produzem uma redução do pH do concreto, de 12,5 a 13,5 para valores de até 5. Esses íons atingem a armadura de forma localizada, destruindo a camada passivadora, o que resulta em uma corrosão por pite, o qual depois de formado vai reduzindo o diâmetro da barra de aço. O transporte desses cloretos para dentro do concreto se dá por meio dos mecanismos de absorção capilar, difusão, permeabilidade e migração (MOTA et al., 2012).

A absorção capilar ocorre com a penetração de Cl^- na superfície do concreto, a qual depende da porosidade, que permite o transporte de líquidos para o interior do concreto. Quanto menor forem os poros conectados do concreto, maior será a intensidade das forças capilares de sucção. Já a difusão iônica no interior do concreto, quando os íons cloreto já ultrapassaram a camada superficial devido a uma diferença de concentração entre o exterior e interior do concreto, ocorre uma busca de equilíbrio, o qual promove a movimentação dos íons (MOTA et al., 2012).

A permeabilidade pode ser descrita como a facilidade com que uma substância atravessa o concreto, a qual depende da qualidade e dimensões dos poros. Portanto, a permeabilidade depende da relação de água/cimento (em peso) na mistura do concreto e quanto menor o valor dessa relação, menos permeável será o concreto. Esse mecanismo ocorre apenas em situações especiais como contenção de solos, contato direto com a ação de águas corrente e estruturas semienterradas. A migração iônica ocorre por causa dos íons cloreto que são induzidos a se movimentar pela rede de poros do concreto, devido a corrente elétrica gerada do processo de corrosão eletroquímico ou através de campos elétricos externos (MOTA et al., 2012).

A penetração de Cl^- pode ser influenciada pelos seguintes fatores: relação água/cimento (em peso), composição química do cimento e adições, temperatura, compactação e cura, agentes ambientais, umidade relativa, fissuras, cobrimento e carbonatação (MOTA et al., 2012).

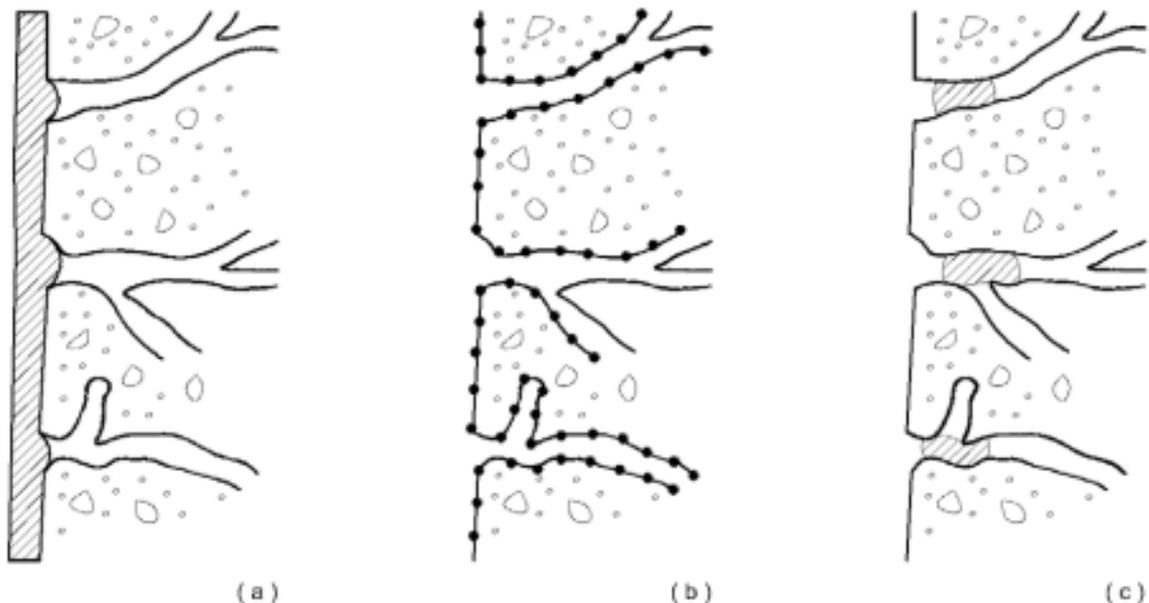
6.1.2 Prevenção da Corrosão em Armaduras

A corrosão ocorre nas barras de aço que estão inseridas dentro do concreto. Portanto, para prevenir que essa corrosão ou oxidação aconteça, tem-se que proteger a armadura inserida no concreto por meio do próprio concreto, ou seja, quanto mais qualidade tiver o concreto que envolve a armadura, melhor será a proteção das barras. (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO, 2015).

Porém, métodos complementares de proteção podem ser utilizados visando auxiliar na prevenção da corrosão das armaduras. Considera-se dois tipos de métodos de aplicação sobre o concreto e sobre a armadura. Dentre os métodos de aplicação sobre o concreto, Meira (2017) destaca os tratamentos superficiais e os inibidores de corrosão.

Os tratamentos superficiais sobre o concreto têm como objetivo dificultar a entrada de agentes agressivos no seu interior, mas ainda permitindo que ocorra a saída de vapor de água (MEIRA, 2017). Na Figura 10 pode-se observar três tipos de tratamentos superficiais.

Figura 10 — Tipos de tratamentos superficiais: (a) pinturas e selantes, (b) hidrofugantes, (c) bloqueadores de poros



Fonte: KEER, 1992.

No Quadro 2 são apresentados os materiais que são empregados como tratamento superficiais do concreto.

Quadro 2 — Tipos de tratamento superficial e seus materiais

Tipo de tratamento	Material
Pinturas e selantes	Acrílico Epóxi Poliéster Polietileno Poliuretano Vinil
Hidrofugantes	Silicone Siloxano Silano
Bloqueadores de poros	Silicato Fluoreto de silício Dispersão com cimento

Fonte: Adaptado de MEIRA, 2017.

Os inibidores de corrosão são substâncias que, quando em concentração adequada em um sistema de corrosão, têm a propriedade de reduzir a atividade de corrosão sem alterar a concentração do agente agressivo. Esses inibidores podem ser adicionados tanto à mistura de concreto fresco, como também serem aplicados superficialmente sobre o concreto endurecido (MEIRA, 2017).

Quando adicionados no concreto fresco, esses materiais atuam como prevenção à corrosão e, em geral, são utilizados em estruturas que são submetidas a ambientes de elevada agressividade ambiental. Já quando adicionados no concreto endurecido, esses inibidores atuam como um tratamento preventivo (caso ainda não haja corrosão) ou como tratamento corretivo, de forma a reduzir o processo de corrosão. Em ambos os casos, os inibidores devem ser capazes de chegar até a armadura, em quantidade suficiente para protegê-la da corrosão ou auxiliar na redução da velocidade de corrosão de um processo corrosivo já em andamento (MEIRA, 2017).

Esses inibidores são classificados de acordo com a sua atuação, sendo divididos em:

- Inibidores de adsorção (os quais atuam nas reações anódicas, catódicas ou nas duas);
- Inibidores de formação de película (que atuam bloqueando a superfície da armadura); e
- Inibidores de passivação (que atuam favorecendo as reações de passivação da armadura).

Os inibidores de adsorção podem ser classificados ainda em:

- Inibidores anódicos (atuam reduzindo as reações anódicas),
- Inibidores catódicos (atuam reduzindo as reações catódicas) e,
- Inibidores mistos (atuam reduzindo ambas as reações).

Entre os métodos de aplicação sobre as armaduras destacam-se os tratamentos superficiais de proteção, sendo eles:

- Pintura epóxi,
- Galvanização e,
- Proteção catódica.

A pintura epóxi é uma técnica de proteção desenvolvida em laboratório, obtendo resultados satisfatórios na prevenção da corrosão em concreto submetidos à carbonatação ou íons cloreto. Porém, para a eficiência dessa técnica, a pintura deve apresentar alguns requisitos técnicos:

- Cobrir toda a armadura de modo uniforme e com espessura adequada (sem comprometer a aderência entre a armadura e o concreto);
- Ser resistente;
- Ter boa aderência à superfície da armadura;
- Ser flexível o suficiente para permitir as dobras da armadura.

Falhas na pintura podem comprometer a proteção da armadura, em ambientes com a presença de cloretos essa falha não pode ocorrer, uma vez que esses íons podem entrar através dessa falha e aumentar a área de ataque da corrosão (MEIRA, 2017).

Segundo Meira (2017), as armaduras galvanizadas têm sido utilizadas com sucesso em estruturas de concreto desde os anos 1930, possuindo vantagens significativas sobre as armaduras convencionais. Com a galvanização da armadura, ocorre a produção de uma camada mais interna formada de uma mistura Fe-Zn e uma capa mais externa de zinco puro. A proteção do aço galvanizado vem da formação de um filme passivo nessa camada de zinco, que provoca a redução da taxa de dissolução deste. Essa proteção depende tanto da espessura dessa camada externa e quanto do pH do meio (MEIRA, 2017).

Quando o concreto está exposto à carbonatação, a diminuição do pH não é suficiente para produzir taxas de corrosão elevadas, portanto a camada de zinco permanece passiva. Já caso dos cloretos, esses íons podem despassivar pontualmente essa camada de proteção. Uma vantagem da armadura galvanizada é que mesmo que ocorra a corrosão, a camada de zinco corrói a taxas menores, o que significa uma vida útil mais longa para esse tipo de armadura em comparação com a armadura convencional (MEIRA, 2017).

6.1.3 Métodos de recuperação

Segundo Helene (1986) a recuperação desse fenômeno patológico é delicada e requer mão de obra especializada e possui três etapas básicas para a recuperação de elementos estruturais comprometidos pelo fenômeno da corrosão: limpeza, recuperação de armadura e revestimento.

A limpeza deve ser rigorosa, podendo ser realizada com jato de areia e apicotamento de todo o concreto, procedimento necessário para facilitar a aderência da posterior camada de revestimento, em seguida deve-se realizar uma análise criteriosa da possível redução de seção transversal das armaduras atacadas, verificando a necessidade ou não do emprego de armaduras de complementação, por fim a reconstrução do revestimento deve ser feita de modo a garantir a manutenção do meio alcalino do concreto e, conseqüentemente, da película de passivação nas barras de aço (HELENE, 1986).

Durante o processo de recuperação estrutural deve-se também realizar um diagnóstico das possíveis causas. O concreto se degrada ao longo do tempo ou devido a ações externas e/ou falhas de execução do projeto (como por exemplo um dimensionamento da camada de recobrimento incorreta). Essa degradação apresenta alguns sinais, sendo os mais comuns:

- Fissuras e trincas,
- Corrosão da armadura,
- Manchas na superfície,
- Desagregações,
- Deformação excessiva, e
- Deficiências na concretagem.

A determinação do processo corretivo mais adequado depende do nível de oxidação em que a estrutura se encontra. Como a corrosão não ocorre em toda a barra e sim em zonas de maiores e menores intensidades (regiões catódicas e anódicas), essa avaliação se torna de suma importância (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO, 2015).

O concreto é um elemento estrutural de suma importância para a segurança, sendo assim deve ser recuperado em sua totalidade. Porém antes da recuperação do concreto deve-se avaliar a armadura em função da perda de seção da barra. Caso essa perda seja de até 10%, inicialmente deve-se efetuar uma limpeza correta em toda base, criando uma superfície aderente e marcando as áreas não deterioradas ou não aderidas. Em seguida, retira-se todo o concreto, para que se possa fazer a limpeza da barra e revesti-la com tintas anticorrosivas, e por fim preencher novamente a seção com um novo concreto. Entretanto, se a perda for maior que 10%, corta-se a parte da barra danificada, repõem-se com uma nova e amarra-a a um trecho íntegro da barra antiga (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO; 2015).

6.1.4 Estrutura recuperada

Na Figura 11 é mostrada a corrosão de um pilar de um edifício com cerca de 30 anos. É possível observar que o pilar apresenta elevada deterioração devido ao

comprometimento do concreto e das armaduras. Esses danos foram causados por um conjunto de fatores, como falhas na concretagem, cobrimento da armadura com espessura inferior à indicada, infiltrações e choque mecânicos (provocados por batidas de carros). Como procedimento de recuperação foi realizado o escoramento da estrutura e para remoção do concreto deteriorado foi removido para se conseguir o acesso a armadura. Nos trechos mais comprometidos a armadura teve que ser substituída, enquanto que nos demais trechos foi realizada a remoção da camada corroída e aplicado um inibidor de corrosão. Foi utilizado um adesivo estrutural de resina epóxi como ponte de aderência entre o concreto existente e o novo. Além dessa recuperação, foi feito o reforço da estrutura com lâminas de fibra de carbono, como é mostrado na Figura 12 (SACHS, 2015).

Figura 11 — Danos em um pilar.



Fonte: SACHS, 2015.

Figura 12 — Colagem das lâminas de compósito de fibra de carbono



Fonte: SACHS, 2015.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo fazer uma revisão bibliográfica da corrosão de estruturas de concreto, buscando entender os mecanismos desse processo. Pela bibliografia consultada foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Os principais causadores da corrosão de armadura do concreto são a carbonatação e os íons de cloreto. O primeiro contribui com a queda do pH e a consequente despassivação da armadura e o segundo contribui com a diminuição da resistividade do concreto e o ataque a camada passivadora;
- Para prevenir que essa corrosão aconteça, tem-se que proteger a armadura inserida no concreto, utilizando-se tanto dos métodos de aplicação sobre o concreto (tratamentos superficiais e inibidores de corrosão) ou sobre a armadura (pintura epóxi e galvanização);
- No processo de recuperação estrutural deve-se começar fazendo um levantamento das possíveis causas, verificando se haverá necessidade ou não da substituição de parte da armadura;
- A iniciação do processo de corrosão das armaduras se dá desde a concepção do projeto (dimensionamento inadequada da camada de cobrimento), como também por agentes do meio ambiente, entre outros;
- O estudo da corrosão de estruturas de concreto torna-se, a cada dia, mais importante devido a constante busca de redução de custos de uma obra aliada com uma maior vida útil dos materiais empregados, e devido as mudanças climáticas que veem ocorrendo, onde métodos de prevenção vêm sendo empregados com mais frequência.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos nesse trabalho são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realização de um estudo para avaliar a influência do meio-ambiente no processo corrosivo das armaduras;
- Realização de um estudo para avaliar a qualidade dos materiais empregados na construção civil;
- Estudo de custos com manutenção e recuperação das manifestações patológicas.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 3. ed. Rio Grande, RS: Dunas, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.
- BÖHNI, H. **Corrosion in Reinforced Concrete Structures**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005. 264p.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013. 817p.
- CARDILLI, Juliana. Pontes e viadutos de SP sofrem com manchas e buracos no concreto. **G1**. 2012. Disponível em: < <http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2012/03/pontes-e-viadutos-de-sp-sofrem-com-manchas-e-buracos-no-concreto.html>>. Acesso em: 08 dez. 2019.
- CERQUEIRA, Rosana. Problema em apoio pode ter provocado queda de viaduto em SP, diz especialista. **G1**. 2018. Disponível em: < <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/11/15/especialista-diz-que-problema-em-apoio-provocou-queda-de-viaduto-em-sp.ghtml> >. Acesso em: 08 dez. 2019.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 6. ed. São Paulo, SP: ABM, 1988. 576p.
- FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural**: tópicos aplicados. 1. ed. São Paulo, SP: Pini, 2008. 179 p.
- GERDAU. **Aços para construção civil**. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/catalogo-construcao-civil.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986.

KEER, J. G. Surface treatments. In: MAYS, G. **Durability of concrete structures: Investigation, repair, protection**. London: E & FN Spon, 1992. Cap.5. p. 146-169.

LIMA, C. I. V., et al. Concreto e suas inovações. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, Maceió, v. 1, n. 1, p. 31-40, mai. 2014. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/index.php/fitsexatas/article/view/1285/755>>. Acesso em: 17 out. 2017.

MAZZA, R. **Carbonatação acelerada de concretos com cinza de arroz sem moagem**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em:< <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7875>>. Acesso em: 15 out. 2017.

MEIRA, G. R. **Corrosão em Armadura em Concreto Armado: Fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: IFPB, 2017. 130p.

MOTA, J. M. F. et al. Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado devido ao Ataque de Íons Cloreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais...Maceió**, 2012. p.1-16.

SACHS, A. Tratamento Intensivo: Trincas, fissuras e manchas no concreto podem indicar problemas nas edificações que não devem ser ignorados e merecem reparo imediato. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 220, p. 40-44, jul. 2015.

SANTOS, A. V. B. dos. Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação. **Revista Especialize On-line IPOG**, Goiânia, v. 01, n. 10, dez/2015. Disponível em: <<https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online/edicao-n10-2015/corrosao-de-armadura-em-estruturas-de-concreto-armado-devido-a-carbonatacao/>>. Acesso em: 30 out. 2017.

SOARES, A. P. F.; VASCONCELOS, L.T.; NASCIMENTO, F. B. C. do. Corrosão em Armaduras de Concreto. **Cadernos de Graduação: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Maceió, v.3, n. 1, p.177- 188, nov. 2015.

SOUZA, V. C. de.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1. ed. São Paulo, SP: Pini, 1998. 257p.

TULA, L. S. **Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável.** São Paulo, 2000. 259p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.