

## CONTROLE DE CORROSÃO DE CONCRETO REFORÇADO COM AÇO

Túlio da Silva Bandeira<sup>1</sup>  
Fabíola Tavares Bento<sup>2</sup>

### RESUMO

O reforço de aço em estruturas de concreto é suscetível à corrosão quando íons cloreto entram no concreto a partir de sais aplicados na superfície do concreto, ou da água em ambientes marinhos. Se os cloretos estiverem presentes em quantidade suficiente, eles rompem a película passiva no aço de reforço, resultando em corrosão. O teor de oxigênio, a disponibilidade de umidade e a temperatura também afetam essa taxa de corrosão. A corrosão do aço de reforço pode enfraquecer a resistência estrutural; criar rachaduras, delaminação e fragmentação do concreto. Diante disto é que o presente artigo se torna importante, com vistas a apontar a importância do controle de corrosão de concreto reforçado com aço, a fim de minimizar custos e garantir a segurança dos usuários. Os objetivos específicos são: Descrever o processo de corrosão; Elencar os fatores que influenciam a corrosão e descrever medidas de controle de corrosão. Para atender aos objetivos propostos recorreu-se à pesquisa bibliográfica. No presente estudo, investigou-se que a durabilidade da estrutura de concreto está intrinsecamente associada às devidas propriedades do projeto e o nível de sua qualidade. Apurou-se que a agressividade ambiental é um dos principais fatores para a corrosão e que comprometem a durabilidade da estrutura. Evidenciou-se também que a conservação das estruturas de concreto armado tem sido reduzida por ações de deterioração, em especial no que concerne à corrosão de armaduras.

**Palavras-chave:** Corrosão. Concreto. Controle.

### ABSTRACT

Reinforcing steel in concrete structures is susceptible to corrosion when chloride ions enter concrete from salts applied to the surface of concrete or water in marine environments. If the chlorides are present in sufficient quantity, they rupture the passive film in the reinforcing steel, resulting in corrosion. Oxygen content, moisture availability, and temperature also affect this rate of corrosion. Corrosion of reinforcing steel may weaken structural strength; create cracks, delamination and fragmentation of the concrete. In view of this, the present article becomes important, in order to point out the importance of the corrosion control of reinforced concrete with steel, in order to minimize costs and guarantee the safety of users. The specific objectives are: Describe the corrosion process; List the factors that influence corrosion and describe corrosion control measures. In order to meet the proposed objectives, bibliographical research was used. In the present study, it was investigated that the durability of the concrete structure is intrinsically associated with the proper properties of the project and the level of its quality. It was found that environmental aggression is one of the main factors for corrosion and that compromise the durability of the structure. It has also been shown that the preservation of reinforced concrete structures has been reduced by actions of deterioration, especially with regard to the corrosion of reinforcements.

**Keywords:** Corrosion. Concrete. Control.

---

<sup>1</sup> Acadêmico de Engenharia Civil, Uninorte Laureate. E-mail: tuliobandeira.eng@gmail.com

<sup>2</sup> Professora da Uninorte Laureate e orientadora do artigo.

## INTRODUÇÃO

Dada a importância dos custos associados à corrosão das infraestruturas, é extremamente importante que todos os métodos possíveis aplicáveis ao controle da corrosão nas estruturas de concreto existentes sejam desenvolvidos de modo a que estas estruturas não se deteriorem prematuramente. Igualmente importante é o desenvolvimento de métodos para evitar este caro problema de corrosão em todas as estruturas de concreto a serem construídas no futuro. Assim, os métodos de controle podem ser divididos em duas áreas principais: Controle de corrosão em novas construções de concreto e Controle de corrosão para reabilitação de estruturas de concreto existentes.

O uso de um bom projeto e procedimentos de construção, profundidade de cobertura de concreto adequada, mistura inibidora de corrosão e concreto de baixa permeabilidade por si só não diminuirão o problema, porque o concreto tem uma tendência a rachar excessivamente. Mesmo a mistura inibidora da corrosão para o concreto provavelmente não seria útil quando o concreto rachasse. Esta situação deixa essencialmente o próprio aço de reforço como a última linha de defesa contra a corrosão. Por esta razão, o uso de um sistema de barreira no aço de reforço, tal como o revestimento de epóxi ou outros revestimentos metálicos orgânicos ou mesmo outros possíveis, é ainda mais crítico no abatimento deste dispendioso problema de corrosão (DUGATO, 2006; POLITO, 2006).

É provável que nunca haja qualquer revestimento orgânico capaz de aguentar a combinação extrema de umedecimento constante e alta temperatura e alta umidade que o aço de reforço é frequentemente exposto nos ambientes, principalmente os marinhos. O desempenho bem-sucedido de barras de aço revestidas com epóxi embutidas em diferentes projetos indica que, quando usado em condições de exposição que não mantêm o concreto constantemente molhado, o revestimento de epóxi proporcionará um certo grau de proteção às barras de aço e, desse modo, atrasará o processo de iniciação da corrosão (RIBEIRO, 2018).

Para as plataformas de concreto já contaminadas com cloreto contaminado, a proteção catódica de corrente impressa usando anodos de malha de titânio fornece

a solução definitiva e permanente para interromper a corrosão do aço nas estruturas, desde que os retificadores associados e a fiação elétrica sejam adequadamente mantidos. A extração de cloreto eletroquímico fornece um método alternativo de reabilitação para parar a corrosão do aço em concreto contaminado, embora de forma menos permanente. Esta alternativa tem a vantagem de não ter nenhum retificador ou fiação para manter após o tratamento (TAVARES, 2006).

O interesse pela temática surgiu em decorrência de o monitoramento da corrosão no concreto ter se tornado cada vez mais importante, especialmente em infraestrutura de concreto armado. O reforço de aço em estruturas de concreto é suscetível à corrosão quando íons cloreto entram no concreto a partir de sais aplicados na superfície do concreto, ou da água em ambientes marinhos. Se os cloretos estiverem presentes em quantidade suficiente, eles rompem a película passiva no aço de reforço, resultando em corrosão. O teor de oxigênio, a disponibilidade de umidade e a temperatura também afetam essa taxa de corrosão. A corrosão do aço de reforço pode enfraquecer a resistência estrutural; criar rachaduras, delaminação e fragmentação do concreto.

Desta forma, surge a seguinte problemática: Como o controle de corrosão de concreto reforçado com aço pode garantir a segurança do projeto?

Diante disto é que o presente artigo se torna importante, com vistas a apontar a importância do controle de corrosão de concreto reforçado com aço, a fim de minimizar custos e garantir a segurança dos usuários. Os objetivos específicos são: Descrever o processo de corrosão; Elencar os fatores que influenciam a corrosão e descrever medidas de controle de corrosão.

Para atender aos objetivos propostos, utilizou-se como metodologia a pesquisa bibliográfica, que buscou em livros, artigos, trabalhos e conclusão, dissertações e afins, materiais que subsidiassem a temática ora proposta.

## **1 O PROCESSO DE CORROSÃO**

De acordo com Ribeiro (2018), a corrosão das barras de reforço de aço é um processo eletroquímico que requer um fluxo de reações químicas atuais e diversas.

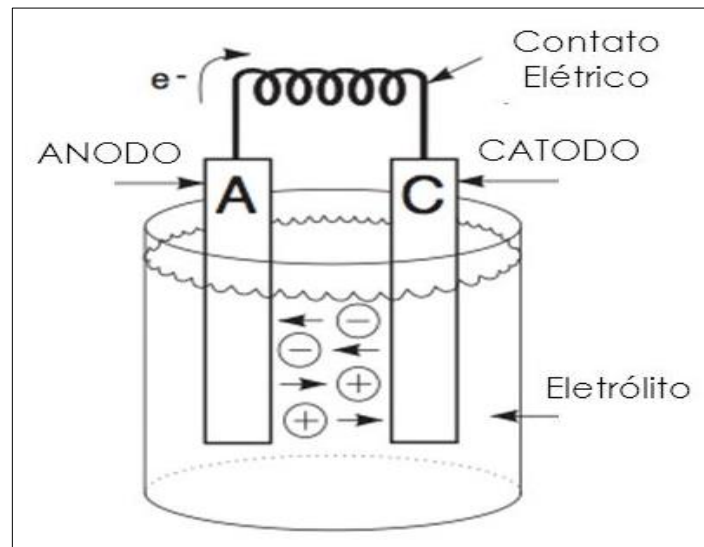
Os três componentes essenciais de uma célula de corrosão galvânica são, de acordo com Santos Filho (2010):

-Ânodo: onde acontece a oxidação do metal.

- Cátodo: metal ou outro condutor eletrônico que fornece sítios para a semi-reação do meio
- Eletrólito: meio onde acontece a condução iônica, que, muitas vezes, é em meio aquoso.

A relação geral entre os componentes de uma célula de corrosão é ilustrada na figura 1.

Figura 1: Relação entre os componentes de uma célula de corrosão.



Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/10424939/>

O ânodo e o cátodo podem estar na mesma barra de reforço de aço. O ânodo é a localização em uma barra de reforço de aço onde a corrosão está ocorrendo e o metal está sendo perdido. No ânodo, os átomos de ferro perdem elétrons para tornarem-se íons de ferro ( $\text{Fe}^{+2}$ ). Esta reação de oxidação é referida como a reação anódica. O cátodo é a localização em uma barra de reforço de aço onde o metal não é consumido. No cátodo, o oxigênio, na presença de água, aceita elétrons para formar íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ). Esta reação de redução é referida como a reação catódica. O eletrólito é o meio que facilita o fluxo de elétrons (corrente elétrica) entre o anodo e o cátodo (BHARGAVA et al., 2005).

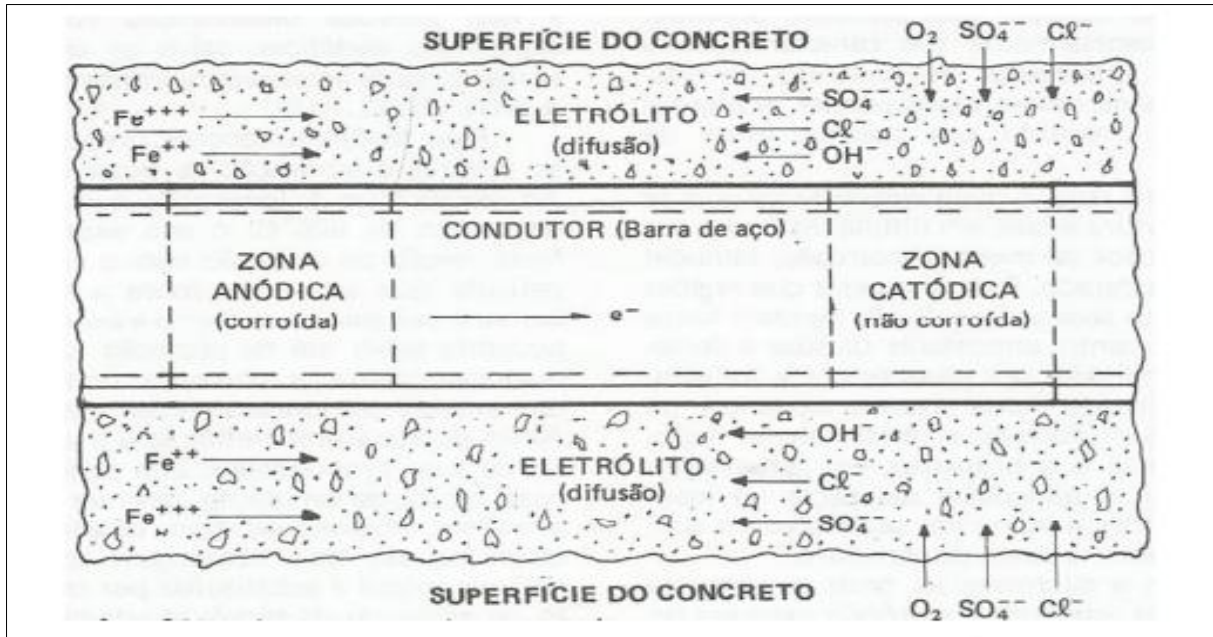
De acordo com Du e Jin (2014), o concreto, quando exposto a ciclos úmidos e secos, tem condutividade suficiente para servir como eletrólito. As reações anódicas e catódicas são necessárias para que o processo de corrosão ocorra e elas precisam ocorrer simultaneamente. O ânodo e o cátodo podem estar localizados ao lado de cada ou pode ser separado. Quando eles estão localizados imediatamente

próximos uns dos outros, ou seja, em uma escala microscópica, a célula de corrosão resultante é referida como uma microcélula. Quando eles são separados por algumas distâncias finitas, a célula de corrosão resultante é chamada de macrocélula. A corrosão das barras de reforço de aço embutidas no concreto pode ser devido a uma combinação de microcélulas e macrocélulas.

A iniciação e continuação do processo de corrosão são controladas pelo meio ambiente no concreto em torno das barras de reforço de aço. A distribuição de cloretos em um convés de ponte de concreto é não uniforme. Os cloretos normalmente entram no concreto a partir da superfície superior. O tapete superior de reforço do aço é então exposto a maiores concentrações de cloretos. Os cloretos deslocam o potencial do topo  $t$  para um valor mais negativo (anódico). Já que o potencial do tapete de fundo tem um efeito mais positivo (valor catódico), a diferença resultante em potenciais configura um tipo galvânico de célula de corrosão na macrocélula. Um circuito elétrico é estabelecido (DYER, 2015).

Para Gentil (2011), o concreto serve como eletrólito e arames de metal suportes de cadeira, e barras de aço servem como condutores metálicos. Da mesma forma, a concentração de cloretos no tapete superior não é uniforme ao longo do comprimento das barras de aço devido à heterogeneidade da aplicação de degelo concreto e desigual. Estas diferenças nas concentrações de cloreto estabelecem ânodos e cátodos em barras de aço individuais no tapete superior e resultam na formação de microcélulas, conforme ilustra figura 2.

Figura 2: Célula de corrosão em concreto armado.



Fonte: Helene (apud Marques, 2015, p. 24).

O concreto é alcalino devido à presença de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{KOH}$  e  $\text{NaOH}$  e tem uma alcalinidade tipicamente entre pH 12 e 13. A solução de poro de concreto consiste principalmente de  $\text{KOH}$  e  $\text{NaOH}$ . Devido à alta alcalinidade do concreto, as barras de reforço de aço são passivadas por um filme de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que protege o aço. O próprio filme de óxido é um produto da corrosão inicial da barra de reforço de aço. Nos estágios iniciais de corrosão, um composto de hidróxido ferroso ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) é formado. O hidróxido ferroso possui baixa solubilidade e, na presença de oxigênio e água, é oxidado a óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) para formar o filme de passivação. Como o filme está sendo formado, a taxa de difusão de oxigênio é reduzida, o que, por sua vez, reduz a taxa de corrosão (RIBEIRO, 2018; GRAEFF, 2007).

Conforme menciona Ribeiro (2018), para que ocorra corrosão, a barra de reforço de aço precisa ser despassivada. Oxigênio, água e um íon agressivo, como o cloreto, precisa estar disponível, e o concreto precisa ter baixa resistividade. Além disso, todas as condições precisam estar presentes simultaneamente. No entanto, a intrusão de íons cloreto é o fator mais importante na corrosão do reforço de aço das barras embutidas em concreto.

Segundo Han et al. (2016), possíveis fontes de cloretos incluem: Agregados, Mistura de água, Aditivos (em particular, aceleradores), Degelo e a água do mar. O teor de cloreto do cimento Portland, cinzas volantes e sílica ativa é tipicamente muito

baixo. No entanto, o teor de cloreto de escória granulada de alto forno é variável e depende da água utilizada no processo de extinção. O teor de cloreto pode ser significativamente alto se for utilizada água salgada. Os agregados podem conter cloretos, especialmente se forem obtidos de locais associados à água do mar ou com água subterrânea contendo cloretos. Dependendo da quantidade de cloretos presentes nos agregados e as proporções de mistura, é possível produzir um concreto que já tem uma concentração de cloreto no limite ou acima do início da corrosão.

A água potável pode conter pequenas quantidades de cloretos (20 a 100 ppm). Esta quantidade de cloretos é geralmente considerada insignificante. Quando usado em concretos com proporções típicas de mistura, o concreto resultante tem uma concentração de cloreto muito inferior ao limite. Além de misturas à base de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), alguns redutores de água e adição de misturas contêm cloretos. O montante é considerado insignificante se o teor de cloreto for inferior a 0,01 por cento em massa do material cimentício. A utilização de misturas deve ser avaliada caso a caso para quaisquer impactos no processo de corrosão (RIBEIRO, 2018).

Formiato de cálcio, tiocianato de sódio, cálcio nitrato e nitrito de cálcio são os produtos químicos comumente usados. O nitrito de cálcio demonstrou ser um inibidor de corrosão eficaz para o aço incorporado no concreto. Aceleradores sem cloreto não devem ser assumido como não corrosivo. O tiocianato de sódio em altas taxas de dosagem tem sido relatado como corrosão. O processo pelo qual barras de reforço de aço são despassivadas não é totalmente compreendido. Várias teorias foram apresentadas para explicar o papel dos íons cloreto. Os íons de cloreto atingem o aço de reforço penetrando o concreto através da pressão da água e através das rachaduras no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

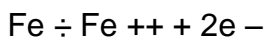
Na teoria do filme de óxido, os íons de cloreto quebram o filme de óxido passivo. Neste ponto, a barra de reforço de aço torna-se despassivada e a corrosão pode ser iniciada. Na teoria da adsorção, os íons de cloreto são adsorvidos na superfície da barra de reforço de aço e atacam o aço diretamente. Na teoria complexa transitória, íons cloreto atuam como catalisadores. Os íons de cloreto se combinam com os íons ferrosos para formar um ferro solúvel complexo de cloreto que se difunde do ânodo. Quebra subsequente do cloreto de ferro no complexo libera os íons cloreto para reutilização quando o hidróxido ferroso é formado (MIN et

al., 2017).

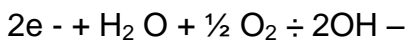
Quando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) penetra no concreto e se dissolve na solução de poros, o ácido carbônico é formado. Este ácido reage com o álcali no cimento para formar carbonatos e para baixar o pH do concreto. Quando a alcalinidade atinge um nível baixo o suficiente, a barra de reforço de aço torna-se despassivada e, na presença de água e oxigênio suficientes, a corrosão é iniciada e prossegue. No entanto, a carbonatação avança muito lentamente no concreto sadio e geralmente não é um fator (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Ribeiro (2018), a corrosão do aço no concreto na presença de oxigênio, mas sem cloretos, ocorre em várias etapas:

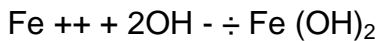
1 - No ânodo, o ferro é oxidado para o estado ferroso e libera elétrons.



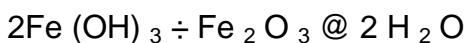
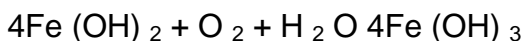
2 - Esses elétrons migram para o cátodo, onde se combinam com água e oxigênio para formar íons hidroxila.



3 - Os íons hidroxila se combinam com os íons ferrosos para formar o hidróxido ferroso.

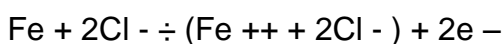


4 - Na presença de água e oxigênio, o hidróxido ferroso é ainda oxidado para formar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

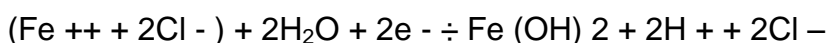


A corrosão do aço no concreto na presença de cloretos, mas sem oxigênio (no ânodo), leva a várias etapas:

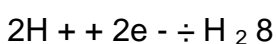
1 - No ânodo, o ferro reage com íons cloreto para formar um cloreto de ferro solúvel intermediário. complexo.



2 - Quando o complexo de cloreto de ferro se difunde da barra para uma área com pH mais alto e concentração de oxigênio, ele reage com íons hidroxila para formar  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . Este complexo reage com água para formar hidróxido ferroso.

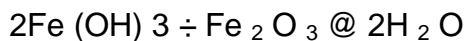
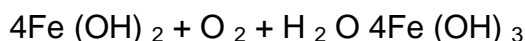


3 - Os íons de hidrogênio se combinam com os elétrons para formar gás hidrogênio.





4 - Como no caso da corrosão do aço sem cloretos, o hidróxido ferroso, na presença de água e oxigênio, é ainda oxidado para formar  $Fe_2O_3$ .



Os produtos de corrosão resultantes da corrosão das barras de reforço de aço ocupam um volume igual a três a seis vezes a do aço original. Esse aumento no volume induz tensões no concreto que resultam em rachaduras, delaminações e lascas. Isso acelera o processo de corrosão, fornecendo um caminho para a água e cloretos para alcançar o aço.

Existem dois tipos principais de conteúdo de cloreto que são testados e relatados - cloretos solúveis em ácido, às vezes referido como cloretos totais e cloretos solúveis em água. Cloretos solúveis em ácido são os cloretos extraídos de uma amostra de concreto usando um ácido. Os cloretos solúveis em água são aqueles cloretos presentes que pode dissolver em água. A quantidade de cloretos solúveis em água é menor do que o total ou quantidade solúvel de cloretos presentes em uma amostra concreta (NGUYEN, BARY, DE LARRARD, 2015).

A concentração mínima de íon cloreto necessária para iniciar a corrosão das barras de reforço de aço também é chamado o limiar de cloreto de corrosão. Embora o conceito de um limiar de cloreto seja geralmente aceita, há pouco acordo sobre qual é o valor limite. Vários fatores influenciam o valor limiar do cloreto: a composição do concreto (resistividade), a quantidade de umidade presente, e as condições atmosféricas (temperatura e umidade). A concentração limiar depende do nível de pH e concentração de oxigênio. Quando os cloretos são distribuídos uniformemente, maiores concentrações são necessárias para iniciar a corrosão. A quantidade de aluminato tricálcico (C 3 A) presente no cimento influencia o nível do limiar. Independentemente de qual concentração de íons cloreto é necessária para iniciar a corrosão, um aumento na concentração de íons cloreto aumenta a probabilidade de que a corrosão das barras de reforço de aço ocorrerão (RIBEIRO, 2018).

Em geral, a concentração de íons cloreto precisa ser maior que 0,71 kg / m<sup>3</sup> (1,2 lb / yd<sup>3</sup>). O valor de íons cloreto para íons hidroxila também precisa ser maior que 0,6. (5) No entanto, a corrosão do aço das barras de reforço embutidas no concreto é um processo complexo. O uso de um único valor ou critério para um limiar de cloreto pode não ser apropriado ou preciso (DYER, 2015).

Sempre que uma diferença nos potenciais em uma superfície metálica ou entre dois metais é estabelecida, a corrosão é iniciada. Essa diferença de potencial é referida como a força motriz. Uma área na superfície do metal ou um dos metais exibe comportamento anódico e os outros exibem comportamentos catódicos. As diferenças potenciais podem ser devidas a variações na composição do metal ou no ambiente em torno do metal. Variações no ambiente podem ser devidas a diferenças de pH, concentração de oxigênio, concentração de cloreto, umidade ou temperatura. Quando a célula de corrosão é criada como resultado de diferenças na concentração de oxigênio, cloreto ou água, a célula é referida como uma célula de concentração.

Os quatro estágios da deterioração induzida por cloreto do concreto armado são, de acordo com Ribeiro (2018) e Mehta e Monteiro (2014):

1 - Contaminação de cloretos e início de corrosão.

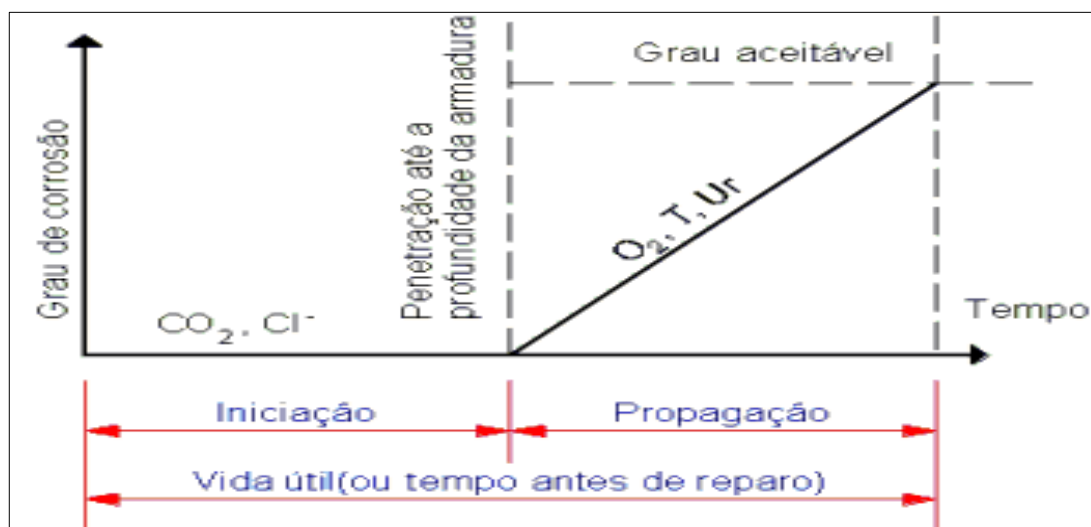
2 - Craqueamento: Ocorre quando as tensões de tração induzidas por corrosão excedem a resistência à tração do concreto (pode ser inclinado ou paralelo à superfície da estrada).

3 – Delaminação: Ocorre quando as rachaduras são paralelas à superfície da estrada e resulta em uma plano de fratura (muitas vezes no nível do vergalhão).

4 – Escamação: Quando rachaduras inclinadas atingem a superfície da estrada, ciclos de congelamento e descongelamento e tráfego no carregamento causa o rompimento das porções delaminadas (acelera a corrosão processo).

Um modelo simples para a corrosão do aço no concreto é mostrado na figura 3.

Figura 3: Modelo de deterioração simples, corrosão do aço no concreto.



Fonte: <http://faq.altoqi.com.br/content/277/680/pt-br/vida-%C3%BAtil-das-estruturas-de-concreto.html>

Este modelo de vida útil para estruturas de concreto armado tem duas etapas - iniciação e propagação. Este modelo mostra o tempo à iniciação da corrosão e a subsequente taxa de deterioração. Algumas estruturas foram encontradas para seguir este modelo com razoável precisão. O tempo de iniciação é o período de tempo até a despassivação das barras de reforço de aço e o início da corrosão ocorrer. A taxa de corrosão é controlada por cinética do processo de corrosão e pode aumentar ou diminuir. Em algum momento, ocorrem rachaduras e lascamento e a estrutura é reabilitada ou chegou ao final de sua vida útil e é substituída. De vários fatores importantes são necessários para quantificar a taxa de deterioração: perfil de cloreto, profundidade de carbonatação, taxa de corrosão, resistividade do concreto e ambiente (PAUL; ZIJL, 2016).

A quantidade de perda de seção após o início da corrosão pode ser estimada usando a Lei de Faraday. O equivalente eletroquímico é obtido pela conversão da densidade de corrente de corrosão em perda de metal. A densidade de corrente de corrosão de  $1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  é equivalente a uma perda de metal de  $12 \mu\text{m} / \text{ano}$  ( $0,5 \text{ mils} / \text{ano}$ ). Isto é geralmente considerada uma taxa alta e é provável que cause rachaduras e fragmentação dentro de 1 ano. Testes de laboratório mostraram que uma perda de metal de  $15$  a  $40 \mu\text{m}$  ( $0,6$  a  $1,6 \text{ mil}$ ) resultou em rachadura em amostras contendo vergalhões com uma relação de cobertura para diâmetro entre 2 e 4. Isto é equivalente a uma densidade de corrente de  $0,5 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  (DYER, 2015).

Conforme ensina Ribeiro (2018), os três principais fenômenos de taxa que controlam a deterioração induzida por corrosão de concreto armado são as taxas de difusão, corrosão e deterioração dos cloretos. A difusão da taxa de cloreto taxa na qual os íons de cloreto se difundem através da cobertura de concreto. A taxa de corrosão é a taxa em que o processo de corrosão progride após a despassivação que ocorre do aço das barras de reforço. A taxa de deterioração é a taxa na qual as patologias do concreto (rachaduras, delaminação e fragmentação) progridem. A taxa de deterioração determinará o período de tempo que é necessário reparar ou substituir um componente de concreto deteriorado.

## **2 FATORES QUE INFLUENCIAM A TAXA DE DIFUSÃO DE CLORO**

Para Mehta e Monteiro (2014), o principal fator que controla a difusão de íons cloreto no concreto é a permeabilidade do concreto. A permeabilidade do concreto

pode ser reduzida por:

- Redução da relação água-cimento do concreto.
- Adicionando materiais pozolânicos e pozolânicos/cimentícios ao concreto.
- Adicionando modificadores de polímero ao concreto.
- Gradação agregada

Alguns outros fatores que influenciam a difusão de íons cloreto no concreto incluem:

- Carga superficial na pasta de cimento hidratada.
- Formação de zonas de transição porosas na interface agregado/pasta de cimento.
- Micro rachaduras.

Para os autores supramencionados, um aumento no microfissuramento pode aumentar a taxa de permeabilidade ao íon cloreto para estruturas submetidas para cargas cíclicas. Tensões de compressão estática não parecem ter efeito significativo sobre o cloreto e a permeabilidade iônica. No entanto, o concreto exibe um aumento significativo na permeabilidade quando carregado com cargas compressivas cíclicas que são 60 a 80 por cento de sua resistência final. A taxa de íon cloreto na permeabilidade aumenta à medida que a resistência residual diminui. A predição/cálculo da penetração de cloretos no concreto é geralmente feita usando a Lei. No entanto, a aplicação da Segunda Lei de Fick para prever a penetração de cloretos produz resultados que são muito conservadores. Isto é principalmente devido à descrição do concreto como um meio homogêneo para modelar o transporte de íons dissolvidos (isto é, é um modelo muito simples e não é devido a qualquer problema com a lei de Fick). Além disso, a previsão da penetração do íon cloreto usando a difusividade pode ser incerta como a suposição de uma difusividade de íon de cloreto constante é raramente vista em estruturas reais.

### **3 FATORES QUE INFLUENCIAM A TAXA DE CORROSÃO**

Quando uma quantidade suficiente de cloretos atinge as barras de reforço de aço para despassivar as barras e iniciar corrosão, fatores que influenciam a taxa de corrosão de barras de aço reforçadas embutidas no concreto incluem, segundo Ribeiro (2018):

- Disponibilidade de água e oxigênio.

- Relação entre a área da superfície do aço no anodo e a do cátodo.
- Resistividade do concreto.
- Temperatura.
- Umidade relativa (interna e externa).
- Microestrutura do concreto.

A disponibilidade de oxigênio é uma função de sua taxa de difusão através do concreto, que é afetado por quão saturado é o concreto com a água. Quando totalmente submersa, a taxa de difusão é reduzida porque o oxigênio deve se difundir pela água. Quando o concreto está seco, o oxigênio pode se mover livremente através dos poros. Ciclos alternados de água aceleram o processo de corrosão. Concreto molhado tem uma baixa resistividade do que o concreto seco devido à presença de água como eletrólito.

Quando a relação entre a área no catodo e a área no ânodo aumenta, a densidade de corrente no ânodo aumenta. A densidade de corrente é a quantidade de corrente elétrica que passa por uma área de unidade no ânodo. Um aumento na densidade de corrente resulta em um aumento na taxa de corrosão.

Outros parâmetros químicos de poros que podem influenciar a taxa de corrosão e a natureza do produtos de corrosão resultantes incluem, conforme Dyer (2015):

- Força iônica.
- pH.
- Potencial redox.
- Composição de cátions.

A força iônica afeta a troca iônica entre a solução de poros e as fases de hidrato de cimento. Quando o pH está entre 12,4 e 13,5, as soluções de poros têm forças iônicas razoavelmente altas. O potencial redox determina o estado de oxidação para aqueles elementos com múltiplas valências. No cimento Portland as soluções de poros de concreto são geralmente oxidantes (potencial redox positivo), exceto quando escória de alto-forno é adicionada. Os cátions dominantes em soluções portáteis de cimento portland são sódio e potássio. O teor de cálcio é significativamente menor. Isso inclui cimentos com escória, sílica ativa e cinzas volantes adicionadas. A concentração de álcali nas soluções de água para aspersão geralmente não é afetada pelos agregados. No entanto, os agregados reativos a

álcalis podem afetar a concentração de álcali quando a reação remove álcalis da solução de poros (RIBEIRO, 2018; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O parâmetro de cloreto importante é a quantidade de íons de cloreto livre no poreral. Uma suficiente quantidade de cloretos de fontes externas pode sobrecarregar quaisquer benefícios derivados da ligação (alto teor de  $C_3A$  no cimento) e quaisquer efeitos que a química de poros tenha no processo de corrosão.

Um aumento no teor de cloreto aumenta a quantidade de cloretos livres. Um alto nível de cloretos livres, juntamente com uma alta relação  $Cl^- / OH^-$ , leva a altas correntes de corrosão, que, por sua vez, resultam em altas taxas de corrosão.

Polito (2006) destaca que os fatores que influenciam a condutividade iônica / resistividade do concreto incluem:

- Umidade relativa interna.
- Quantidade de água livre.
- Quantidade de porosidade conectada na pasta de cimento.

Santos Filho (2010) aponta que uma umidade relativa interna de 70 a 80 por cento é essencial para manter a atividade de corrosão. Abaixo disso o nível de umidade relativa, a corrosão ativa não ocorre. O limite varia com o tipo de concreto e as condições ambientais.

Quando a água livre evapora, a condutividade elétrica diminui para um nível baixo. Um alto conteúdo de poros e a presença de sais eletrolíticos leva a uma menor resistividade. A baixa resistividade geralmente aumenta a atividade de corrosão. Os fatores controladores na quantidade de porosidade conectada são a relação água-cimento e o uso de aditivos minerais. Os concretos densos têm maior resistividade e inibem o transporte iônico (ou seja, baixas correntes de corrosão) (TAVARES, 2006).

Concretos menos densos têm menor resistividade e não inibem o transporte iônico (ou seja, eles têm maiores correntes de corrosão). Isto é particularmente importante quando as correntes de corrosão são entre duas camadas de barras de reforço de aço (ou seja, corrosão macrocélula). A natureza heterogênea do concreto, juntamente com a distribuição não uniforme de cloretos, resulta em descascificação localizada e corrosão (micro e macro) das barras de reforço de aço. A corrosão é não uniforme em toda a superfície das barras de reforço de aço (DUGATO, 2006).

#### 4 MEDIDAS DE CONTROLE DE CORROSÃO

Conforme Ribeiro (2006), a deterioração induzida pela corrosão de estruturas de concreto armado ocorre quando o carregamento na estrutura é maior que a capacidade da estrutura de resistir ao carregamento ambiental (resistência ambiental). Pode-se diminuir o carregamento ou aumentar a resistência ou fazer um combinação de ambos. Os principais mecanismos de deterioração (corrosão induzida por cloreto do vergalhão) no reforço e sua proteção.

Mehta e Monteiro (2014) ensinam que a corrosão também pode ocorrer como resultado de outros processos de deterioração: reações, deflexões excessivas, fadiga, etc. Esses processos fazem com que o concreto rache, subsequentemente permite que água e cloretos tenham fácil acesso ao interior do concreto e do aço das barras de reforço. Esses outros mecanismos de deterioração criam condições mais propícias à corrosão das barras de reforço de aço embutido, o que leva a uma maior deterioração do concreto.

Os fatores que influenciam a corrosão das armaduras de aço embutidas no concreto são a quantidade de íons cloreto ao nível do aço, a resistividade do concreto, temperatura, umidade relativa (ambos interno e externo), e a microestrutura concreta. Em geral, controlando esses fatores para um nível aceitável, a corrosão das barras de reforço de aço e a deterioração do concreto resultante podem ser minimizados. Este é o primeiro passo na maioria das estratégias de controle de corrosão, além de outros sistemas de proteção contra corrosão.

Possan (2010) em seus estudos indica que os métodos ou sistemas de controle de corrosão são classificados como mecânicos ou eletroquímica.

Métodos mecânicos são barreiras físicas que impedem ou retardam a entrada de cloretos, oxigênio e umidade através da cobertura de concreto para o aço de reforço. Incluem misturas, selantes e membranas, sobreposições e revestimentos em barras de reforço de aço. Seladores e membranas feitas com materiais como resinas, epóxis, emulsões, etc. são usados para reduzir o ingresso de espécies nocivas. Existem preocupações quanto à sua eficácia e durabilidade devido à abrasão dos selantes aplicados ou à quebra das membranas instaladas.

Ribeiro (2018) menciona que o cimento Portland, concreto denso de baixo rebaixamento, concreto modificado com látex, concreto modificado com fumos de

sílica, e sobreposições de concreto polimérico são comumente usados. Os revestimentos usados nas barras de reforço de aço são orgânicos ou metálicos. Os revestimentos orgânicos incluem os revestimentos epoxi não metálicos ligados por fusão. Os revestimentos metálicos incluem materiais como níquel, aço inoxidável e zinco. Os revestimentos de níquel e aço inoxidável protegem o aço por ser um sistema de barreira e mais nobre, ou seja, tem um potencial menor do que o ferro para corroer. O revestimento de zinco protege o aço sendo sacrificial ou mais ativo (isto é, tem um potencial maior do que o ferro para corroer).

Para Dyer (2015), materiais resistentes à corrosão incluem aços inoxidáveis austeníticos e reforçados com vergalhões de fibras de polímero. Os métodos eletroquímicos forçam as barras de reforço de aço a serem catódicas. Eles incluem extração de cloreto e proteção catódica. A extração de íon cloreto e a proteção catódica são tipicamente usadas na reabilitação de estruturas de concreto armado e não como uma medida de controle de corrosão para construção.

Existem três categorias de variáveis, segundo Gentil (2011), que influenciam o processo de corrosão e a extensão da deterioração induzida por corrosão de elementos de concreto armado e protendido - material, projeto e variáveis ambientais. Variáveis materiais para fabricação de concreto durável incluem o tipo de cimento, misturas, tipo agregado e graduação, e a relação água-cimento. Variáveis de design incluem a profundidade da cobertura de concreto, propriedades físicas do concreto endurecido, o tamanho e espaçamento do aço nas barras de reforço, e a eficiência da drenagem da estrutura. As variáveis ambientais incluem a fonte de íões cloreto; extremos de temperatura; ciclos de água; umidade relativa; e, para uma certa extensão, aplicada carga ao vivo.

Embora pouco possa ser feito para controlar as variáveis ambientais, as variáveis de material e design podem ser ajustados para construir estruturas de concreto duráveis que possam resistir à deterioração induzida pela corrosão em ambientes propícios para a iniciação e sustentação do processo de corrosão.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O concreto é um material de construção com muitos atributos e desvantagens que devem ser cuidadosamente projetadas para uma boa construção. Alguns concretos defeituosos podem ser atribuídos à adição de aço de reforço, uma vez



que a corrosão do aço embutido é uma das causas mais frequentes de danos ao concreto. O concreto é altamente alcalino com resistência elétrica, o que dá ao aço embutido alguma proteção contra corrosão.

No presente estudo, investigou-se que a durabilidade da estrutura de concreto está intrinsicamente associada às devidas propriedades do projeto e o nível de sua qualidade.

Apurou-se que a agressividade ambiental é um dos principais fatores para a corrosão e que comprometem a durabilidade da estrutura. Evidenciou-se também que a conservação das estruturas de concreto armado tem sido reduzida por ações de deterioração, em especial no que concerne à corrosão de armaduras.

Embora a recuperação de estruturas submetidas à corrosão do concreto e de suas armaduras seja muito oneroso, isso previne e evita que acidentes possam ocorrer.

Sugere-se que mais estudos possam ser realizados no intuito de ampliar a discussão e apresentar-se outras técnicas e métodos para reduzir essa problemática, a fim de agregar redução de custos aos projetos.

## REFERÊNCIAS

BHARGAVA, K.; GHOSH, A.; MORI, Y.; RAMANUJAM, S. Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 35, n. 11, p. 2203–2218, 2005.

DU, X.; JIN, L. Meso-scale numerical investigation on cracking of cover concrete induced by corrosion of reinforcing steel. **Engineering Failure Analysis**, Elsevier, v. 39, p. 21–33, 2014.

DUGATO, F. L. **Corrosão de Estrutura de Concreto - Estudo de Caso**. 2006. Monografia (Graduação, trabalho de conclusão de curso). União Dinâmica de Faculdades Cataratas - UDC. Foz do Iguaçu, Paraná, 2006.

DYER, T. **A durabilidade do concreto**. [S.l.]: Editora Ciência Moderna Ltda., Rio de Janeiro, 2015.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. Ed. Rio de Janeiro: Editora LCT, 2011.

GRAEFF, A. G. Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

HAN, J.; LIU, W.; WANG, S.; DU, D.; XU, F.; LI, W.; SCHUTTER, G. D. Effects of crack and itz and aggregate on carbonation penetration based on 3d micro x-ray ct microstructure evolution. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 256–271, 2016.

LIMA-COELHO, S. et al. Inibidores de corrosão do concreto: estudo prospectivo. **Cad. Prospec.**, Salvador, v. 8, n. 3, p. 495-501, jul./set. 2015.

MARQUES, V. S. **Recuperação de estruturas submetidas à corrosão de armaduras: definição das variáveis que interferem no custo**. Projeto de Pesquisa (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/138345/000989636.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014.

NGUYEN, T. T. H.; BARY, B.; DE LARRARD, T. Coupled carbonation-rust formation-damage modeling and simulation of steel corrosion in 3d mesoscale reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 74, p. 95–107, 2015.

PAUL, S. C.; ZIJL, G. P. A. G. V. Chloride-induced corrosion modelling of cracked reinforced shcc. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, Elsevier, v. 16, n. 4, p. 734–742, 2016.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. Belo Horizonte. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

RIBEIRO, D. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto**. 2. Ed. São Paulo: Elsevier, 2018.

SANTOS FILHO, M. M. **Investigação da potencialidade de um biopolímero como inibidor de corrosão do aço carbono em meio alcalino**. Monografia de Qualificação de Doutorado (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2010.

TAVARES, L. M. **Estudo do processo de corrosão por íons cloreto no concreto armado utilizando armaduras comuns e galvanizadas**. 2006. Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, agosto de 2006.