https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.056

Congresso Brasileiro de Patologia das Construções

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Andréia de Paula de [1,*];
*paula_adp@yahoo.com.br

[1] Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

RESUMO

A corrosão das armaduras é uma das principais causas de deterioração das estruturas de concreto armado, afetando consideravelmente sua durabilidade e confiabilidade. As estruturas de concreto armado quando sujeitas a corrosão de armaduras diminuem a sua vida útil com consequências negativas na estabilidade, estética e nos custos de manutenção. A redução da vida útil das edificações se dá devido à interação do concreto com o meio ambiente. A corrosão, na maioria das vezes acontece por conta da ação ofensiva dos íons cloreto (Cl^-) e do dióxido de carbono (CO_2), na presença de água que é um elemento muito importante quando falamos dos mecanismos de deterioração do concreto, uma vez que a corrosão das armaduras é dependente da presença de água, tanto na fase de iniciação quanto na fase de propagação. O presente trabalho traz uma revisão bibliográfica sobre os processos corrosivos em estruturas de concreto armado, trazendo uma avaliação de um dos problemas mais comuns nas edificações, através de uma explanação sobre o tema e apresentando métodos de controle da corrosão, a fim de prolongar a vida útil das edificações. Traz ao final, alguns trabalhos relevantes sobre o tema, a fim de proporcionar uma fonte de pesquisa para novos trablahos.
Palavras-chave: corrosão, carbonatação, posoridade, armadura.

ABSTRACT

Corrosion of reinforcement is one of the main causes of deterioration of reinforced concrete structures, considerably affecting their durability and reliability. Reinforced concrete structures, when subjected to reinforcement corrosion, reduce their useful life with negative consequences on stability, aesthetics and maintenance costs. The reduction in the useful life of buildings is due to the interaction of concrete with the environment. Corrosion most often happens due to the offensive action of chloride ions (Cl-) and carbon dioxide (CO2), in the presence of water, which is a very important element when we talk about the deterioration mechanisms of concrete, since that the corrosion of reinforcement is dependent on the presence of water, both in the initiation phase and in the propagation phase. The present work presents a bibliographic review on the corrosive processes in reinforced concrete structures, bringing an evaluation of one of the most common problems in buildings, through an explanation on the subject and presenting methods of corrosion control, in order to prolong the life useful for buildings. It brings at the end, some relevant works on the subject, in order to provide a source of research for new works.
Keywords: corrosion, carbonation, porosity, reinforcement.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão do aço no concreto tem sido identificada como uma das principais causas de deterioração em estruturas de concreto armado (REVERT et al, 2018), e muitos recursos são gastos na manutenção, reparação e reabilitação de estruturas de concreto armado danificadas por corrosão. (OTIENO et al, 2019). À medida que a corrosão das armaduras se inicia e se propaga, a expansão volumétrica dos produtos de corrosão gradualmente exerce pressão interna sobre o

concreto circundante, causando fissuras longitudinais e até mesmo fragmentação do recobrimento do concreto. A partir daí, a corrosão das armaduras pode ser acelerada devido ao acesso mais fácil de agentes agressivos, resultando em falha prematura e menor vida útil das estruturas de concreto armado (ZHANG et al, 2019).

Segundo Freire (2005), diversos fatores podem ser apontados como responsáveis pela ocorrência da corrosão nas estruturas de concreto armado, como: deficiências de projeto, espessura de cobrimento insuficiente, especificações e características inadequadas do concreto e de seus materiais constituintes, falhas de execução e manutenção e a ação agressiva do meio ambiente na qual a estrutura está inserida.

A corrosão das armaduras depende da presença de umidade, seja na fase de iniciação ou na fase de propagação. Na fase de iniciação, a influência da presença de água, ou do transporte da mesma, se dá pelo ingresso de cloretos, uma vez que a água é veículo de transporte dos mesmos, seja por difusão, absorção, migração iônica, ou permeabilidade. Já na fase de propagação, o teor de água é fator determinante na velocidade da corrosão, uma vez que afeta a resistividade do meio e a respectiva mobilidade iônica, repercutindo essa influência na intensidade de corrosão.

2. CORROSÃO DE ARMADURAS

A corrosão das armaduras é um processo físico-químico que gera óxidos e hidróxidos de ferro, chamados de produtos de corrosão, que ocupam um volume superior ao volume original das barras metálicas. Segundo Dodds et al (2017) a propagação da corrosão gera tensões, pois o produto de corrosão produzido é volumoso, o que acaba por levar à fissuração, delaminação e consequente fragmentação do revestimento protetor de concreto.

Esses fatores levam a uma perda de seção transversal e de aderência entre a armadura e o concreto, podendo levar a estrutura ao colapso. A corrosão nos metais pode ocorrer de duas formas: corrosão química (oxidação) e corrosão eletroquímica. A oxidação se dá por uma reação gás/sólido na superfície do material que origina um filme delgado de produtos de corrosão na superfície do metal. A corrosão eletroquímica, é observada nas estruturas de concreto armado e tem natureza expansiva, podendo acarretar uma diminuição da vida útil da estrutura.

A vida útil das estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão é caracterizada por duas fases principais – iniciação e propagação. Este modelo clássico de vida útil das armaduras das estruturas de concreto foi proposto por Tuutti em 1982. O período de iniciação é o intervalo de tempo necessário para que os diversos agentes agressivos penetrem através do cobrimento do concreto até atingir a armadura. Quando uma certa quantidade desses agentes agressivos chega até as barras de aço provocam a despassivação das mesmas, ou seja, ocorre a quebra da camada de proteção de $\gamma - Fe_2O_3$ existente. Ocorrida a despassivação, o processo corrosivo começa a se instalar dando início a fase de propagação, onde ocorre a dissolução do ferro (oxidação), gerando os produtos de corrosão.

Para Otieno et al (2019), as duas principais causas da corrosão do aço no concreto foram identificadas como carbonatação e ingresso de cloretos, dos quais a corrosão induzida por cloretos é conhecida por ser mais perniciosa do que a corrosão induzida por carbonatação.

2.1 Corrosão de armaduras devido a carbonatação do concreto

De acordo com Soldado et al (2021) a corrosão induzida pela carbonatação afeta todas as estruturas de forma contínua ou cíclica com diferentes condições sazonais de exposição ambiental e, em geral, 2/3 do concreto estrutural está exposto a essas condições.

Devido às diferentes concentrações de dióxido de carbono entre o concreto e o ambiente exposto, o dióxido de carbono se difunde pela rede capilar e é dissolvido na água presente nos poros, formando ácido carbônico, que reage com os álcalis (hidróxido de cálcio) e forma carbonatos de cálcio , reduzindo a alcalinidade e a porosidade total do concreto. (SHAH E BISHNOI, 2018)

A armadura se encontra protegida da corrosão devido a alta alcalinidade do concreto (pH ≥12,7), o que favorece a formação de uma película passivadora, compacta e aderente sobre a superfície da armadura. Essa película aliada a um correto cobrimento da armadura, proporcionam ao concreto armado uma proteção eficaz contra os efeitos da corrosão. Porém, quando o concreto é exposto ao meio ambiente, inicia-se um contínuo processo de degradação, sendo o gás carbônico (CO2) o principal agente agressivo do concreto.

O gás carbônico (CO2), através das reações de carbonatação, diminui o pH do concreto a valores inferiores a nove, despassivando a armadura. O CO2, ao penetrar pelos poros, reage com os compostos hidratados do cimento suscetíveis a carbonatação, como, hidróxido de cálcio (Ca(OH)2), hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), assim como os silicatos alcalinos, diminuindo o pH do concreto.

De acordo com Zeng (2020) a carbonatação altera a resistência, a porosidade, a distribuição dos poros e a composição química dos materiais à base de cimento, provocando o encolhimento e a fissuração da matriz desses materiais, reduzindo a vida útil das estruturas de concreto, pois ocorre o consumo do Ca(OH)2 no concreto fazendo com que a armadura que está protegida pela camada de concreto, perca sua proteção e passe a sofrer corrosão.

Muitos fatores influenciam na carbonatação do concreto, dentre eles destacam-se a concentração de CO_2, a umidade relativa (UR) do ambiente, a composição química do cimento, a utilização de materias cimentícios suplementares, a relação a/c, o tempo de cura, entre outros.

2.2 Corrosão de armaduras devido a penetração de íons cloretos

A ação dos íons cloreto que migram para a matriz do concreto também afeta a durabilidade do concreto, causando maior risco de corrosão. Seu transporte ocorre predominantemente através da matriz cimentícia e depende da continuidade e da estrutura dos poros (DODDS et al, 2017). Quando a alta concentração de íons cloreto atinge o nível de armadura, a camada passiva de armadura de aço é destruída e, juntamente com o oxigênio e o ambiente eletrolítico do concreto, são asseguradas as condições para que a reação de corrosão ocorra. (SOLDADO et al, 2021).

No concreto o efeito desses íons agressivos deve-se a presença de íons cloro (Cl^-) reagindo com a água (H_2O) e formando acido clorídrico (HCl), o que causa a diminuição no pH do concreto em pontos discretos, resultando na quebra da película passivadora de óxido de ferro que reveste as armaduras de aço.

Para Glass et al (2000) e Dodds et al (2017) a corrosão induzida por cloreto é um processo eletroquímico e ocorre quando os íons cloreto penetram no revestimento do concreto e reagem com a película protetora passiva na superfície da armadura , resultando em sua despassivação.

Muitos fatores influenciam nos fenômenos de transporte e absorção dos cloretos no concreto, entre eles: dosagem, temperatura, umidade relativa, pH da solução dos poros, quantidade de C_3A do cimento, etc.

Os íons cloreto podem penetrar no concreto através de uma combinação de mecanismos de transporte, nomeadamente absorção por sucção capilar , difusão e permeação. Absorção por sucção capilar e difusão são os mecanismos dominantes que ocorrem em ambientes agressivos de cloreto, relacionados ao transporte de líquidos e íons por efeitos de tensão superficial nos capilares de materiais porosos e gradientes de concentração, respectivamente. (DODDS et al , 2017). Segundo Kropp et al (1995) a difusão é um processo muito mais lento, pois o movimento dos íons ocorre na solução dos poros.de concreto saturado, enquanto a absorção ocorre no estado seco ou semi-seco e é o mecanismo de transporte mais rápido.

2.2.2 Principais fatores que afetam a penetração de cloretos nas estruturas de concreto armado

2.2.2.1 Características Ambientais e Condições de Exposição

Segundo Neville (1997) na grande maioria dos processos de natureza química, a temperatura age aumentando a sua cinética. As variações de temperatura associadas aos ventos e a umidade do ambiente, causam tensões de retração que podem gerar fissuração nas peças estruturais facilitando a penetração dos agentes agressivos no interior do concreto. Alguns pesquisadores consideram que o coeficiente de difusão tende a diminuir com o aumento da temperatura de cura, pois as reações de hidratação são aceleradas. Outros pesquisadores acreditam que o aumento da temperatura leva a uma maior mobilidade iônica, aumentando assima penetração de agentes agressivos no concreto.

Para Perepérez et al (1987), a umidade relativa pode ser relacionada diretamente com a quantidade de água presente no interior do concreto, desde que o mesmo não esteja saturado. Esse água que se encontra no interior dos poros interfere no eletólito, afetando a difusão de gases e íons no concreto. Como o transporte de íons se dá em meio aquoso, o aumento da quantidade de água no concreto facilita a movimentação dos íons cloreto até que eles atinjam a armadura, causando sua despassivação.

As condições de exposição das estruturas de concreto armado variam de acordo com o ambiente onde estão inseridas. Para uma dada localização da estrutura, tem-se tipos diferentes de detrioração. De acordo com Helene (1993), a concentração de cloretos de um elemento de concreto armado é extremamente dependente de parâmetros relacionados ao concreto – tipo e quantidade de cimento, presença de adições, relação a/c, entre outros – e ao meio ambiente – concentração ambiental de cloretos, ciclos de molhagem/secagem, direção preferencial dos ventos, topografia local, entre outros.

2.2.2.2 Características do Concreto

Em se tratando dos mesmos materiais constituintes, quanto maior a resistência a compressão do concreto, melhor o seu desempenho em relação a penetração dos íons cloreto. Isso se deve a uma condição de menor porosidade associada com uma redução da relação a/c.

O tipo de cimento influencia na durabilidade dos concretos. Cimentos com maiores teores de C_3A e C_4AF apresentam uma maior capacidade de fixação de íons cloreto, reduzindo assim, a quantidade de cloretos livres na solução porosa. Cimentos que apresentam um melhor refinamento dos poros e teores mais elevados e C_3A apresentam uma maior proteção ao concreto.

Esse efeito protetor pode ser alcançado com a utilização de adições minerais ou, segundo a nova nomenclatura, de materiais cimentícios suplemenatares (SCM's). Segundo Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997), a inclusão de adições minerais minimizam sensivelmente a penetração de agentes agressivos no concreto. Isso ocorre devido a alguns fatores tais como a segmentação que ocorre nos poros maiores, ao aumento dos pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação e uma melhor densificação da interface agregado/pasta.

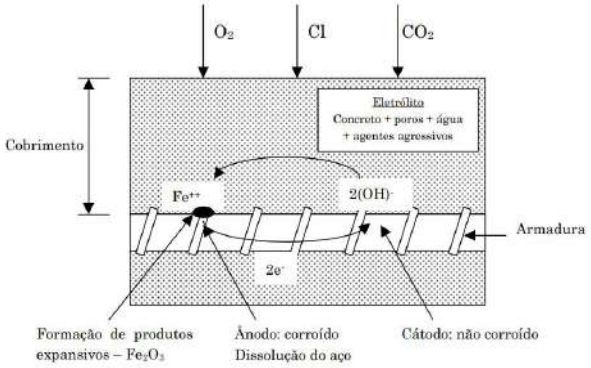
2.3 Princípios Eletroquímicos

O mecanissmo de corrosão eletroquímica, que ocorre em meio aquoso, se baseia num desequilíbrio elétrico entre metais diferentes ou entre partes distintas do mesmo metal, configurando a chamada pilha de corrosão ou célula e corrosão. A célula de corrosão é formada por uma zona anódica, onde ocorrem as reações de oxidação do ferro, com perda de elétrons e redução da masssa e por uma zona catódica, onde ocorre a redução do oxigêncio, não havendo perda de massa nesse trecho. (ANDRADE, 1998; FIGUEIREDO, 1994, GENTIL, 1996).

Para que haja a formação da pilha de corrosão, é necessário a existência de meios de transporte, para que os íons e os elétrons originários desse processo se movimentem entre as áreas anôdicas e catódicas. Normalmente, a transferência de elétrons ocorre através do metal e o transporte de íons através da solução.

As reações que ocorrem na pilha de corrosão podem ser observadas na Figura 1 a seguir e se dão da seguinte maneira: os íons hidróxila formados pela reação de oxidação na área catódica, deslocam-se através do eletólito para a área anódica, onde se combinam com os íons Fe^{++} disponíveis nesta região do metal, dando origem aos produtos de corrosão com formação do hidróxido de ferro. Reações similares ocorrem dando origem ao hidróxido de ferro expansivo e ao hidróxido de ferro hidratado.

Figura 1. Modelo da corrosão da armaduras no concreto



Fonte: Andrade (2001)

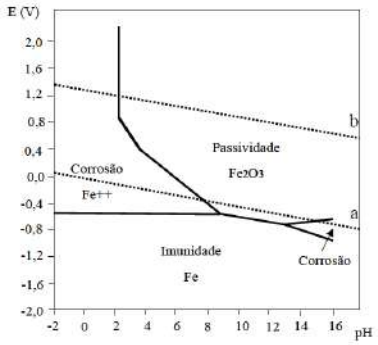
À medida que a corrosão vai se processando, os produtos expansivos vão se acumulando cada vez mais ao redor das armaduras, criando verdadeiras "crostas" no seu entorno. Tal fato produz esforços no concreto na direção radial das barras, os quais geram tensões de tração que culminam com a fissuração das peças de concreto.

2.4 Considerações termodinâmicas da corrosão de armaduras

Devido à elevada alcalinidade da solução aquosa do concreto, forma-se uma película passivante, supostamente de Fe_2O_3 e Fe_3O_4 sobre a superfície da armadura, que lhe confere proteção do

fenômeno da corrosão, e é a chamada proteção química. Estudos feitos pelo cientista Marcel Pourbaix, mostram que existia uma relação entre o potencial do eletrodo e o pH das soluções, para um sistema em equilíbrio. Pourbaix desenvolveu um método gráfico, que apresentava uma possibilidade de se prever condições as quais se tornavam mais favoráveis o aparecimento da corrosão. (DUTRA; NUNES, 2011, p.28), de acordo com a Figura 2.

Figura 2. Diagrama de POURBAIX: equilíbrio pH - Potencial para o ferro em água a 25°C



Fonte: Gentil (1987)

A região de imunidade corresponde à região onde a corrosão é termodinamicamente desfavorável, ou seja, o metal é estável. A região de passivação corresponde a uma região onde óxidos ou hidróxidos do metal são as fases estáveis. Na região de corrosão têm-se as combinações de pH e potencial que indicam que os íons de metal ou íons complexos são as fases estáveis. As linhas tracejadas (a e b) delimitam a zona onde a água é termodinamicamente estável. Abaixo da linha (a) ocorre redução do hidrogênio, enquanto acima da linha (b) tem-se a evolução de oxigênio (GENTIL, 1987).

2.5 Técnicas eletroquímicas para avaliação da corrosão

2.5.2 Resistência de Polarização (Rp)

A resistência de polarização é um método de ensaio para avaliar a corrosão da armadura, que representa a inércia que um sistema possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão, isto é, um processo de transferência de carga elétrica no metal, ante uma polarização imposta.

Sendo assim, quanto maior for a Rp, menos intensas serão as velocidades de corrosão encontradas. O valor de Rp é definido como o quociente entre os incrementos de potencial e a corrente. Após determinar a Rp, pode-se determinar a intensidade de corrosão (i_{corr}) atráves da equação de Stern-Geary, através do quociente entre a constante de Stern-Geary (B) e os valores de resistência de polarização multiplicada pela superfície exposta do metal.

Andrade (1988) e Gonzalez et al (1985), adotam a constante de Stern-Geary (B) um valor de 52mV para armaduras no estado passivo de corrosão e 26mV para armaduras em estado ativo de corrosão.

2.5.3 Potencial de Corrosão

Por se tratar de um método simples e de fácil aplicação, o potencial de corrosão é um dos métodos mais utilizados para monitorar as armaduras de concreto armado e verificar o comportamento da corrosão da armadura. De acordo com Al-Sodani et al (2018) os potenciais de corrosão fornecem uma indicação qualitativa do processo de corrosão, enquanto a informação quantitativa deve ser

determinada pela medição da densidade da corrente de corrosão. O potencial eletroquímico é uma medida da maior ou menor facilidade da transferência de carga elétrica entre o aço e a solução contida nos poros do concreto, em virtude da diferença de potencial.

2.6 Técnicas de prevenção da corrosão de armaduras

Projetar e executar as estruturas de concreto armado com o cobrimento adequado com vistas à agressividade ambiental é o método mais econômico e de maior eficácia na proteção da armadura. Em casos específicos, podem ser utilizados métodos complementares, sendo considerados os métodos aplicados sobre o concreto e sobre as armaduras (MEIRA, 2017). A seguir, são apresentadas alguamas técnicas de prevenção da corrosão.

Uma forma de previnir a corrosão é a utilização de inibidores de corrosão. Os inibidores são substâncias que, quando adicionadas a um meio corrosivo qualquer, nas concentrações adequadas, têm o objetivo de evitar, inibir ou retardar o desenvolvimento das reações de corrosão. Os inibidores de corrosão podem ser classificados em: anódicos, catódicos, formadores de filme, desaeradores (remoção de O2), neutralizantes e fase vapor.

Os inibidores retardam o progresso das reações eletroquímicas associadas à corrosão do reforço, inibindo as reações catódicas ou anódicas ou ambas, e são estudados por muitos autores. (AL-SODANI et al, 2018). A dosagem adequada de um inibidor de corrosão, juntamente com um concreto de boa qualidade, fornece proteção suficiente para armaduras de aço.

Meira (2017) distingue os inibidores que são aplicados no interior do concreto daqueles que têm sua aplicação na superfície do concreto endurecido. No primeiro caso, esse material é usado na prevenção do processo corrosivo, com utilização em estruturas situadas em ambientes de elevada agressividade ambiental. No segundo caso, os inibidores podem atuar de modo preventivo e também como tratamento corretivo, dependendo se já tiver iniciado o processo de corrosão ou não.

Outra maneira de se evitar a corrosão é através de tratamentos superficiais. A aplicação de material aderente e impermeável como revestimento na superfície do concreto é uma das técnicas mais utilizadas contra o processo de corrosão da armadura, sendo esse método utilizado com frequência no Brasil. O objetivo dessa técnica é atenuar ou impedir a entrada de agentes agressivos capazes de promover a corrosão da armadura, a exemplo da água, dos íons cloreto, do oxigênio e do gás carbônico (CO2). Dentre os materiais utilizados como revestimento no concreto estão as tintas orgânicas, como as tintas à base de resina epóxi, vinílica, poliuretana, acrílica, tintas asfálticas e betume.

Pode-se também utilizar a proteção catódica. Essa técnica pode ser utilizada como meio de reparação e de prevenção da corrosão em estruturas de concreto armado. Como método de reparação, seu objetivo é controlar o processo corrosivo em curso e retornar às condições passivas da estrutura. Na prevenção, seu objetivo é impedir que se inicie a corrosão, tornando mais estável o filme passivo (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

A proteção catódica é um método que busca reduzir o potencial na interface aço/concreto para valores negativamente inferiores ao potencial natural de corrosão (E_{corr}). Esse método consiste na aplicação de corrente contínua na armadura, através da proteção por corrente impressa ou proteção por ânodo de sacrifício. ARARUNA (2021).

2.7 Estudos recentes sobre corrosão

A durabilidade do concreto é de grande importância, pois rege o desempenho das estruturas de concreto armado durante sua vida operacional. Diante desse cenário, a corrosão das armaduras por carbonatação do concreto e por penetração de íons cloretos são uma das principais preocupações de durabilidade, fazendo com que bilhões de dólares sejam gastos globalmente em reparos e manutenção de estruturas de concreto armado. A Tabela 1 abaixo, reúne alguns estudos a respeito dessa patologia tão presente nas estruturas de concreto armado e serve de pesquisa para novas propostas de trabalho.

Tabela 1 – Estudos sobre corrosão nas estruturas de concreto armado

CORROSÃO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO					
AUTORES	**ANO DA PUBLICAÇÃO**	**REVISTA**	**TÍTULO DO ARTIGO**	**PALAVRAS-CHAVE**	**DESTAQUE DO ARTIGO**
Soldado et al	2021	Construction and Building Materials	Durabilidade de matrizes de argamassa de concreto de baixo cimento com adições específicas	LCC, Matrizes de argamassa, durabilidade, resistência a carboantação, vida de serviço, penetração de cloreto, resistividade elétrica	Investigação da melhoria da durabilidade do betão utilizado na produção de postes de betão armado para as linhas de distribuição elétrica , tanto na ecoeficiência como na durabilidade condicionada pela corrosão de vergalhões, causada principalmente por carbonatação e cloretos.
Niu et al	2020	Construction and Building Materials	Condições críticas e previsão de vida da corrosão de armadura em concreto agregado de coral	Concreto agregado de coral, Condições de iniciação da corrosão do vergalhão, Concentração crítica de cloreto, Espectroscopia de impedância eletroquímica, Desnaturação dependente do tempo, previsão de vida	Com base no mecanismo de corrosão das barras de aço, obteve-se a concentração crítica de cloreto no concreto agregado de coral e estabeleceu-se o modelo das condições de iniciação da corrosão do vergalhão.
Otieno et al	2019	Construction and Building Materials	Investigações experimentais sobre a influência da profundidade de recobrimento e da qualidade do concreto no tempo para cobrir a fissuração por corrosão induzida por carbonatação do aço em estruturas de concreto armado em ambiente urbano, interior	Carbonatação, corrosão, perda radial de aço, profundidade da cobertura, porosidade	Desenvolvimento de uma relação empírica coerente para o tempo de fissuração do concreto de cobertura em uma estrutura de concreto armado, submetida à corrosão de armaduras de aço induzida por carbonataçãoem um ambiente urbano interior na África do Sul
Zhang et al	2019	Construction and Building Materials	Efeitos da densidade de corrente impressa na fissuração induzida por corrosão de cobertura de concreto	Rachadura de cobertura de concreto, Corrosão de reforço, Densidade de corrente impressa, Coeficiente de expansão, Grau crítico de corrosão	Investigar os mecanismos subjacentes aos diferentes comportamentos de fissuração induzida pela corrosão de estruturas de concreto armado submetidas a diferentes densidades de corrente aceleradas.
Steen et al	2019	Construction and Building Materials	Localização e caracterização de danos por corrosão em concreto armado por meio de emissão acústica e tomografia computadorizada de raios X.	Corrosão de reforço, tomografia computadorizada de raios X, Emissão acústica, agrupamento, localização	Validar o uso de emissão acústica para a localização e caracterização de danos por corrosão induzidos por cloretos.
Al-Sodani et al	2018	Construction and Building Materials	Eficiência dos inibidores de corrosão na mitigação da corrosão do aço sob temperatura elevada e concentração de cloreto	Corrosão de reforço, Polarização potenciodinâmica, Inibidor químico, Contaminação por cloreto, Temperatura, Micrografias eletrônicas de varredura	Avaliação do desempenho de um inibidor genérico e quatro inibidores proprietários na minimização da corrosão do reforço sob condições variadas de temperatura e cloreto.
Revert et al	2018	Construction and Building Materials	Corrosão induzida por carbonatação: Investigação do início da corrosão	Carbonatação, Início da corrosão, indicador de pH, Potencial de corrosão, Análise petrográfica	Investigação de três possíveis hipóteses que poderiam explicar o aparente início precoce da corrosão de armaduras induzida por carbonatação:
Dodds et al	2017	Construction and Building Materials	Desempenho de durabilidade do concreto estrutural sustentável: Efeito do agregado de concreto britado grosso na migração rápida de cloreto e corrosão acelerada	Agregados de concreto britado (CCA), Agregado de concreto reciclado (RCA), Entrada de íons cloreto, Materiais cimentícios suplementares, Corrosão, corrosão acelerada	Investigação dos efeitos de três fontes de CCA grosseiro de elementos estruturais conhecidos sobre o coeficiente de migração rápida de cloreto e o tempo acelerado para o início da corrosão e fissuração do concreto estrutural.
Hussain et al	2015	Construction and Building Materials	Investigação do impacto da natureza do agregado graúdo na formação da camada passiva e corrosão correspondente de barras de reforço em concreto de alto desempenho	Corrosão, Concreto de alto desempenho, aço reforçado, agregado grosso, íons cloreto, experimentação	Verificar o efeito do tipo de agregado graúdo na corrosão de armaduras de aço embutidas em concreto de alto desempenho
Vořechovská et al	2009	Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	Modelagem do Efeito da Concentração de Cloreto na Corrosão do Reforço		A corrosão das armaduras é uma das principais causas de deterioração das estruturas de concreto armado (RC), afetando consideravelmente sua durabilidade e confiabilidade
Val, Dimitri V.	2007	Journal of Infrastructure Systems	Fatores que Afetam a Análise do Custo do Ciclo de Vida de Estruturas de RC em Ambientes Contaminados por Cloreto	Cloretos, Concreto armado, Corrosão, Deterioração, Custo do ciclo de vida, Confiabilidade, estruturas de concreto	Análise de custo do ciclo de vida de estruturas de concreto armado em ambientes contaminados com cloreto

Fonte: a autora (2022)

3. CONCLUSÕES

A corrosão das armaduras deteriora as estruturas de concreto sob duas óticas de ação simultânea. Uma delas diz respeito à perda de seção das barras e seus efeitos, e a outra se refere ao

comportamento mecânico de fissuração do concreto e suas consequências. Ambos os processos ocorrendo sem que haja uma intervenção na estructura fatalmente implicarão num desfecho indesejável que é o colapso estrutural.

A substituição do cimento por adições, aliada ao aumento da compacidade, é altamente benéfica para reduzir a absorção capilar.

No geral, a evolução de misturas cimentícias convencionais para misturas ecoeficientes com alta compacidade e com menor teor de cimento, substituídas por adições, não diminui a durabilidade dos materiais, quanto ao risco de corrosão. Pelo contrário, dependendo das adições, pode resultar em melhorias significativas dos desempenhos de durabilidade e, consequentemente, numa maior vida útil das estruturas produzidas com este tipo de concreto.

O coeficiente de difusão de cloretos, é altamente influenciado pelo efeito pozolânico e pela maturidade das matrizes. As pozolanas promovem alto desempenho na migração de cloretos, pois reduzem o coeficiente de difusão.

A corrosão de armaduras é dependente da presença de umidade tanto na fase de iniciação, como na fase de propagação, pois a água é veículo para o ingresso dos cloretos na fase de iniciação e necessária para dissolução do CO_2 na carbonatação.

O fator controlador da propagação da corrosão sob efeito de carbonatação do concreto é a resistividade, a qual por sua vez depende do grau de umidade dos poros, bem como da porosidade.

A corrosão deve ser medida e controlada ao longo do tempo. O monitoramento deve ser a prioridade em um programa de controle da corrosão, uma vez que assim se obtem informações relativas às taxas de corrosão e os seus parâmetros de controle.

Diante da revisão bibliográfica realizada sobre os processos corrosivos nas armaduras do concreto armado, verifica-se a necessidade de investimentos nesta área, a fim de que a ocorrência destas reações de oxirredução sejam cada vez menores, acarretando ganho econômico para o país e para a sociedade, com obras mais seguras e duráveis. Nesse sentido, a conscientização por parte dos projetistas estruturais, engenheiros e executores para o tratamento adequado da durabilidade da estrutura em fase projeto e na execução, com respeito fiel às normas existentes é fundamental.

4. REFERÊNCIAS

AL-SODANI, KHALED A. ALAWI, AL-AMOUDI, OMAR S. BAGHABRA, MASLEHUDDIN, MOHAMMED, SHAMEEM, MOHAMMED. **Eficiência dos inibidores de corrosão na mitigação da corrosão do aço sob temperatura elevada e concentração de cloreto**. Construction and Building Materials; v. 163, 28 February 2018, Pages 97-112; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.097

ANDRADE, C. **Manual: Inspección de Obras Danãdas por Corrosión de Armaduras**. Madrid, 1988. 122p.

ANDRADE, C. **Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements.** Cement and Concrete Research, v.23, 1998. P.724-742.

ANDRADE, JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA. **Contribuição à Previsão de Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos.** Dissertação de Doutorado, UFEGS, Porto Alegre, 2001.

ARARUNA, JÚLIO CÉSAR MESSIAS DE. **Prevenção e Recuperação de Estruturas de Concreto Armado Submetidas ao Processo de Corrosão da Armadura.** Tese de Mestrado em Engenharia. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. Cajazeiras, Paraíba, 2021.

ASHRAF, WARDA, OLEK, JAN, TIAN, NANNAN. **Multiscale characterization of carbonated wollastonite paste and application of homogenization schemes to predict its effective elastic modulus**. Cement and Concrete Composites; v. 72, September 2016, Pages 284-298; https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.023.

BAUER, E. **Avaliação Comparativa da Inflência da Adição de Escória de Alto-Forno na Corrosão de Armaduras Através de Técnicas Eletroquímicas.** Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

DODDS, W., C. CHRISTODOULOU , C. GOODIER , S. AUSTIN , D. DUNNE. **Desempenho de durabilidade do concreto estrutural sustentável: Efeito do agregado de concreto britado grosso na migração rápida de cloreto e corrosão acelerada**. Constr. Construir. Mater. , 155 (2017), pp. 511 – 521; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.073

DUTRA, ALDO CORDEIRO; NUNES, LAERCE DE PAULA**. Proteção catódica: Técnica de combate à corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 343 p.

FIGUEIREDO, E.J.P. **Avaliação do Desempenho de Revestimentos para Proteção da Armadura Contra Corrosão Através de Técnicas Eletroquímicas – Contribuição ao Estudo de Reparo de Estruturas de Concreto Armado.** Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

FREIRE, KARLA REGINA RATTMANN. **Avaliação do Desempenho de Inibidores de Corrosão em Armaduras de Concreto.** Tese de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Ed. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1996.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro, Guanabara, 1987.

GLASS, GK , B. REDDY, NR BUENFELD. **A participação do cloreto ligado na quebra do filme passivo do aço no concreto.** Corros. Sci. , 42 (2000) , pp 2013 – 2021; https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00040-8

GOÑI, S.; ANDRADE, C. **Syntetic Concrete Pore Solution Chemistry and Rebar Corrosion Rate in the Presence of Chlorides.** Cement and Concrete Researsh. v. 20, nº 14, 1990. p. 525-539.

GONZALEZ, J.A. et. al. **Errors in the Electrochemical Evaluation of Very Small Corrosion Rates – II. Other Electrochemical Techniques Applied to Corrosion of Steel in Concrete**. Corrosion Science.; v.25 n.º7 p.519-530,1985.

HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado.** São Paulo, 1993, 271 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HUSSAIN, S.; AL-MUSALLAM, A.; AL-GAHTANI, A. **Factors Affeting Threshold Chloride for Reinforcement Corrosion in Concrete.** Cement and Concrete Research, v. 25, nº 7, 1995. P. 1543-1555.

HUSSAIN, RAJA RIZWAN, SHURAIM, AHMED B., ALHOZAIMY, ABDULRAHMAN MA. **Investigação do impacto da natureza do agregado graúdo na formação da camada passiva e corrosão correspondente de barras de reforço em concreto de alto desempenho**. Construction and Building Materials; v. 100, 15 December 2015, Pages 52-62; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.057

JONES, MR , RK DHIR , MD NEWLANDS , AMO ABBAS. **Estudo do método de ensaio CEN para medição da profundidade de carbonatação de concreto endurecido.** Mater. Estrutura. Constr. , 33 (2000),pp. 135-142 , 10.1007 / bf02484168; https://doi: 10.1007/bf02484168

J. KROPP , HK HILSDORF (Eds.) , Relatório RILEM 12 – **Critérios de Desempenho para Durabilidade do Concreto** , E&FN Spon (1995)

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais.** 2ª edição. São Paulo: Pini, 1994.

MEIRA, G. R. **Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto:** fundamentos, diagnóstico e prevenção. João Pessoa: IFPB, 2017. 130 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**; tradução Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NIU, DITAO, ZHANG, LU, FU, QIANG, WEN, BO, LUO, DAMING . **Condições críticas e previsão de vida da corrosão de armadura em concreto agregado de coral**. Construction and Building Materials; v. 238, 30 March 2020, 117685; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117685

OTIENO, MIKE, IKOTUN, JACOB, BALLIM, YUNUS. **Investigações experimentais sobre a influência da profundidade de recobrimento e da qualidade do concreto no tempo para cobrir a fissuração por corrosão induzida por carbonatação do aço em estruturas de concreto armado em ambiente urbano, interior**. Construction and Building Materials; v. 198, 20 de fevereiro de 2019 , Páginas 172-181; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.215

PEREPÉREZ, B.; BARBERÁ, E.; ANDRADE, C. **La Agressividad Ambiental y la Durabilidad de las Estructuras de Hormigón. Informes de la Construcción.** v. 38, nº 388, 1987. p. 17-24.

REVERT, ANDRES BELDA, WEERDT, KLAARTJE DE, HORNBOSTEL, KARLA, RICA, METTE. **Corrosão induzida por carbonatação: Investigação do início da corrosão**.

Construction and Building Materials; v. 162, 20 February 2018, Pages 847-856; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.066

SOLDADO, ELIANA, ANTUNES, ANA, COSTA, HUGO, CARMO, RICARDO DO, JÚLIO, EDUARDO. **Durabilidade de matrizes de argamassa de concreto de baixo cimento com adições específicas**. Construction and Building Materials; v. 309, 22 November 2021, 125060; https://doi-org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.conbuildmat.2021.125060

TUUTTI, K. **Corrosion os Steel in Concrete.** Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis, 1982. 469p.

VAL, DIMITRI V. **Fatores que Afetam a Análise do Custo do Ciclo de Vida de Estruturas de RC em Ambientes Contaminados por Cloreto**. Journal of Infrastructure Systems; v.13 issue 2-June 2007; https://doi-org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)1076-0342(2007)13:2(135)

VAN, CHARLOTTE, PAHLAVAN, STEEN LOTFOLLAH, WEVERS, MARTINE , ELS, VERSTRYNGE. **Localização e caracterização de danos por corrosão em concreto armado por meio de emissão acústica e tomografia computadorizada de raios X**. Construction and Building Materials; v. 197, 10 February 2019, Pages 21-29; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.159

VOŘECHOVSKÁ, DITA, PODROUŽEK, JAN, MARKETA, CHROMA, ROVNANÍKOVÁ, PAVLA, TEPLÝ, BŘETISLAV . **Modelagem do Efeito da Concentração de Cloreto na Corrosão do Reforço**. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering; https://doi-org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1111/j.1467-8667.2009.00602.x

V. SHAH , S. BISHNOI. **Análise das características da estrutura dos poros de cimentos carbonatados de baixo teor de clínquer**. Transp. Mídia Porosa. , 124 (3) (2018) , pp. 861-881 , 10.1007 / s11242-018-1101-7.

ZENG, XIANGCHAO. **Progress in the research of carbonation resistance of RAC**. Construction and Building Materials; v. 230, 10 January 2020, 116976; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116976.

ZHANG, CHORANDO, JUNYU, LUO, CHEN XUJIANG. **Efeitos da densidade de corrente** impressa na fissuração induzida por corrosão de cobertura de concreto. Construction and Building Materials; v. 204, 20 April 2019, Pages 213-223; https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.230