

SUBMETIDO 31/01/2022

APROVADO 16/03/2022

PUBLICADO ON-LINE 06/04/2022

PUBLICADO 10/10/2023

EDITOR ASSOCIADO
Andre Luis Christoforo

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6633>

ARTIGO ORIGINAL

Prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado submetidas ao processo de corrosão da armadura: revisão de literatura

 Júlio César Messias Araruna ^{[1]*}

[1] juliocesarmessias765@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba (IFPB), Brasil

RESUMO: As estruturas de concreto armado, durante sua vida útil, estão sujeitas a vários fenômenos patológicos que podem comprometer o desempenho da peça. A corrosão das armaduras é um problema cada vez mais recorrente, sendo capaz de se desenvolver para casos mais graves, levando à ruptura da peça. Esses problemas são decorrentes de erros na fase de projeto ou de execução, por não serem implementadas as técnicas adequadas para evitar o processo corrosivo. Com isso, este trabalho tem como objetivo fazer um levantamento das técnicas de prevenção e de recuperação de estruturas de concreto armado, considerando o processo de corrosão, visando contribuir para o estudo da proteção e recuperação de estruturas de concreto armado em termos de corrosão da armadura. Esta pesquisa consiste em um estudo bibliográfico por meio de livros, teses, dissertações e artigos que abordam essas técnicas. Com base nas fontes analisadas, foi possível constatar as técnicas de prevenção que podem ser aplicadas tanto na superfície do concreto como no seu interior, bem como diretamente nas armaduras. Como métodos de recuperação, foram apresentados o método tradicional e os métodos eletroquímicos.

Palavras-chave: armadura; concreto; corrosão; prevenção; recuperação.

Prevention and recovery of reinforced concrete structures subjected to the reinforcement corrosion process: literature review

ABSTRACT: Reinforced concrete structures, during their useful life, are subject to several pathological phenomena that can compromise the performance of the part. Corrosion of reinforcement is an increasingly recurrent problem, being

*Autor para correspondência.

able to develop into more serious cases, leading to part rupture. These problems are due to errors in the design or execution phase, as the appropriate techniques are not implemented to avoid the corrosive process. With this, this work aims to survey the techniques of prevention and recovery of reinforced concrete structures considering the corrosion process, aiming to contribute to the study of protection and recovery of reinforced concrete structures in terms of reinforcement corrosion. This research is a bibliographic study through books, theses, dissertations and articles that address these techniques. Through the analyzed sources, it was possible to verify the prevention techniques that can be applied both on the surface of the concrete, as in its interior, as well as directly on the reinforcement. As recovery methods, the traditional method and the electrochemical methods were presented.

.....
Keywords: concrete; corrosion; prevention; reinforcement; recovery.

1 Introdução

A degradação de estruturas de concreto armado implica na diminuição de sua vida útil e compromete o desempenho estrutural. Entre as anomalias causadoras dessa deterioração, a corrosão da armadura apresenta-se como uma das mais recorrentes e prejudiciais ao elemento degradado, podendo estar associada a outras manifestações patológicas e ter origem decorrente de erros de projeto e/ou executivos, principalmente em ambientes de elevada agressividade ambiental.

Meira (2017) explica que a corrosão pode ser entendida como a deterioração de um material, sendo este geralmente metálico, decorrente da ação química ou eletroquímica do meio ambiente, com a possibilidade de estar aliada ou não a esforços mecânicos. Assim, ocorre a liberação de energia do metal para o meio ambiente, tendo em vista que este se encontra em um nível energético superior ao material que lhe deu origem, havendo uma tendência de retornar à condição de compostos.

Nesse sentido, é possível que o processo de corrosão se apresente de duas formas considerando a sua natureza: corrosão química e corrosão eletroquímica (MEIRA, 2017). Entre essas, toda corrosão do aço em meio aquoso é de natureza eletroquímica, conduzindo à formação de óxidos/hidróxidos de ferro, denominados de “produtos de corrosão”, em se tratando de armaduras de concreto (HELENE, 2014).

A princípio, as armaduras inseridas em elementos estruturais estão protegidas e passivadas contra a corrosão. Essa proteção é entendida como uma barreira física devido ao cobrimento do concreto, que atua contra o ingresso de agentes externos, e principalmente pela proteção química em razão da alta alcalinidade do concreto. A perda ou ruptura dessa proteção pode provocar um processo de deterioração de forma progressiva e autoacelerante, ainda que localizada (HELENE, 2014).

Com relação aos mecanismos de deterioração na armadura, ressalta-se que a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado ocorre apenas se houver a despassivação por carbonatação ou por cloretos anteriormente, aliada à presença de água e de oxigênio (NUNES, 2015).

Esse fenômeno patológico vem sendo abordado em larga escala no Brasil e no exterior, tendo em vista seu efeito nocivo sobre a estrutura. Além disso, é um dos maiores e mais frequentes problemas relacionados à durabilidade de estruturas de concreto armado. Entretanto, no Brasil, não existem normas que especifiquem ou controlem técnicas e

materiais de reparo, muito menos resultados que enfatizem a eficiência dos métodos empregados (NUNES, 2015).

Aliado a isso, para Helene (2014), existe uma grande dificuldade por parte dos profissionais de projeto e execução de obras em adotarem medidas de proteção dessas estruturas contra a corrosão, pois os sintomas visíveis desse processo surgem apenas depois de vários anos, podendo ser acima de 10 a 15 anos. Sua manifestação a curto prazo ou durante a execução da estrutura é muito rara.

Helene (2014) ainda ressalta que o estudo referente à corrosão das armaduras não se limita à busca de medidas profiláticas, que dizem respeito aos métodos de prevenção dessa degradação ao longo do tempo. Nesse sentido, é de fundamental importância a obtenção de processos de intervenções corretivas eficazes, entre eles, os reparos, reforços, reabilitações e restaurações de estruturas de concreto armado.

Caso esse fenômeno patológico não seja evitado ou mesmo solucionado o quanto antes e com as técnicas corretas, pode se desenvolver e levar a estrutura ao colapso, colocando vidas humanas em risco. Aliando a essa constatação, Meira (2017) afirma que a problemática da deterioração de estruturas de concreto resultante do processo de corrosão apresenta-se em todo o território nacional, sendo evidente uma maior preocupação com relação às zonas costeiras.

Assim, buscou-se desenvolver um estudo cujo objetivo consiste em fazer um levantamento das técnicas de prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado, considerando o processo de corrosão, visando contribuir para o estudo da proteção e recuperação de estruturas de concreto armado em termos de corrosão da armadura. Trata-se de uma revisão de literatura, abordando trabalhos relevantes acerca do tema, que dizem respeito a livros, artigos, teses e dissertações. As principais bases de dados usadas foram os periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e as publicações da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD).

Dessa forma, as seções seguintes abordam, inicialmente, o método utilizado na pesquisa e, logo após, os resultados obtidos. Estes se subdividem em “Técnicas de Prevenção” e “Técnicas de Recuperação”. Adiante, é apresentada a conclusão da pesquisa, seguida das referências utilizadas.

2 Método da pesquisa

Este estudo consiste em uma revisão de literatura, de abordagem qualitativa, acerca da prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado devido ao processo de corrosão da armadura. Segundo Vosgerau e Romanowski (2014), as revisões bibliográficas podem contemplar análises que permitam comparar pesquisas com temas semelhantes ou relacionados, no intuito de organizar, resumir e tornar claras as principais obras existentes. Assim, foi realizado um estudo com base em livros, dissertações, teses e artigos no intuito de apresentar as técnicas envolvidas nesse processo, avaliando sua aplicabilidade com base nas condições ambientais em que a estrutura se encontra.

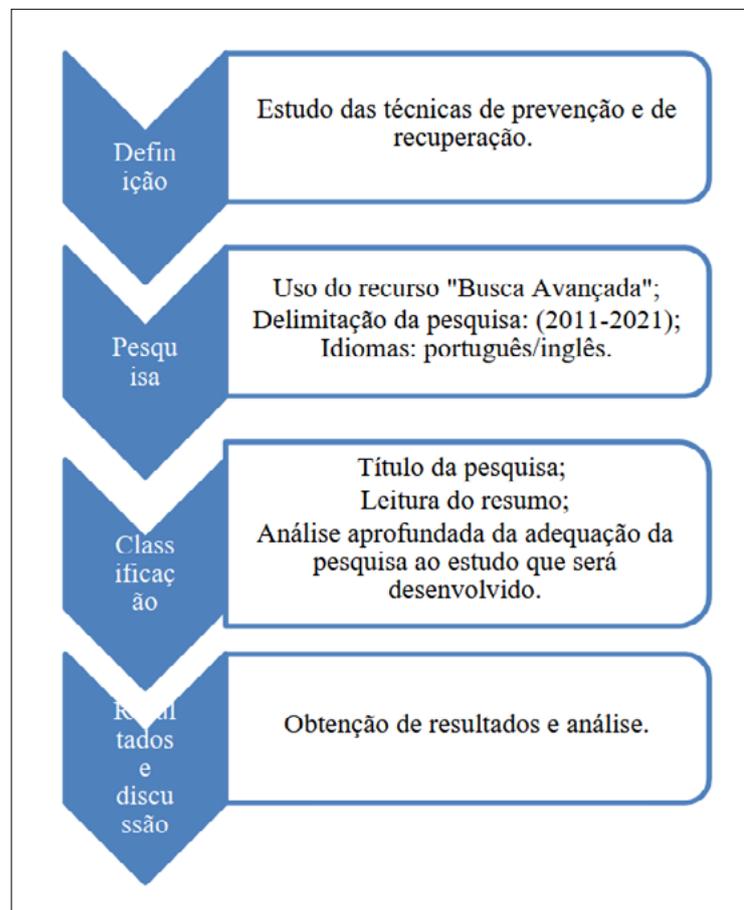
Foram buscadas pesquisas na área da Engenharia destinadas a responder uma ou mais das seguintes perguntas: (1) “Quais as técnicas que podem ser utilizadas para a prevenção da corrosão da armadura em estruturas de concreto armado?” Busca-se trabalhos que apresentem medidas protetivas aplicadas na armadura ou no concreto. (2) “Quais as técnicas que podem ser executadas para a recuperação dessas estruturas?” Frequentemente, as técnicas de prevenção são negligenciadas,

principalmente em ambientes de elevada agressividade ambiental, sendo necessário recuperar todo o elemento estrutural. (3) “Qual a aplicabilidade dessas técnicas?” Tem-se o intuito de saber em qual ambiente ou meio agressivo aquela técnica apresenta melhor desempenho.

Os estudos analisados referem-se a pesquisas desenvolvidas nos últimos 10 anos (2011 a 2021), abordando trabalhos produzidos em inglês e português, usando-se as palavras-chave “concreto armado”, “armadura” e “corrosão” no campo de busca. As bases de dados utilizadas para os artigos foram os periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e, para teses e dissertações, a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), tendo em vista a importância destas no meio acadêmico e relevância dos estudos publicados. Os livros abordados referem-se a obras de autores nacionais e internacionais consagrados na literatura quanto ao tema, não sendo este contemplado nas normas vigentes no Brasil. O desenvolvimento do trabalho e classificação das pesquisas deu-se conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 ►

Desenvolvimento do trabalho e classificação das pesquisas.
Fonte: elaborada pelo autor (2021)



3 Resultados da pesquisa

Estabelecendo as limitações apresentadas, foi obtido um total de 165 publicações, sendo 96 encontradas na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e 65 referentes aos periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); foram selecionados também 4 livros para o desenvolvimento do estudo. Desses trabalhos, foram escolhidos, com base nos títulos, 25 estudos da primeira base de dados e 21 da segunda; entre os livros, 3 permaneceram para o desenvolvimento

do estudo, sendo excluído o que não atendia ao limite temporal estabelecido. Após isso, os artigos passaram por uma nova etapa de seleção, sendo realizada a leitura de seus resumos e resultados, de modo a classificar quais melhor se adequavam ao tema da pesquisa, sendo, assim, selecionadas 11 e 10 publicações para a BDTD e a CAPES, respectivamente. Resumidamente, esta pesquisa foi desenvolvida a partir de 24 trabalhos, sendo 3 destes trabalhos livros publicados nos últimos 10 anos. A Figura 2 classifica os trabalhos por tipo, a Figura 3 classifica os trabalhos por ano e a Figura 4 classifica os trabalhos por periódico.

Figura 2 ▶

Trabalho por tipo de publicação (total 24).

Fonte: dados da pesquisa (2021)

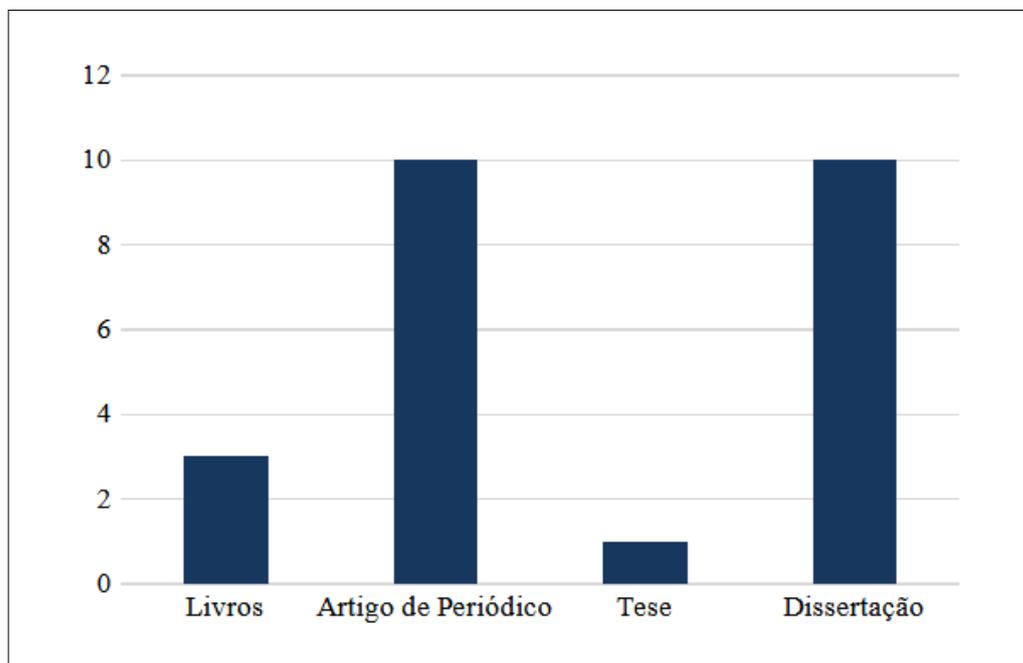


Figura 3 ▶

Trabalhos por ano de publicação (total 24).

Fonte: dados da pesquisa (2021)

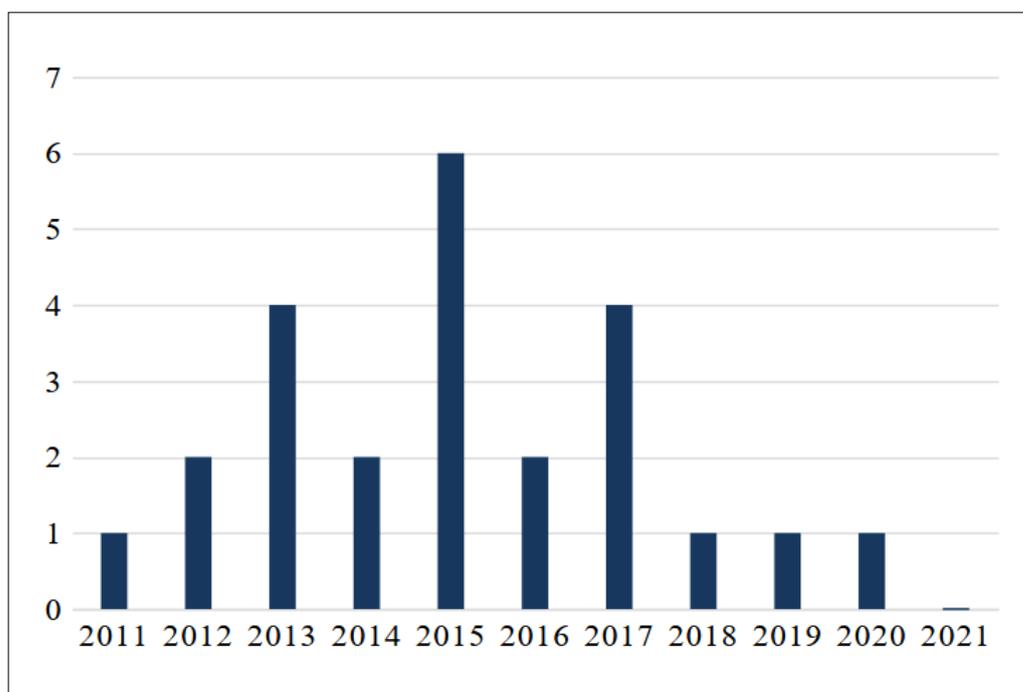
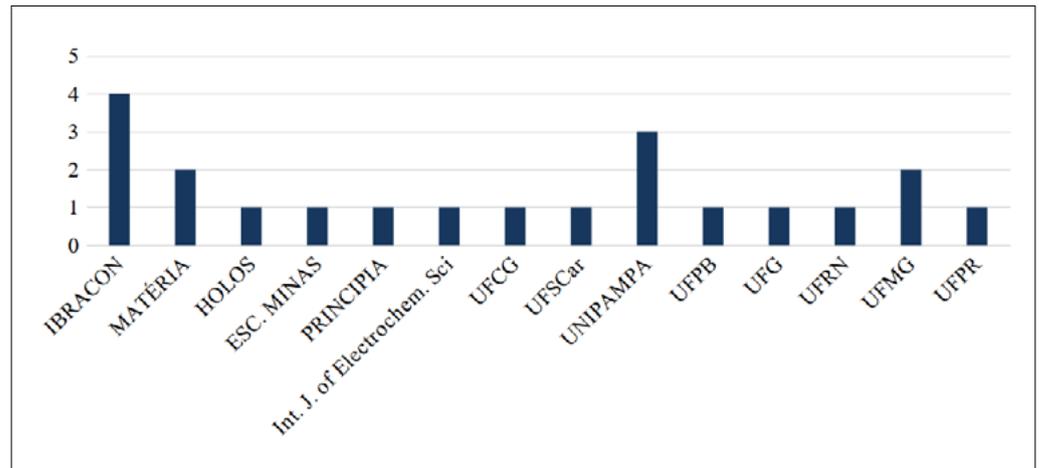


Figura 4 ►
Artigos, teses e dissertações por periódico (total 21).
Fonte: dados da pesquisa (2021)



A partir da leitura dos 24 trabalhos, estes foram categorizados conforme as questões de pesquisa que se deseja responder, com base nos estudos das técnicas de prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado, considerando o processo de corrosão.

3.1 Técnicas de prevenção

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).

3.1.1 Métodos de aplicação sobre o concreto

Os métodos de aplicação sobre o concreto dividem-se entre os que são aplicados em seu interior e os que são empregados na superfície do concreto endurecido. Ambas as classes de técnicas buscam reduzir a entrada de agentes agressivos, podendo atuar diretamente contra o processo de corrosão.

a) Inibidores de corrosão

Os inibidores de corrosão são produtos químicos que, em um sistema de corrosão, se caracterizam por diminuir a velocidade dessa sem alterar a concentração dos agentes corrosivos de forma significativa, devendo estar em concentração adequada, aplicando-se no concreto fresco. Para a efetivação desse processo, devem ter a capacidade de se difundir pelo concreto de modo a alcançar a região onde se encontra a armadura, sem surtir efeito negativo sobre as propriedades físicas e químicas do concreto, a exemplo de sua resistência mecânica (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

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 de o processo de corrosão já ter iniciado ou não.

Lourenço e Souza (2014) destacam que, em estruturas de concreto armado, os tipos de inibidores mais utilizados são os nitritos e as misturas de aminas e alcanolaminas. Os primeiros são utilizados basicamente no concreto fresco, tendo em vista a prevenção. O nitrito de cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) atua na reação anódica e, ao oxidar o ferro, permite a formação de um filme passivo, aderente e protetor. Esse foi um dos primeiros inibidores aceitos para serem utilizados como alternativa a armaduras revestidas com epóxi na prevenção da corrosão decorrente da ação de cloretos, em tabuleiros e superestruturas de pontes. Seu uso eficaz depende da razão entre o teor de cloretos e o teor de nitritos, devendo esse valor ser inferior a 1,0; por isso é necessário que a quantidade desse inibidor a ser utilizada seja calculada conforme recomendações do fornecedor e da previsão de cloretos na estrutura. Segundo Gjorv (2015), é provável que esse seja o inibidor mais testado e com maior aplicação até agora. Meira (2017) explica que esse material atua na forma de passivante, originando produtos pouco solúveis.

Os inibidores orgânicos à base de aminas e alcanolaminas atuam como inibidores catódicos ou mistos. Esses podem atenuar a velocidade de corrosão, diferentemente dos inibidores anódicos, e, por meio de sua elevada pressão de vapor, têm grande capacidade de se difundir no interior do concreto. A amina age constituindo uma camada protetora, não permitindo o contato da armadura com o meio corrosivo, além de remover sujeiras da superfície metálica, a exemplo das advindas do processo de corrosão, permitindo um melhor contato entre a camada protetora e a superfície do metal (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

Em estudo desenvolvido sobre a lama vermelha, Ribeiro, Labrincha e Morelli (2012) afirmam que a lama vermelha consiste em um resíduo sólido considerado perigoso em razão do seu elevado pH, despertando, portanto, o interesse da engenharia civil. Analisando o potencial de corrosão por medidas eletroquímicas e de resistividade elétrica, observa-se que a aplicação desse resíduo no concreto armado resulta em uma redução no potencial de corrosão e aumento da resistividade elétrica. Também se constata que a adição de lama vermelha reduz a taxa de migração dos cloretos (coeficientes de difusão), vindo esse resultado a ser verificado por Dietrich, Teles e Vieira (2017), com destaque para a aplicação de 5% de rochas ornamentais no concreto em relação à massa do cimento. Esse fator dá-se em decorrência de a lama vermelha ter um módulo de finura elevado (efeito *filler*) e devido à ação dos aluminossilicatos. Sua elevada alcalinidade e a presença de aluminossilicatos permitem a assimilação e formação de composto em razão da reação com os íons cloreto. A estabilização desse material ocorre entre 20% e 30% de adição em relação à massa de cimento.

Heck (2018) avaliou o efeito do uso de benzoato de sódio ($\text{C}_7\text{H}_5\text{NaO}_2$) e molibdato de sódio (Na_2MO_4) na matriz do concreto, sendo empregados de forma isolada e conjunta, na proporção de 1,5% do teor de cimento utilizado. A presença conjunta dos dois inibidores permitiu uma menor densidade de corrosão, quando comparado ao uso dos inibidores de forma isolada e à sua não utilização. Com relação à penetração de cloretos, o uso de inibidores permitiu um melhor desempenho nos testes realizados, com destaque para o benzoato de sódio.

Trevisol *et al.* (2017) realizaram um estudo voltado para a aplicação de três aditivos químicos: um comercial à base de sais de nitrito, o tungsnato de sódio ($\text{Na}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e o molibdato de sódio (Na_2MO_4), utilizados nas proporções de 1% e 2% em relação à massa do cimento. O inibidor comercial não se mostrou eficiente na redução das taxas de corrosão; entretanto, para efeitos de tempo de cura, a taxa média de corrosão foi reduzida entre os períodos de 60 e 90 dias, apresentando valores de 4,7 mm/ano

e 1,6 mm/ano, respectivamente. Foram obtidos resultados mais significativos para os aditivos de molibdato e tungstato; para o primeiro, foi obtido um índice de eficiência de 50% na proporção de 1% do aditivo, e, para o segundo, uma eficiência de 29% para uma adição de 2% do inibidor.

Pereira (2015) analisou os efeitos do uso de ânions carboxilato (COOH), por meio do uso de óleo de soja refinado, e de benzoato de sódio ($C_7H_5NaO_2$), na proporção de 0,1% em relação ao volume de água e de 1,288% em relação à massa do cimento, respectivamente. Ambos foram usados de forma conjunta e isolada, mantidos seus teores, sendo realizado o ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM). O ensaio CAIM é definido nas categorias gravimétrica e eletroquímica, tendo em vista que seus apontamentos são realizados com base na perda de massa da armadura; concomitantemente a entrada de íons cloreto é estimulada eletricamente, por meio de diferença de potencial entre a armadura e a solução salina em que está inserido o corpo de prova. Com isso, percebeu-se que as misturas contendo ambos inibidores apresentaram uma maior resistência ao processo de migração iônica e, conseqüentemente, uma menor corrente em relação aos corpos de prova de referência, com destaque para a presença simultânea desses ânions. O ensaio CAIM apontou também para uma redução na perda de massa das barras de aço menor para as misturas com o uso dos inibidores comparadas ao concreto sem inibidores. Por meio do ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, analisou-se que o uso desses ânions proporcionou uma maior resistência à corrosão na interface pasta/aço, o que reflete um melhor desempenho na performance anticorrosiva da armadura. Analisadas as propriedades físicas das misturas, constatou-se que houve uma menor discrepância nos valores para os corpos de prova com a presença conjunta dos inibidores.

Trindade (2013) fez uma análise comparativa da resistência à corrosão entre a aplicação e não aplicação de insumos agrícolas na composição do concreto, com o uso da cinza da casca de arroz (CCA) e água extraída da mandioca brava. Aquela foi empregada nas proporções de 5%, 8%, 10% e 15%, adicionando-se ou não a água da mandioca brava. Os ensaios consistiram na aplicação de voltagens de 15 V, 30 V e 70 V durante 8 horas, 24 horas e 48 horas. O efeito sinérgico foi melhor representado contra a corrosão a 30 V, obtido por meio do ensaio CAIM, e a quantidade de cloretos determinada pelo método de Mohr foi coerente com os resultados apresentados. O efeito sinérgico constatado pode estar relacionado ao efeito passivador dos componentes presentes na água da mandioca brava, a exemplo do álcool (-OH) e da carbonila (C = O), e das características pozolânicas da CCA, que remete a um refinamento dos poros e conseqüente diminuição da taxa de corrosão. O traço selecionado foi de 8%, tendo em vista os valores de resistência à compressão e similaridade do concreto.

Em estudo realizado por Figueiredo *et al.* (2014), inferiu-se que o uso de metacaulim em substituição ao cimento na proporção de 10% no concreto permitiu uma maior fixação de cloretos na forma de sal de Friedel, processo esse que corresponde à formação de compostos estáveis precipitados na matriz do cimento, não apresentando risco às armaduras. O comportamento desse material frente à ação de cloretos também foi positiva para uma relação água/aglomerante de 0,6, reduzindo a taxa de penetração de cloretos em 20% comparado aos corpos de referência.

Em análise comparativa entre a nanosílica e a sílica, observou-se que uma adição de 10% de nanosílica em substituição ao cimento no concreto, comparado a teores de sílica em 0%, 1%, 5% e 10%, o efeito da nanosílica foi mais relevante quanto ao desempenho das propriedades mecânicas, física e de durabilidade da estrutura no que diz respeito à ação dos cloretos e do CO_2 (SANTOS, 2019).

Em outro estudo, foi comparado o efeito da sílica, da nanosílica e do metacaulim, constatando que a combinação de nanosílica com sílica ativa (SN), nas proporções de 1% e 9%, respectivamente, proporcionou maior eficiência quanto ao transporte de cloretos e à corrosão das armaduras, com destaque para uma relação água/ligante igual a 0,4. Essas adições modificam as propriedades físicas do concreto, provocando um refinamento da porosidade capilar e aumento da densidade da matriz cimentícia. Seu uso é indicado para atmosferas agressivas do tipo marinha e respingos de maré (MARTINS, 2016). O uso da sílica e do metacaulim para uma relação água/aglomerante de 0,6 apresentou um comportamento químico negativo, tendo em vista que os valores de pH obtidos ficaram abaixo de 11,5 (NERI, 2015).

O resíduo de polimento de porcelanato (RPP) é um produto sem propriedades pozolânicas, sendo uma alternativa sua utilização como material inerte no concreto convencional e no concreto autoadensável frente à corrosão provocada por íons cloreto. Esse material propicia a redução do índice de vazios em razão do empacotamento de agregados e ganho de resistência aos 90 dias. Verifica-se, também, uma diminuição da concentração de cloretos livres e totais na matriz cimentícia e uma redução da taxa de difusão, sendo uma alternativa sustentável o uso desse resíduo na estrutura e que contribui para o prolongamento da vida útil da estrutura submetida ao processo de corrosão (LIMA, 2016).

Oliveira (2013) fez uma análise da aplicação de cal na argamassa, tendo em vista a capacidade de esse material elevar a alcalinidade do concreto, analisando o comportamento frente à corrosão das armaduras de aço carbono e galvanizadas. Foi constatado o efeito benéfico de adição de cal na argamassa, pois elevou o potencial de corrosão e aumentou o valor de resistência à polarização de ambas as armaduras. Esse beneficiamento pôde ser verificado apenas para os teores de 6,7% e 13,3%, pois, na proporção de 26,3%, o concreto apresentou uma maior porosidade, facilitando a entrada de dióxido de carbono (CO₂).

b) 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). Entre 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 (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

Nunes (2011) avaliou a eficiência do uso de revestimentos à base de resina de silicone e solvente (Material X) e outro à base de cimento branco, areias selecionadas e resinas acrílicas (Material Y). A aplicação de ambos os revestimentos na superfície do concreto possibilitou uma redução na absorção de água, reflexo de uma diminuição na porosidade do concreto, e maior resistência à entrada de agentes agressivos com sua aplicação após a cura do concreto, tendo em vista se tratar de revestimentos hidrofóbicos, resultado esse obtido pela análise das curvas de polarização.

Ainda em Nunes (2011), os revestimentos utilizados permitiram um melhor desempenho quanto ao processo de corrosão das armaduras quando comparados aos corpos de prova sem revestimento, mostrando-se eficientes como inibidores de corrosão, com destaque para o revestimento X nas análises apresentadas. No que diz respeito ao uso, o material X pode ser aplicado em concreto aparente, ao passo que o

material Y não é indicado para esse fim, tendo boa eficiência em reservatórios de água e piscinas. Destaca-se que esse último permite a formação de uma barreira, reduzindo o processo de carbonatação.

O tratamento da superfície do concreto com silicato de sódio também tem a capacidade de reduzir a difusão de cloretos. Sendo assim, o uso desse material permite uma maior vida útil quando o agente agressivo são íons cloreto. Apesar de o silicato de sódio reduzir a absorção de água no concreto, seu uso não torna o concreto impermeável, o que limita sua aplicação em condições de lagoas, como piscinas e caixas d'água. Fazendo a comparação com outros produtos, constatou-se que o silicato de sódio tem a capacidade de aumentar a vida útil da mesma forma que uma aplicação à base de silano/siloxano e para um revestimento acrílico, porém o poliuretano mostrou-se mais eficiente que o silicato de sódio em termos de proteção (MEDEIROS *et al.*, 2012).

Meira (2017) e Gjorv (2015) citam as pinturas e selantes, que, geralmente, são polímeros e formam um filme contínuo sobre a superfície do concreto com capacidade de reduzir ou bloquear o transporte de CO₂ e íons cloreto. Com relação ao seu uso, evitar falhas durante sua execução, garantir sua aderência e sua durabilidade ao longo do tempo são fatores relacionados à eficiência no uso desses materiais. Podem ser aplicados também os hidrofugantes, que atuam na redução da absorção capilar, evitando a entrada de agentes agressivos dissolvidos na água. Os bloqueadores de poros bloqueiam os poros superficiais a partir da reação química desse material com os compostos hidratados, preenchendo os poros capilares. Gjorv (2015) ainda faz referência ao uso de uma camada cimentícia espessa e densa.

Gjorv (2015) relata que os hidrofugantes vêm sendo utilizados em larga escala nos últimos anos como forma de proteção em ambientes de elevada agressividade. Ressalta-se que a garantia da eficácia desse método pressupõe a reaplicação desse produto de tempos em tempos, tendo em vista que o desgaste e envelhecimento precoce afetam sua durabilidade. Destaca-se, também, que esse tratamento pode ser aplicado durante a etapa de concretagem, a fim de evitar a exposição nas primeiras idades em ambientes de elevada agressividade, antes que o concreto obtenha maturidade e densidade suficientes.

3.1.2 Proteção catódica como método de prevenção ou proteção posterior

A técnica de proteção catódica 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, recebendo a terminologia prevenção catódica, seu objetivo é impedir que se inicie a corrosão, tornando mais estável o filme passivo (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

Assim, a proteção catódica, tanto como método de reparação quanto de prevenção, consiste em um método que busca reduzir o potencial na interface aço/concreto para valores negativamente inferiores ao potencial natural de corrosão (Ecorr). Esse método consiste na aplicação de corrente contínua na armadura, realizada por corrente impressa ou proteção por ânodo de sacrifício. A primeira diz respeito a uma corrente fornecida por uma fonte de alimentação externa, e a segunda, à ligação da armadura a um metal com potencial mais negativo (ARAUJO; PANOSSIAN; LOURENÇO, 2013). Em decorrência da resistividade elevada do concreto, os sistemas de corrente impressa têm

maior aplicabilidade em estruturas de concreto armado, razão pela qual esse sistema demanda um maior enfoque (LOURENÇO, 2014).

Em se tratando do método de prevenção, durante a execução da estrutura, os ânodos de sacrifício são empregados na estrutura, tendo um contato direto com a armadura. Como os ânodos são ligas metálicas menos nobres, sofrem o processo de corrosão e a armadura é levada à condição de cátodo, sendo em geral utilizadas ligas de alumínio ou de zinco. Caso sejam usados como método de reparação, o procedimento é semelhante; porém, com base na necessidade de haver áreas de contato entre a armadura e os ânodos de sacrifício, deve a intervenção ser mínima na remoção de parte do concreto de cobertura e conseqüente recomposição. Os ânodos de sacrifício empregados nessa técnica podem ser encontrados, por exemplo, na forma de malhas, pastilhas e barras (MEIRA, 2017).

Para a atuação eficiente dessa técnica, é necessário verificar a continuidade elétrica das armaduras antes da aplicação do concreto, de modo a assegurar que não haja curto-circuito entre o ânodo e as armaduras, a fim de não comprometer o correto funcionamento do sistema na zona afetada. Em caso de detecção desse processo, a concretagem deve ser interrompida (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

3.1.3 Armaduras especiais

No geral, as armaduras especiais podem ser identificadas entre as que passam por algum processo que busque melhorar suas propriedades anticorrosivas e as não metálicas. Nesse tipo de armadura, a busca por uma melhor aderência entre o novo material e o concreto é cada vez mais requisitado; no caso de um novo revestimento sobre a armadura, é recomendável uma boa aderência também entre o aço e o novo material.

a) Armaduras galvanizadas

Lourenço e Souza (2014) definem aço galvanizado como um substrato de aço submetido ao processo de imersão a quente após ser revestido com um depósito de zinco, sendo um dos revestimentos mais empregados na proteção da armadura no concreto armado. Segundo Meira (2017), há vantagens consistentes no uso do aço galvanizado em relação ao aço comum nessas estruturas, a exemplo do incremento do período de iniciação da corrosão e também porque permite sua aplicação em estruturas delgadas. Apesar de vantagens significativas, Cândido, Meira e Abreu (2020) afirmam que são necessárias mais informações acerca desse método frente à ação de íons cloreto.

A utilização do aço em estruturas de concreto consiste em um método bastante difundido internacionalmente, em estruturas de pontes e pisos; porém, no Brasil, seu uso é mais recente, tendo como exemplo o Museu Iberê Camargo, localizado na cidade de Porto Alegre, construído em 2008 (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

Por meio do processo de galvanização da armadura, ocorre a produção de uma camada mais interna constituída de aleações Fe-Zn e a mais externa caracteriza-se por ser de zinco puro. A proteção decorrente desse método advém da formação de um filme passivo nessa camada de zinco, reduzindo a taxa de dissolução desse material. Essa proteção está relacionada à espessura da camada externa e do pH do meio, sendo que, para a primeira, é ideal que esteja em uma faixa entre 12 e 12,8, para uma proteção mais eficiente. A partir disso, compreende-se que cimentos com alto teor de álcalis implicam na formação do filme passivo decorrente do aço galvanizado (MEIRA, 2017).

Com base em estudo realizado por Cândido, Meira e Abreu (2020), foi constatado que, diante de uma baixa alcalinidade, a armadura comum deu início ao processo de corrosão enquanto o aço galvanizado se manteve passivo. Contudo, para meios muito alcalinos, o aço carbono apresentou um melhor desempenho. Mesmo assim, é importante destacar que, diante do processo de carbonatação, diferentemente do aço comum, a armadura de aço galvanizado mostrou-se eficiente na proteção contra a corrosão, não ocorrendo despassivação da armadura quando submetida ao ataque por cloretos, com uma relação $[Cl^-]/[OH^-]$ de 0,1 a 0,5, tendo o aço comum falhado para este último.

Cedrim *et al.* (2016) realizaram o processo de galvanização por meio da eletrodeposição de zinco e liga de zinco-níquel em barras de aço convencionais, comparando seu comportamento com as barras não galvanizadas. As armaduras sem galvanização apresentaram taxa de corrosão de 250,40 $\mu\text{m}/\text{ano}$, enquanto as barras de zinco e zinco-níquel sofreram com esse processo nas taxas de 167,49 $\mu\text{m}/\text{ano}$ e 166,15 $\mu\text{m}/\text{ano}$, verificando-se uma redução de 33,1% e 33,6%, respectivamente. Os resultados referentes ao potencial de corrosão indicaram uma proteção das armaduras quanto à despassivação, resultante do revestimento com zinco e zinco-níquel.

Nesse contexto, Meira (2017) verifica que as armaduras de aço galvanizado permitem uma maior proteção contra a corrosão decorrente da ação de íons cloreto em relação às armaduras convencionais, além de que, mesmo tendo iniciado o processo corrosivo, o método da galvanização faz com que a corrosão ocorra em menores taxas. É estimado que o uso do aço galvanizado leve a estrutura a ter uma vida útil cerca de quatro a cinco vezes maior do que estruturas que utilizam a armadura sem revestimento (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

b) Armaduras revestidas com epóxi

Lourenço e Souza (2014) afirmam que o revestimento com epóxi em armaduras tem a capacidade de elevar de forma significativa a vida útil da estrutura, estando entre as técnicas mais utilizadas. Nesse sentido, a camada de epóxi funciona como uma proteção física entre a superfície da armadura e os agentes corrosivos que estão no concreto, a exemplo do oxigênio e dos cloretos. Além dessa característica, o epóxi apresenta uma boa resistência elétrica, sendo eficiente para os casos de corrosão eletroquímica.

Para uma aplicação eficiente desse método, Meira (2017) enfatiza a necessidade de a pintura cobrir de modo uniforme a armadura e com a espessura adequada, evitando a perda de aderência entre a armadura e o concreto; ter uma boa resistência, aliada a uma aderência adequada à superfície da armadura e com flexibilidade suficiente para permitir as dobras desse elemento também são requisitos bastante importantes. Falhas na pintura permitem a penetração de íons cloreto, que se movem para debaixo da película, aumentando sua área de ataque. Com isso, Lourenço e Souza (2014) afirmam que é necessário ter cuidado durante a dobra da armadura, para não causar falhas posteriormente, recomendando também que, durante o lançamento do concreto, a extremidade da mangueira deve estar perto o suficiente da armadura.

Lourenço e Souza (2014) ainda ressaltam que pode haver uma combinação entre a armadura galvanizada e a pintura epóxi, levando a um revestimento conhecido como duplex, que irá conferir dupla proteção à armadura. Também podem ser usados aditivos a fim de melhorar suas propriedades de proteção e de aderência aço/concreto, como resina fenólica, pigmentos de anilina, cinza volátil e areia. Esse tipo de revestimento pode ser utilizado, principalmente, em tabuleiros de pontes, em estruturas marinhas e na estrutura de estacionamentos.

c) Armaduras em aço inox

Os aços inoxidáveis caracterizam-se como uma variabilidade de aços, que se distinguem quanto à composição, às características físicas e mecânicas, ao custo e à resistência à corrosão. De um modo geral, conferem maior vida útil à estrutura de concreto armado, decorrente de uma maior resistência à corrosão em relação ao aço convencional (MEIRA, 2017).

Segundo Lourenço e Souza (2014), a utilização do aço inoxidável pode ser uma alternativa viável quando se trata de uma estrutura exposta a ambiente com alto grau de agressividade. Esse tipo de material apresenta muitas vantagens em relação a outros métodos, a exemplo de uma resistência à corrosão muito superior ao aço galvanizado, principalmente em meio com presença de cloretos, além de não sofrer com falta de aderência e não ficar suscetível a falhas no revestimento, tal qual o revestimento epóxi. Com relação à prevenção catódica, o uso de aço inoxidável prevê um menor custo de manutenção e não requer mão de obra especializada; porém, um agravante com relação ao uso do aço inoxidável se encontra no elevado custo da liga.

Apesar de haver no mercado grande variabilidade de aço inoxidável, este pode ser compreendido em três grupos: aço ferrítico; aço austenítico e aço duplex (austenítico-ferrítico). Essa classificação tem como base a composição química e a microestrutura do aço (GJORV, 2015).

Os aços inoxidáveis com maior utilização são os aços austeníticos 304 e 316 e o aço duplex 2205. Levando em consideração os custos, o aço inoxidável 304 apresenta uma maior viabilidade; porém, para ambientes altamente agressivos, estando a estrutura submetida a respingos de maré (parte do elemento parcialmente submerso está em contato com a água do mar) e mesmo localizada à beira mar com elevada concentração de cloreto, aconselha-se o uso das ligas 316 e 2205 (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

Em concretos submetidos à carbonatação, os aços inoxidáveis tendem a manter a passividade. Na presença de cloretos, é possível ocorrer a corrosão por pites (MEIRA, 2017). Contudo, nesse caso, utiliza-se ligas que contêm molibdênio, com destaque para as ligas 316 e 317 (LOURENÇO; SOUZA, 2014). Em pesquisa realizada por Mesquita *et al.* (2013), que buscou analisar os efeitos do Mo na corrosão por pites de aços austeníticos, ferríticos e duplex em diferentes ambientes, com destaque para uma solução sintética contendo cloretos e carbonatos, constatou-se que os resultados são bastante positivos para os ferrítico e duplex diante de todas as condições ambientais. Entretanto, a influência do Mo não foi consistente para o aço austenítico em diferentes ambientes. O aço 304 apresentou maior resistência que o aço 316 em solução alcalina, não surtindo o mesmo efeito em ambiente ácido e neutro.

De um modo geral, o uso de aço inoxidável é mais restrito a ambientes com alta agressividade ambiental, como ambiente industrial severo e ambiente marinho. Por isso, seu uso é mais indicado para regiões de respingo de maré, reforços na parte externa de pontes e fundações, estribos e armadura de conexão entre juntas e peças pré-fabricadas (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

d) Armaduras não metálicas

As armaduras não metálicas com maior utilização em estruturas de concreto armado são as de fibra de vidro e de fibra de carbono, geralmente em uma fração de 60% a 80%. Ao contrário da armadura de aço, essas armaduras não estão suscetíveis ao processo corrosivo decorrente da ação de íons cloreto e da carbonatação. Por isso, surgem como

uma alternativa para ambientes corrosivos, apesar de apresentarem um custo mais elevado (LOURENÇO; SOUZA, 2014; MEIRA, 2017).

As armaduras poliméricas reforçadas com fibra de vidro (PRFV) apresentam um custo consideravelmente menor e se caracterizam por terem uma maior ductilidade em relação aos compósitos reforçados com fibras de carbono (PRFC), enquanto estes apresentam maior resistência mecânica e rigidez. Os compósitos híbridos, resultantes do uso simultâneo das fibras de vidro e de carbono na matriz polimérica, apresentam elevada resistência mecânica e um custo inferior aos compostos formados somente por fibras de carbono (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

As propriedades mecânicas das armaduras poliméricas reforçadas com fibras (PRF) são também melhores que as armaduras aço carbono, contribuindo com uma maior resistência mecânica e à fadiga, maior facilidade de manuseio e neutralidade eletromagnética. É ressaltado também que essa armadura apresenta maior resistência à tração e menor módulo de elasticidade (MEIRA, 2017).

Entretanto, as propriedades mecânicas da matriz polimérica e das fibras de vidro correm risco de deterioração, quando o concreto contendo armadura PRF é submetido a condições ambientais desfavoráveis, a exemplo da água do mar, ambiente de alcalinidade elevada ou saís de degelo (LOURENÇO; SOUZA, 2014).

As armaduras PRF têm sido mais utilizadas no fortalecimento de colunas, reparo de estruturas que foram submetidas ao processo de corrosão, em adaptações sísmicas e lajes paralelas. Contudo, para aplicação em estruturas de concreto, são desconhecidos os efeitos em longo prazo que a deterioração dessas armaduras provoca nas propriedades mecânicas da estrutura. Por isso, é necessário avançar em estudos que tenham como objetivo analisar o comportamento dessa armadura ao longo do tempo (LOURENÇO; SOUZA, 2014; MEIRA, 2017).

3.2 Técnicas de recuperação

A implementação da solução técnica mais adequada e econômica baseia-se no conhecimento das causas da deterioração e da extensão do dano. Os métodos mais utilizados em decorrência da ação de íons cloreto são a reparação localizada e os métodos eletroquímicos. Em se tratando de carbonatação, as técnicas mais empregadas são a reparação convencional e a realcalinização (LOURENÇO, 2014).

3.2.1 Método tradicional – remoção e substituição

Lourenço (2014) afirma que a reparação convencional consiste na remoção do concreto contaminado e sua substituição por um concreto novo. A utilização dessa técnica não é recomendada para estruturas contaminadas por íons cloreto, tendo em vista sua baixa eficiência a longo prazo. Segundo Nunes (2015), não há normas no Brasil que especifiquem os materiais, os procedimentos executivos e de qualidade, ficando a reabilitação baseada em experiências anteriores de empresas especializadas.

Em seguida, Nunes (2015) elenca os passos envolvidos no método tradicional, que dizem respeito à remoção, à limpeza, à proteção das armaduras, à preparação do substrato para receber material de reparo, à aplicação dos materiais e técnicas e à proteção superficial do concreto. Entre esses procedimentos, alguns contemplam os métodos estudados na seção anterior, a exemplo da proteção da armadura por meio da

galvanização, dos inibidores e da resina epóxi, e da proteção superficial do concreto com o uso de pinturas. As demais etapas tratam de métodos envolvidos na retirada do concreto contaminado, como a escarificação, na extração dos produtos de corrosão incrustados nas barras de aço, exemplificada pela escovação manual, e na limpeza, a exemplo do uso de jatos de água e de ar comprimido. A recomposição da peça pode ser realizada com argamassas de cimento e com *grout*, produtos bastante conhecidos no mercado.

A eficiência do método convencional relaciona-se à remoção de todo o concreto contaminado, evitando a formação de novos ânodos, e à utilização dos materiais adequados ao tipo de reparação e ao ambiente no qual se encontra a estrutura. Desse modo, a utilização dos métodos eletroquímicos na reabilitação de estruturas reflete, geralmente, em soluções mais eficazes do ponto de vista econômico e de controle da corrosão (LOURENÇO, 2014).

3.2.2 Métodos eletroquímicos

As técnicas eletroquímicas podem ser utilizadas como método preventivo ou na reparação no que diz respeito ao processo de corrosão das armaduras. A aplicação desse método prevê a injeção de fissuras, remoção de uma fração do concreto danificado e execução de reparos no local, a fim de restaurar a integridade e a geometria da estrutura após a intervenção. Após a recuperação, podem ser aplicadas as técnicas eletroquímicas com o uso equipamentos especializados. As técnicas eletroquímicas podem ser divididas em: proteção catódica, realcalinização eletroquímica e extração de cloretos (REUS, 2017).

a) Realcalinização

O tratamento por realcalinização é um método aplicado temporariamente para restabelecer as condições de alcalinidade do concreto, com o intuito de atingir a possível repassivação da armadura, de modo que não haja uma destruição significativa da estrutura (FERREIRA *et al.*, 2017). A realcalinização eletroquímica consiste na aplicação de corrente elétrica contínua, com a armadura do concreto agindo como cátodo (polo negativo) e uma malha metálica externa atuando como ânodo (polo positivo), induzindo a produção de OH⁻, ao nível das armaduras, o que eleva o pH a valores acima de 13,5, levando a zona realcalinizada a condições de passivação por períodos duradouros (LOURENÇO, 2014). A realcalinização química fundamenta-se na condução de íons por absorção e propagação de soluções alcalinas para a porção interior do concreto. De modo contrário à realcalinização eletroquímica, essa técnica não requer um campo elétrico, com a elevação do pH ocorrendo de fora para dentro (REUS, 2017).

Em estudo realizado por Reus (2017), observou-se que soluções de hidróxido de potássio (KOH), comercial, tripla e hidróxido de sódio (NaOH) apresentaram boa eficiência na realcalinização química de concretos carbonatados por meio da imersão e do método de manta. Entre essas, a que se mostrou com maior velocidade foi a solução de KOH. A ineficiência da realcalinização de pilares com a manta em uma estrutura real decorre da dificuldade de manter a solução distribuída uniformemente na superfície do concreto, porém é um método promissor, necessitando de ajustes a fim de sanar essa dificuldade, tendo em vista a sua aplicação em estruturas reais. De um modo geral, os resultados obtidos em laboratório foram mais eficientes que os encontrados em campo. A autora ainda destaca a importância do uso de EPIs nessas aplicações, em razão de risco de queimaduras decorrentes da elevada alcalinidade das soluções, riscos

de acidentes com o *spray* e utilização de luvas nitrílicas adequadas no emprego da manta no entorno do pilar.

Ferreira *et al.* (2017) analisaram o desempenho do hidróxido de cálcio saturado ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) no processo de realcalinização, sendo os valores de pH apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 ►

pH médio das soluções em função do período de corrosão e etapa dos ensaios.
Fonte: Ferreira *et al.* (2017)

Período de corrosão após a carbonatação	Condições de pH da solução		
	Inicial	Carbonatada	Realcalinizada
7 dias	12,17±0,11	8,84±0,51	12,54±0,16
28 dias	12,14±0,12	8,88±0,41	12,13±0,08
90 dias	12,15±0,06	8,53±0,42	12,08±0,05

Conforme analisado na Tabela 1, o processo de carbonatação implicou na redução do pH, entretanto o uso do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ permitiu restabelecer as condições de alcalinidade apresentadas anteriormente. Ferreira *et al.* (2017) ainda constataram que a concentração dos metais alcalinos não foram indicadores suficientes para a repassivação diante de todos os períodos de corrosão averiguados, sendo observada a repassivação da armadura quando esta foi exposta à carbonatação por um período de até 28 dias. O tratamento também permitiu uma redução dos valores de corrente de corrosão até certos níveis para todos os períodos estudados; contudo, para o período de 90 dias, os patamares de corrente de corrosão ainda permaneceram elevados.

Para esse tipo de tratamento, são utilizadas soluções aquosas de sais de metais alcalinos como eletrólito, sendo mais usados os de sódio ou de potássio. O término do processo de realcalinização é caracterizado com base na medição regular do pH. Ressalta-se ainda que, antes deste tratamento, é necessário reparar as áreas danificadas com material compatível ao original (LOURENÇO, 2014).

b) Dessalinização

A dessalinização é um método também conhecido por extração eletroquímica de cloretos e, de modo semelhante à realcalinização eletroquímica, seu funcionamento baseia-se na aplicação de corrente elétrica contínua, sendo aplicado um cátodo na armadura do concreto e um ânodo externo na superfície de concreto submerso em uma solução eletrolítica.

Esse método compreende processos físico-químicos, como a eletrólise e a eletromigração iônica, responsáveis pela elevação da alcalinidade do concreto e pela atração dos íons cloreto (Cl^- , carga negativa) para o ânodo externo (carga positiva), sendo os íons sódio (Na^+), potássio (K^+) e cálcio (Ca^+) (carga positiva) direcionados para o cátodo (armaduras, carregadas negativamente). Esse processo permite a remoção dos íons do concreto. Os materiais com maior uso nessa técnica são a malha de titânio ativada e malha de aço carbono, sendo a água o eletrólito mais comum. A finalização do processo compreende a análise do teor de cloretos no concreto, a quantidade de carga por unidade de área e razão Cl^-/OH^- (LOURENÇO, 2014).

4 Conclusões

A partir das pesquisas analisadas, é possível inferir que o estudo das técnicas de prevenção e de recuperação de estruturas de concreto armado relacionadas à corrosão das armaduras fundamenta-se nas condições em que a armadura se encontra e no nível de agressividade ambiental. Essas medidas buscam melhorar o desempenho da estrutura e aumentar sua vida útil.

Entre as técnicas elencadas, existem as que podem ser aplicadas no concreto, no seu interior ou na sua superfície, como os inibidores de corrosão, e aquelas que são usadas diretamente na armadura. Os métodos empregados no concreto buscam impedir a invasão de agentes agressivos que possam despassivar o aço ou mesmo iniciar o processo corrosivo, a exemplo do gás carbônico (CO₂), íons cloreto, água e oxigênio. Esse efeito pode ser observado na diminuição da taxa de migração de cloretos, redução do índice de vazios, mas também podem atuar na redução do potencial de corrosão e no aumento da resistividade elétrica.

O uso do tratamento superficial requer a aplicação do material adequado para cada situação, devendo o produto impedir a invasão de agentes agressivos, mas permitir a saída do vapor de água, a fim de não prejudicar a aderência do revestimento. Assim, essa análise permitiu direcionar o uso do material segundo a sua aplicabilidade, não sendo, por exemplo, viável aplicar o revestimento epóxi em ambientes com exposição aos raios solares, tendo em vista sua facilidade de degradação frente a essa circunstância.

A utilização de armaduras especiais surge como outra alternativa, porém a eficiência das armaduras revestidas com epóxi, por exemplo, relaciona-se diretamente à capacidade do revestimento em aderir corretamente à armadura e manter uma boa aderência com o concreto, devendo cobrir de modo uniforme a armadura e com espessura adequada. A aplicação dessa técnica pode atuar de forma conjunta com o aço galvanizado, conferindo maior proteção à armadura, o que permite inferir que pode ser analisado o uso de diferentes técnicas simultaneamente, a fim de encontrar produtos cada vez mais eficientes.

A armadura em aço inox é mais indicada para estruturas expostas a ambientes de elevada agressividade ambiental, tendo como vantagens maior resistência à corrosão que o aço galvanizado, além de não sofrer com falta de aderência e não ficar suscetível a falhas no revestimento tal qual o epóxi. Apesar do custo mais elevado, as armaduras não metálicas, como as de fibra de vidro e fibra de carbono, também são usadas.

A proteção catódica é uma técnica que pode ser utilizada tanto na prevenção quanto na recuperação de estruturas de concreto armado submetidas ao processo de corrosão. No que diz respeito à prevenção seu uso é mais viável, tendo em vista que, para a recuperação, é necessário que o ânodo de sacrifício tenha contato direto com a armadura, sendo dificultada sua instalação nesse caso. Como método de recuperação, trata-se de uma técnica capaz de diminuir um processo de corrosão em curso.

As técnicas de recuperação dividem-se em método tradicional e métodos eletroquímicos. Para o primeiro, é necessário ter o cuidado de remover todo o concreto contaminado e promover sua substituição por um concreto novo, não sendo indicado seu uso no caso de contaminação por cloretos. Para estruturas contaminadas por cloretos, podem ser utilizados os métodos eletroquímicos e a reparação localizada; no caso de estruturas carbonatadas, a reparação convencional e a realcalinização.

De modo geral, a forma mais eficaz no tratamento de estruturas de concreto armado submetidas ao processo de corrosão relaciona-se à adoção de técnicas preventivas. Essa prevenção dá-se a partir de um projeto e uma execução de qualidade, respeitando as normas

que fundamentam esse tipo de estrutura. Essa constatação não diminui a importância do estudo dos métodos de recuperação, tendo em vista a necessidade de reabilitar estruturas que se encontram contaminadas ou com o processo de corrosão em curso.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

O autor declara não haver conflito de interesses.

Referências

ARAÚJO, A.; PANOSSIAN, Z.; LOURENÇO, Z. Proteção catódica de estruturas de concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 6, n. 2, p. 178-193, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952013000200002>.

CÂNDIDO, T. G.; MEIRA, G. R.; ABREU, M. S. D. Avaliação do processo de corrosão em armaduras comuns e galvanizadas. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 51, p. 148-157, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2020v1n51p148-157>.

CEDRIM, F. A.; ALMEIDA, V. L. S.; SOUZA, C. A. C.; JESUS, M. D.; RIBEIRO, D. V. Efeito da eletrodeposição de zinco e da liga zinco-níquel na corrosibilidade das armaduras de concreto armado. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 4, p. 595-616, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000400008>.

DIETRICH, Y. P.; TELES, C. R.; VIEIRA, G. L. Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais. **Revista Matéria**, v. 22, n. 4, e-11891, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0225>.

FERREIRA, P. R. R.; MEIRA, G. R.; BARBOSA, D. C.; CARVALHO, M.; ANDRADE, J. Influência do grau de corrosão das armaduras na eficiência do método de realcalinização para tratamento de estruturas de concreto carbonatadas. **Revista Holos**, v. 7, n. 7, p. 69-80, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.15628/holos.2017.5735>.

FIGUEIREDO, C. P.; SANTOS, F. B.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CACHIM, P.; VELOSA, A. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra ação deletéria de cloretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, p. 685-708, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952014000400008>.

GJORV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HECK, A. F. **Análise da viabilidade do uso de benzoato e molibdato como inibidores de corrosão em estruturas de concreto armado**. 2018. 97 f. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2018. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/riu/4887>. Acesso em: 3 abr. 2022.

HELENE, P. Introdução. *In*: RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. (org.). **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 2-12.

LIMA, E. E. P. **Concreto auto adensável produzido com resíduo de polimento de porcelanato – comportamento em relação à corrosão das armaduras**. 93 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/9116>. Acesso em: 3 abr. 2022.

LOURENÇO, M. Z. Técnicas eletroquímicas para reabilitação de estruturas. *In*: RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. (org.). **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 223-245.

LOURENÇO, M. Z.; SOUZA, C. A. C. Métodos de proteção e aumento da durabilidade do concreto armado. *In*: RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T. LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. (org.). **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 119-170.

MARTINS, A. M. **Transporte de cloretos em concretos com adições minerais e o desempenho em relação à corrosão das armaduras**. 2016. 166 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/7887>. Acesso em: 4 abr. 2022.

MEDEIROS, M. H. F.; CASTRO-BORGES, P.; ALEIXO, D. M.; QUARCIONI, V. A.; MARCONDES, C. G. N.; HELENE, P. Reducing water and chloride penetration through silicate treatments for concrete as a mean to control corrosion kinetics. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 7, p. 9682-9696, 2012. Disponível em: <http://www.electrochemsci.org/papers/vol7/71009682.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: Editora IFPB, 2017. 130 p. Disponível em: <http://editora.ifpb.edu.br/index.php/ifpb/catalog/book/81>. Acesso em: 4 abr. 2022.

MESQUITA, T. J.; CHAUVEAU, E.; MANTEL, M.; KINSMAN, N.; NOGUEIRA, R. P. Influence of Mo alloying on pitting corrosion of stainless steels used as concrete reinforcement. **Revista Escola de Minas (REM)**, Ouro Preto, v. 66, n. 2, p. 173-178, abr.-jun. 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672013000200006>.

NERI, K. D. **Avaliação do teor crítico de cloretos em concreto armado com adição de sílica e metacaulim através dos ensaios acelerados induzidos por campo elétrico e magnético**. 2015. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/325>. Acesso em: 4 abr. 2022.

NUNES, M. C. **Análise de desempenho dos métodos de recuperação de estruturas de concreto armado diagnosticadas com corrosão de armaduras**. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-A9SPA4>. Acesso em: 4 abr. 2022.

NUNES, P. T. T. B. **Estudo de revestimentos inorgânicos com inibidor de corrosão aplicado na superfície do concreto**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12718>. Acesso em: 4 abr. 2022.

OLIVEIRA, M. C. C. **Efeito da adição de cal em argamassa na resistência à corrosão de armaduras de aço carbono e galvanizadas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-9BNF7L>. Acesso em: 4 abr. 2022.

PEREIRA, P. C. A. **Efeito inibidor dos ânions carboxilato e benzoato na corrosão de estruturas de concreto armado**. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/riu/784>. Acesso em: 4 abr. 2022.

REUS, G. C. **Recalcalinização química como meio de recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas**. 2017. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/49113>. Acesso em: 4 abr. 2022.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Análise da difusão de cloretos no concreto contendo lama vermelha. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 137-152, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952012000200002>.

SANTOS, M. O. **Estudo de concretos com adição de nanosilica submetidos à ação combinada de cloretos e CO₂**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11762>. Acesso em: 4 abr. 2022.

TREVISOL, C. A.; SILVA, P. R. P.; PAULA, M. M. S.; PELISSER, F. Avaliação de inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado. **Revista Matéria**, v. 22, n. 4, e-11904, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620170004.0238>.

TRINDADE, E. C. **Corrosão acelerada por imersão modificada (ensaio CAIM) de estruturas de concreto armado contendo cinza de casca de arroz e água de mandioca brava**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/riu/760>. Acesso em: 3 mar. 2022.

VOSGERAU, D. S. R.; ROMANOWSKI, J. P. Estudos de revisão: implicações conceituais e metodológicas. **Revista Diálogo Educacional**, Curitiba, v. 14, n. 41, p. 165-189, jan.-abr. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.7213/dialogo.educ.14.041.DS08>.