

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO EMPREGADOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO CARBONATADA

Ramon V. Ramos, Maria Teresa G. Barbosa* e Antônio E. Polisseni

Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil

Palavras-chave: Carbonatação, Concreto, Corrosão de Armaduras, Técnicas de Reparo.

Resumo. A carbonatação é uma das manifestações patológica mais estudadas pois, é uma das responsáveis pela a deterioração das estruturas de concreto armado, comprometendo a sua durabilidade, segurança e vida útil. Existem algumas técnicas de proteção e/ou recuperação dessa anomalia, tais como realcalinização eletroquímica, proteção por barreira, proteção por inibição e proteção catódica. Este trabalho tem como objetivo apresentar, através de uma revisão bibliográfica, uma comparação entres estas técnicas focando nos quesitos de sustentabilidade, durabilidade, manutenibilidade, custo e restrição de cada método. Como resultado espera-se que este trabalho auxilie na escolha da técnica de reparo/proteção a ser utilizada já que a escolha da técnica de recuperação ou de proteção tem que ser feita de acordo com o meio que a estrutura está exposta, o custo e a longevidade que a técnica proporcionara. Portanto, esses indicadores são considerados neste trabalho de forma auxiliar os profissionais.

Endereços de e-mail: ramon.ramos@engenharia.ufjf.br, teresa.barbosa@engenharia.ufjf.br*,
aepolisseni@gmail.com.

ANALYSIS OF THE SUSTAINABILITY OF PROTECTION SYSTEMS EMPLOYED IN CARBONATE CONCRETE STRUCTURES

Keywords: Carbonation, Concrete, Corrosion of Reinforcement, Repair Techniques.

Abstract. Carbonation is one of the most studied pathological manifestations because it is one of those responsible for the deterioration of reinforced concrete structures, compromising their durability, safety, and service life. There are some techniques for protection and/or recovery of this anomaly, such as electrochemical re-alkalinization, barrier protection, inhibition protection and cathodic protection. This work aims to present, through a literature review, a comparison between these techniques focusing on sustainability, durability, maintainability, cost, and restriction of each method. As a result, it is expected that this work will help in the choice of the repair/protection technique to be used, since the choice of the recovery or protection technique must be made according to the environment to which the structure is exposed, the cost and the longevity that the technique will provide. Therefore, these indicators are considered in this work to assist professionals.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto estão sujeitas a variadas formas de degradação, quanto mais agressivo o ambiente mais anomalias tendem a surgir, provocando perda de funcionalidade, comprometimento da vida útil e segurança. E uma das principais manifestações patológicas que acometem as estruturas de concreto é a carbonatação, que é uma das responsáveis pela corrosão das armaduras [8].

A carbonatação é um processo que fatalmente acaba ocorrendo com o concreto ao longo do tempo e, por si só, não prejudica o concreto, entretanto é prejudicial às barras de aço existentes no concreto armado [6]. Usualmente é definida como um processo físico-químico entre o gás carbônico (CO₂) presente na atmosfera e os compostos da pasta de cimento, que resulta na diminuição do pH do concreto (cimento), uma vez que essa frente percorre toda espessura de cobertura das armaduras, ao atingir as armaduras despassivada, o aço utilizado nas estruturas de concreto armado permitindo o desenvolvimento da corrosão das armaduras e todas suas consequências [17, 20].

No que se refere a alcalinidade do concreto, cabe lembrar que o pH é da ordem 12,5 e 13,5 [8] após a carbonatação o pH atinge aproximadamente um pH igual a 9. Tal fato, altera a condição de estabilidade química da película passivadora do aço; com essa redução e considerando a presença de umidade e oxigênio, a taxa de corrosão tende a aumentar na proporção da disponibilidade de água e oxigênio [6].

É comum a literatura apresentar fatores comuns que são determinantes para velocidade e profundidade da carbonatação que estão relacionados com o meio-ambiente (como por exemplo, concentração de CO₂, umidade relativa do ar e temperatura) e com as propriedades do concreto (como composição química do cimento, relação água/cimento, porosidade, cura do concreto e má execução do concreto) [6].

Nesse contexto, a normalização brasileira recomenda requisitos mínimos que asseguram o bom desempenho das estruturas de concreto em diferentes ambientes de exposição correlacionando com as características do concreto, conforme apresentado na Tabela 1 [7, 9].

Tabela 1: Parâmetros mínimos para concreto considerando a agressividade ambiental [7, 9].

		Classe de Agressividade				
		Fraca	Moderada	Forte	Muito Forte	
Concentração de gás carbônico		< 0,3%	< 0,3%	> 0,3%	> 0,3%	
Concreto Armado	Fator água/cimento	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45	
	Classe de concreto (MPa)	> C20	> C25	> C30	> C40	
	Espessura de cobertura (mm)	Laje	20	25	35	45
		Viga/ pilar	25	30	40	50
Concreto Protendido	Fator água/cimento	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45	
	Classe de resistência (MPa)	> C25	> C30	> C35	> C40	
	Espessura de cobertura (mm)	30	35	45	55	

Diante do exposto constata-se a definição de procedimentos que podem ser adotados para minimizar/controlar a corrosão das armaduras das estruturas de concreto armado em decorrência da carbonatação do concreto, a saber: espessura de cobertura das armaduras adequada à agressividade ambiental, definição do traço, do concreto, boa execução da estrutura, defeitos construtivos. E, ainda, existem procedimentos que protegem e recuperam estruturas carbonatadas.

De maneira geral, algumas técnicas se destacam por serem mais empregadas, a saber: substituição do material, modificação do meio de exposição, interposição de barreira entre o meio e o metal e o fornecimento de energia ao sistema. Como substituição do material cita a utilização dos aços inoxidáveis; na modificação do meio de exposição é citado o desenvolvimento de concretos mais densos e resistentes à entrada de agentes agressivos, bem como a adição de inibidor de corrosão no concreto fresco ou na superfície de elementos existentes. A interposição de barreira entre o meio e o metal é feita pela aplicação de revestimento orgânico na proteção superficial do concreto ou pode ser feita o revestimento da armadura com pintura epoxídica ou por revestimento de zinco [2, 9, 10].

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo trazer uma comparação entre as técnicas que podem ser empregadas para evitar e corrigir a carbonatação no concreto armado, processo que pode levar à corrosão da armadura. As técnicas abordadas consistem na realcalinização eletroquímica, na proteção por barreira, na proteção por inibição e na proteção catódica. As análises dos dados consistem numa compilação de resultados obtidos em estudos efetuados onde é avaliado os indicadores de desenvolvimento sustentável, ambiental, social e econômico.

2 CARBONATAÇÃO

O processo da carbonatação acontece por etapas inicia com penetração do CO_2 no concreto [2], em contato com água dos poros presente na pasta de cimento ele é dissolvido e produz o CO_3^{2-} conforme apresentado na Eq. (1). Ocorre também a dissolução do Ca(OH)_2 na hidratação do cimento Eq. (2), uma vez que água presente nos poros do concreto tem alta alcalinidade (pH entre 13 e 14) devido hidroxilas e, íons Ca^{2+} ; após estes processos, acontecerá uma reação entre os álcalis de cálcio, provenientes da dissolução Ca(OH)_2 e o íon carbonato vindo do CO_2 gerando o carbonato de cálcio Eq. (3), produto que é responsável por diminuir a alcalinidade do concreto, pois possui pH em torno de 9.



De forma resumida, a carbonatação acontece pela reação química do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , oriundo da hidratação do cimento, com o gás carbônico (CO_2), formando o carbonato de cálcio (CaCO_3) que reduz o pH do concreto. Como as armaduras inseridas nas estruturas são protegidas por uma camada de concreto de cobrimento onde está presente uma camada de óxido passivo contra a corrosão, há, portanto, proteção física das armaduras, a proteção química decorre da alcalinidade da solução do concreto [10].

Com a diminuição da alcalinidade do concreto, a espessura de cobrimento do concreto/armadura perde a função de ser uma proteção/ barreira física e química, ocorrendo a ruptura da película passivadora do aço e com a presença de umidade e oxigênio resulta-se na corrosão “generalizada” da armadura [2, 6, 22]. Segundo a NBR 6118 [7], no item 6.3.3.1, “... a despassivação por carbonatação ocorre devido presença do gás carbônico da atmosfera sobre o aço e as formas minimizar este efeito é o controle da fissuração e o cobrimento das armaduras” sendo assim, recomenda, a adoção de concretos de baixa porosidade. A carbonatação tem relação direta com a porosidade e a permeabilidade do concreto, pois a penetração do CO_2 na estrutura se dá pelo mecanismo de difusão [24].

Diante do exposto, verifica-se que os fatores determinantes para ocorrência desse fenômeno consistem em:

- condições de exposição: está diretamente relacionado com a concentração de CO₂ na atmosfera, umidade relativa do ar e temperatura. Assim, concreto localizado em ambientes com maiores concentração de gás carbônico, como zonas urbanas e zonas industriais, apresentam maiores profundidades carbonatadas [2]. Mas a ação do gás carbônico ocorre também em ambientes rurais, onde o teor de gás carbônico é próximo de 0,03%. A concentração de CO₂ pode variar de 0,03 em ambientes rurais e até 1,2 para atmosferas de ambientes urbanos. A difusão de CO₂ nos poros do concreto se dá pela diferença de concentração entre os meios internos e externos. Alguns autores [2, 6, 18] afirmam que para ensaios de aceleração de carbonatação, nem sempre alto teores de CO₂ na câmara resultam em uma maior velocidade de carbonatação, a propriedade aumenta com o acréscimo de gás carbônico até determinada concentração, mas não se tem um consenso de qual seria esse teor. Destaca-se que os resultados de diversos estudos apresentam alterações nas reações químicas envolvidas no processo, distorcendo os resultados;
- umidade relativa do ar: para ocorrência da carbonatação é necessário que exista água disponível nos poros do concreto, por isso a umidade relativa do ar influencia diretamente esse processo. Em condições de baixa umidade (em torno de 50%), o CO₂ penetra nos poros vazios do concreto, porém não ocorre a solubilização devido à baixa quantidade de água, e em condições de saturação de água nos poros (umidade acima de 95%) a carbonatação também será menor, pois a difusão de gás carbônico é menor. Para os autores [2, 6, 18] os valores de umidade relativa do ar para ocorrência da carbonatação está compreendido entre 50% e 85%;
- temperatura: segundo a literatura, temperaturas normais entre 20 °C e 40 °C, a não há influência no processo de carbonatação, pois não afeta o processo de difusão do gás carbônico [2, 18];
- características do cimento: o tipo e a quantidade de cimento determinam a quantidade de compostos alcalinos disponíveis para reagir com o CO₂. Sendo assim, quanto maior quantidade de material alcalino no cimento, menores serão as profundidades de carbonatação no concreto [2]. Sendo assim, os cimentos que contenham adições de outros materiais (cinza volante, escória de alto-forno) tendem a ter menos resistência à carbonatação [6]. Logo, a composição química do cimento influencia diretamente na profundidade da carbonatação;
- características do concreto: destaca-se influência da relação água/cimento, pois determinará a permeabilidade do concreto, que por sua vez determina a difusão de gás carbônico [2]. Essa relação está ligada diretamente com as características microestruturais do concreto, como por exemplo, a quantidade e o tamanho dos poros, e há uma tendência de afirmar que quanto maior o fator água/cimento, maior é a velocidade de carbonatação), conforme ilustrado na Figura 1 e Tabela 2;
- qualidade da produção do concreto: as falhas que poderão ocorrer durante a execução das estruturas de concreto armado (transporte, lançamento, adensamento e cura) podem causar alterações favorecendo o surgimento de fissuras, segregação dos materiais, perda da massa de cimento, o que facilitará a difusão do CO₂ no interior do concreto. A cura do concreto interfere na microestrutura e, conseqüentemente, as variações decorrentes desse na velocidade de carbonatação. Sendo assim, quanto maior o tempo de cura, menor será a profundidade de carbonatação pois é minimizado a retração do concreto e é obtido um melhor grau de hidratação [18].

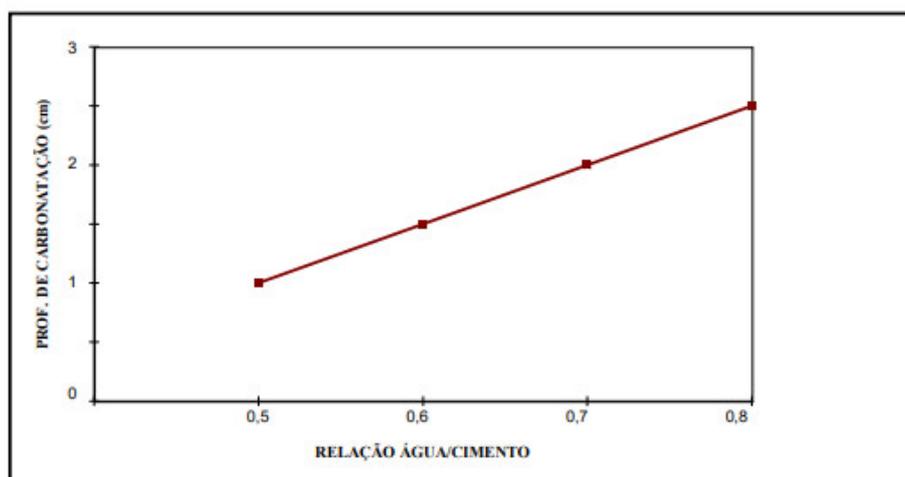


Figura 1: Influência da relação água/cimento sobre a profundidade da carbonatação [6]

Tabela 2: Fatores que influenciam na velocidade da carbonatação [6]

Fatores condicionantes		Características Influenciadas
Condições de exposição	Concentração de CO ₂	Mecanismo físico-químico
		Velocidade de carbonatação
	Umidade relativa do ar	Grau saturação dos poros
		Velocidade de carbonatação
	Temperatura	Velocidade de carbonatação
	Características do clínquer	Porosidade da pasta carbonatada
	Teor de adições	Reserva alcalina
	Traço	Porosidade
	Defeitos	Porosidade
Cuidados com a cura	Grau de Hidratação	

3 TÉCNICAS DE PROTEÇÃO E REPARO EMPREGADAS EM CONCRETOS CARBONATADOS

3.1 Realcalinização eletroquímica

A realcalinização eletroquímica é uma técnica que consiste na elevação do pH do concreto, permitindo o controle da carbonatação do concreto numa fase precoce, reduzindo os custos da intervenção e prolongando a vida útil das estruturas [6].

O procedimento consiste na passagem de uma corrente elétrica pelo concreto até a armadura, processo eletro-osmose, onde os fluidos são movidos através dos poros pela carga elétrica. Com a aplicação da corrente externa, a armadura funciona como cátodo, produzindo através da eletrólise da água hidrogênio e hidroxila, assim a solução alcalina é transportada para o interior do concreto, formando um ambiente alcalino. O processo é exemplificado pela Figura 2.

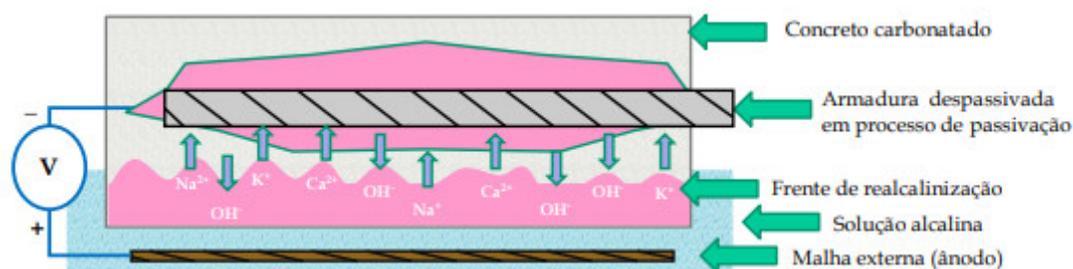


Figura 2: Princípio da Realcalinização Eletroquímica [6]

Com aplicação dos álcalis da solução alcalina na superfície carbonatada do concreto, este adentra para o interior do concreto através da corrente elétrica, formando um campo elétrico entre o concreto e a armadura. Geralmente é usado uma malha metálica externa, geralmente aço ou titânio, que funciona como anodo, e uma solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3) como eletrólito, que através do fluxo eletro-osmótico é transferida para o interior do concreto [6, 11, 19].

O processo é interrompido quando a realcalinização atinge o nível desejado, durando cerca de uma semana depois de iniciado a realcalinização e o resultado é verificado por aspersões de indicadores químicos [6].

A elevação do pH através dessa técnica acontece porque existe uma camada dupla de moléculas interligadas por forças elétricas, nos polos capilares, onde a camada mais interna é fortemente ligada as paredes dos poros e a mais externa é menos intensa; assim, quando é formado o campo elétrico, uma parte da camada se move para um dos polos, extraindo a água livre dos polos, o que proporciona a formação de íons hidroxilas (OH^-) que aumentam o valor do pH [6].

Esta técnica tem como principais vantagens a manutenção do concreto carbonatado e sua correção, ampliação da vida útil da estrutura já que consiste num método efetivo para interromper e prevenir a corrosão provocada pela carbonatação, evitando-se o alto custos de reparos tradicionais, bem como trata de um método rápido além de empregar equipamentos com custos acessíveis, quando comprado aos demais [6, 11, 19], conforme ilustrado na Tabela 3. Como desvantagem cita-se o comprometimento da aderência aço-concreto, possibilidade de reação álcali-agregado e mudanças na microestrutura do concreto.

3.2 Proteção por barreira

A proteção por barreira consiste no uso de revestimentos na armadura através da aplicação de um filme por zincagem (galvanização à quente) ou pintura epoxídica, formando um obstáculo ao acesso de agentes agressivos à armadura já que isola as barras de aço do ambiente [5]. Salienta-se que o que a película de zinco fixada ao aço atua como anodo de sacrifício, sendo corroída no lugar do aço. O processo de zincagem é um processo industrial, onde é feita a imersão dos vergalhões em vários banhos de limpeza da superfície e depois é feita a imersão em um banho de zinco em torno de 450 °C. Após o banho de zinco forma-se camadas de zinco e ferro (Fe), ou seja, a camada externa é formada por zinco e as camadas mais internas são mais rígidas, a Figura 3 mostra as camadas formadas [1, 5].



Figura 3: Camadas de zinco formadas após galvanização [1]

Esse processo é vantajoso, pois forma uma barreira contra a despassivação do aço, oferecendo uma proteção eficiente, aumento a vida útil, reduzindo os riscos de fissuras causadas pelos produtos de corrosão, bem como a desagregação do concreto. Uma questão debatida é o elevado custo inicial desse processo, até por isso não muito difundido no Brasil, [1, 25]. Já a proteção por barreira pelo revestimento epoxídico é obtido pela pintura do aço com uma tinta epóxi em pó (podendo ou não ser flexível), depois é submetida ao aquecimento até a fusão. Esse método é de fácil aplicação, porém é difícil manter a integridade da cobertura da tinta.

3.3 Proteção por inibição

São compostos usados em concentração adequada que tem a capacidade de retardar o processo de corrosão da armadura. O emprego destes aditivos químicos possibilita que a superfície das barras de aço anule ou retardem as reações anódicas, catódicas ou ambas, resultando, portanto, em três tipos de inibidores [13].

Os inibidores anódicos são aqueles que atuam controlando as reações e formam uma película de óxido de ferro sobre a superfície metálica, fazendo com que a superfície do metal fique na faixa de passivação, reduzindo a velocidade de corrosão, podemos citar como exemplo: nitrito de sódio, nitrito de cálcio, molibdato de sódio, molibdato de amônia, dentre outros. Já os catódicos diminuem a reação catódica deslocando o potencial de corrosão para direção mais negativa. Os íons metálicos quando reagem com a hidroxila formam compostos insolúveis na área catódica, impedindo a difusão de oxigênio e a reação catódica, como exemplos cita-se: sulfitos, sais de Ca e Mg, dentre outros. E, finalmente, os mistos provocam variações pequenas de deslocamento para as duas direções, como aminoálcool, base amina e outros [24].

Os inibidores de corrosão mais usados são a base de nitrito de cálcio e nitrito de sódio e os orgânicos principalmente os de base de amina [12, 13]. A aplicação dos inibidores de corrosão é feita na água de amassamento do concreto, em pequenas quantidades, devendo-se controlar ao máximo a homogeneidade da mistura e sua dosagem [12, 13, 24].

As vantagens da aplicação desse método de proteção, é a facilidade de uso, não precisando de mão de obra especializada; o baixo custo quando comparado a outras soluções. Mas há de ser cuidado, pois adicionados em dosagens inadequadas ou em misturas muito permeáveis, facilita a entrada dos agentes agressivos, e usar grandes quantidade de inibidores anódicos favorece o quadro de deterioração sendo necessário utilizar a dosagem certa, para não favorecer a corrosão [12, 13, 26].

3.4 Proteção catódica

A proteção catódica é uma técnica que pode tanto evitar a corrosão prematura como diminuir um processo corrosivo em curso e consiste em injetar corrente elétrica na estrutura do concreto, para situar o potencial da interface concreto/ armadura para valores abaixo do potencial de corrosão. Existem dois tipos de sistema de proteção catódica: por corrente impressa – mais utilizada em estruturas suscetíveis a cloretos; e corrente galvânica – mais usada para reparos [21, 23]. Basicamente a diferença entre as duas consiste no tempo de aplicação e na densidade da corrente aplicada. Os procedimentos possibilitam mudar a interface concreto-armadura diminuindo o potencial natural de corrosão [4, 6].

Tanto método da proteção catódica por anodo de sacrifício como por corrente é necessário conhecer as características da estrutura e as condições ambientais. Não é comum a aplicação da técnica em ambientes de alta agressividade, sendo adotados maiores espessuras de cobrimento para as armaduras e outras soluções e, no caso de estrutura são usadas técnicas tradicionais de recuperação [4].

No método por corrente a corrente é fornecida por imposição de tensões elétricas geradas por uma fonte externa, o processo é controlado por sistema de controle e monitoração, para retificar corrente alternada, o polo positivo é conectado a um anodo e o polo negativo na armadura, conforme ilustra a Figura 4. Os anodos têm o objetivo de dispersar a corrente elétrica no eletrólito sendo embutido no concreto ou aplicado na sua superfície; a grande vantagem desse método é que a corrente geradora pode ter a potência necessária para proteção do sistema [4, 15, 21, 23].

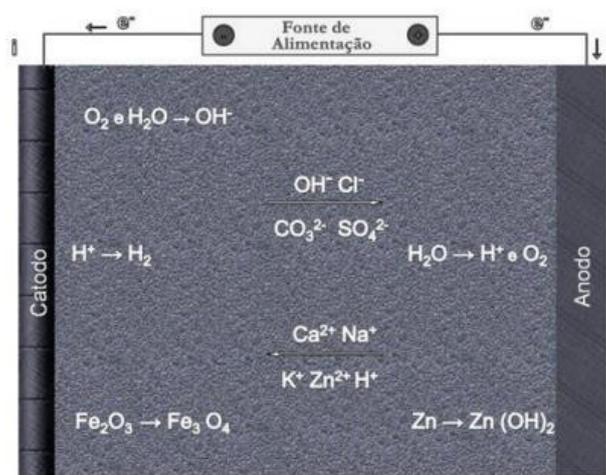


Figura 4: Representação esquemática da proteção catódica por corrente impressa [4]

Na proteção galvânica ou de anodo de sacrifício, a corrente elétrica é criada pela diferença de potencial entre a armadura a se proteger e outro metal escolhido como anodo. O meio deve apresentar condutividade elétrica constante para que a circulação de corrente elétrica ocorra em estruturas de concreto, essas condições acontecem quando a estrutura está imersa ou com grande umidificação. Esse método tem como maior eficiência o reparo, pois pode retardar a corrosão no local e inibir o aparecimento em áreas próximas. O anodo de sacrifício perde massa no lugar do anodo protegido, no caso as armaduras. Uma das desvantagens desse método é reposição de anodos e interferências na corrente [4, 15, 23]. A Figura 5 representa este processo.

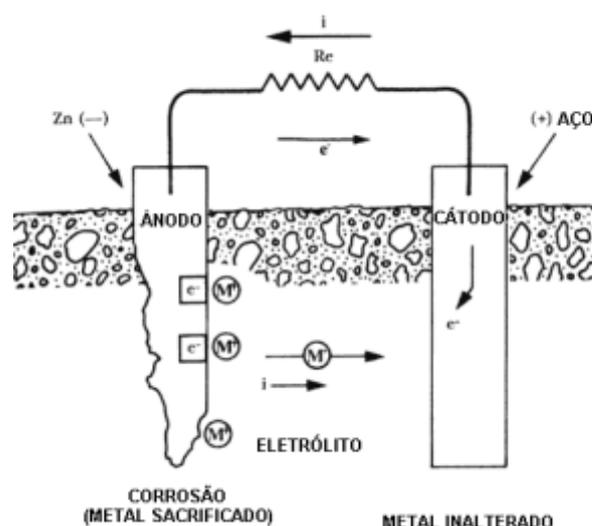


Figura 5: Representação da proteção catódica galvânica [24]

As duas técnicas são mais usadas quando as estruturas são atacadas por íons sendo a por corrente mais usada. As vantagens da galvanização são: facilidade de instalação e baixo perigo de falha e, as desvantagens consistem em elevado custo para estruturas maiores, troca dos anodos, rendimento baixo para eletrólitos de alta resistividade. As vantagens da técnica de corrente impressa são: controle fácil da corrente, vida do sistema longa, usada para instalações de grande porte, e as desvantagem: instalação depende de energia elétrica, inspeção regular, custo com energia elétrica.

4 ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DAS TÉCNICAS DE REPARO

Considerando a consolidação do conceito de desenvolvimento sustentável no setor da construção civil, as propriedades dos materiais e componentes empregados, bem como, requisitos como desempenho, durabilidade e vida útil incorporaram uma nova perspectiva. Isso, pois, os fatores técnicos, o desempenho e, conseqüentemente, o aumento na vida útil, reduzir os impactos, uma vez que a durabilidade e a previsão de vida útil assumem dimensões ambientais muito importantes [16].

Nesse contexto, a especificação correta dos materiais é cercada de critérios técnicos de extrema importância, uma vez que causam vários impactos que envolvem tanto a sociedade quando o meio ambiente. A afirmação que os materiais e componentes são melhores, ou que provocam menos impacto necessita não só a avaliação das características físicas, químicas e mecânica do material como, também, uma análise integrada do projeto, da região no qual será implementado, da mão de obra disponível e tantos outros fatores.

Salienta-se que a seleção dos materiais e componentes mais adequados para cada projeto é uma atividade complexa, pois requer variáveis de mercado (custo), aspectos técnicos (propriedades mecânicas, químicos e físicos) e aspectos ambientais. Dada a essa complexidade até mesmo a consideração dos custos durante a fase de uso tem sido negligenciada na maior parte dos projetos. Essa prática elimina a possibilidade de mitigar impactos ambientais e dificulta a implantação de soluções inovadoras [3]. Nesse contexto, a Tabela 3 apresenta uma análise comparativa entre as técnicas apresentadas para reparo em estruturas de concreto armado carbonatadas de forma a possibilitar os profissionais a definir a melhor técnica e ser empregada em cada caso.

Tabela 3: Resumo das técnicas empregadas nos reparos de corrosão de armaduras por carbonatação

Técnica	Vantagem	Desvantagem	Indicadores sustentáveis			
			Ambiental	Social	Econômico	
Realcalinização Eletroquímica	Método não destrutivo Incremento da vida útil Baixo custo Rapidez de execução.	Prejuízo na aderência aço/ concreto Possibilidade de reação álcali-agregado Alterações microestruturais no concreto	Positiva	Positiva	Positiva	
Barreira	Galvanização	Elevado custo	Positiva	Positiva	Negativa	
	Pintura Epoxídica	Fácil aplicação.	Manutenção da homogeneidade da pintura.	Negativa	Negativa	Negativa
Inibição	Fácil aplicação. Incremento da vida útil.	Teor ideal de incorporação do inibidor ao concreto	Positiva	Positiva	Positiva	
Proteção catódica	Corrente Impressa	Fácil manutenção Alta vida útil Baixo custo	Depende de energia elétrica. Indicada para estruturas de grande porte	Positiva	Positiva	Positiva
	Anodo de sacrifício	Fácil instalação e manutenção Baixo custo	Substituição dos anodos. Baixo rendimento	Mediano	Mediano	Positiva

Analisando a Tabela 3 constata-se:

- realcalinização eletroquímica que visa estabelecer a alcalinidade do concreto carbonatado com um tratamento não destrutivo, é um tratamento temporário sem aplicação contínua de corrente elétrica como no caso da proteção catódica. Por ser um método não destrutivo é um método mais sustentável, pois não é correto demolir algo construído com pouca idade, por exemplo. Entretanto requer mão de obra de pessoal qualificado para execução do serviço, bem como poderá ocasionar a perda de aderência entre o concreto e armadura e modificações nas propriedades, mas alguns efeitos destas técnicas ainda não são claros, e os resultados dos estudos precisam ser confirmados;
- proteção por barreira, que possui dois métodos: galvanização que utiliza metais de sacrifício, é por não ser difundida no Brasil, o custo inicial do processo pode ser um dificultado para seleção desse método; e a pintura epóxi, que é um método com fácil aplicação, pode ser considerado uma técnica menos sustentável;
- a proteção por inibição é uma técnica preventiva no aparecimento de corrosão. Geralmente, o inibidor é adicionado a água de amassamento do concreto. Por isso, é uma técnica que não precisa de mão de obra especializada e é relativamente de custo baixo em comparação com as demais. Essa técnica também diminui a questão de manutenção em

estruturas protegidas, e é sustentável, uma vez que prolonga a vida útil e durabilidade da estrutura. Porém não se obtém um consenso no teor ideal de adição e elevadas quantidades pode comprometer as propriedades mecânicas do concreto;

- a proteção catódica apresentada dois procedimentos; por corrente impressa ou por anodo de sacrifício (proteção galvânica), sendo eficaz para evitar a deterioração prematura das estruturas, prolongando a vida útil. Porém, em pesquisas na literatura mostrou-se que essa técnica está sendo mais usada quando a corrosão é causada por íons cloretos já que os custos dependem das condições ambientais de exposição.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado levantamento bibliográfico para melhor entender as técnicas empregadas na proteção e/ou recuperação de concretos armados carbonatados, técnicas que tem como objetivo de que a estrutura resista durante a vida útil projetada, sem que ocorra corrosão das armaduras.

Dentre as técnicas aqui estudadas - realcalinização eletroquímica, proteção por barreira, proteção por inibição e proteção catódica - fica claro que todas são válidas e visam dar uma maior vida útil e uma menor manutenção às estruturas. Em relação à sustentabilidade das técnicas estudadas, pontos positivos e negativos de cada método foi analisado. A proteção por barreira se mostrou bem avaliada, uma vez que tem baixo impacto ambiental e baixo custo. Já para reparo nas estruturas com presença carbonatação, a técnica de realcalinização apresentou indicadores positivos para sustentabilidade.

Como o estudo trata do emprego de técnicas em concretos carbonatados, observou-se que as técnicas de proteção catódica são mais usadas quando o concreto armado é atacado por cloretos, ou seja, uma técnica que talvez não apresente resultados suficientes para efeito de comparação.

Por fim conclui-se, que o processo de escolha da técnica a ser usada para recuperação da estrutura deve ser feito com base em estudos sobre a estrutura, as condições de exposição ao ambiente, condições de instalação, custo e manutenção. Todas as técnicas estão ligadas a questão de sustentabilidade, e tem seus prós e contras, na utilização. Ressalta-se que os processos de galvanização e inibição são usados no processo de proteção, antes ou durante a sua execução.

Agradecimentos

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

REFERÊNCIAS

- [1] L. Abdalla, D. Abagli. *Vergalhão galvanizado: Vantagens, Aplicações e Desempenho em estruturas de Concreto Armado*. In Anais do VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2014.
- [2] D. M. Almeida. *Análise das variáveis que influenciam na carbonatação natural de amostras de laboratório e estruturas de concreto*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil, 2019.
- [3] L. Alves, S. Melhado, F. Vittorino. Selection of building technology based on sustainability requirements - Brazilian context. *Architectural Engineering and Design Management*. 1:1–15, 2014.
- [4] A. Araújo, Z. Panossian, Z. Lourenço. Proteção catódica de estruturas de concreto. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 6(2):178–193, 2013.

- [5] A. Araújo, P. S. Sobrinho, Z. Panossian. Estruturas zincadas por imersão a quente em concreto armado. *Corrosão e Proteção*, 55(12):18–24, 2015.
- [6] F. W. C. Araújo. *Estudo da repassivação das armaduras em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química*. Tese de doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2009.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto – procedimento*. Rio de Janeiro – RJ, 2014.
- [8] C. Bolina, O. Cascudo. Inibidores de Corrosão: Análise da eficiência frente à corrosão do aço induzida por cloretos e carbonatação em meio aquoso. *Engevista*, 15(1):81–94, 2013.
- [9] B. Bolina, P. H. Tutikian. *Patologia de estruturas*. Oficina dos textos, 2019.
- [10] J. R. G. Carmo, M. S. Oliveira, R. M. de Souza. *Estado da arte do processo de carbonatação em estruturas de concreto*. 11ª Jornada Científica e Tecnológica e 8º Simpósio da Pós-Graduação do IFSULDEMINAS, 2019.
- [11] M. R. Carvalho. *Estudo da eficiência da realcalinização na repassivação de armaduras*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, Brasil, 2019.
- [12] K. R. R. Freire. *Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, Brasil, 2005.
- [13] A. F. Heck. *Análise da viabilidade do uso de benzoato e molibdato como inibidores de corrosão em estruturas em concreto armado*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pampa, Alegrete – RS, Brasil, 2018.
- [14] G. F. Henriques, J. C. Tavares, A. D. Terceiro Neto. Carbonatação natural e modelos de previsão para concretos de cimento Portland: uma revisão. *Revista Principia*, 2021.
- [15] V. O. Jacome. *Aplicativo para monitoramento de sistemas de proteção catódica por corrente impressa utilizando dispositivos móveis*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba – MG, Brasil, 2018.
- [16] V. John, V. Agopyan. *O desafio da sustentabilidade na construção civil Brasileira*. Blucher, 2011.
- [17] S. M. Levy. *Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. Tese de doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2001.
- [18] C. Pauletti, E. Possan, D. C. C. D. Molin. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. *Ambiente construído*, 7(4):7–20, 2007.
- [19] A. C. Rachadel. *Realcalinização eletroquímica de matrizes cimentícias carbonatadas: influência do tempo e da densidade de corrente elétrica*. Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – PR, Brasil, 2021.
- [20] P. H. L. C. Ribeiro. *Realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas inseridas no meio urbano: influência de características da estrutura no comportamento do tratamento*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, Brasil, 2009.
- [21] I. Rocha. Corrosão em estruturas de concreto armado. *Ipog Especialize*, 1:10, 2015.
- [22] L. A. Rodrigues; A. C. S. Junior. Carbonatação em estruturas de concreto. *Revista Eletrônica da Faculdade de Alta Floresta*, 8(1):90–107, 2019.
- [23] M. F. S. F. dos Santos, O. C. Longo. Mitigação de reforço estrutural através de proteção catódica. *Research, Society and Development*, 9:10, 2020.
- [24] D. R. da Silva. *Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, Brasil, 2007.

- [25] B. F. Tutikian, T. Hilgert, J. J. Howland. Comparativo da aderência do concreto com aço sem proteção e o aço galvanizado a quente. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 7:321–328, 2014.
- [26] S. B. B. Uchôa. *Inibição de corrosão em concreto armado: eficiência e comportamento do sistema tiouréia/ molibdato de sódio*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, Brasil, 2007.