

Realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas: revisão bibliográfica

Electrochemical re-alkalination of carbonated reinforced concrete structures: a literature review

DOI:10.34117/bjdv8n5-011

Recebimento dos originais: 21/03/2022

Aceitação para publicação: 29/04/2022

Guilherme Alves Correa

Mestrando em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal de Santa Maria

Endereço: Av. Independência, 2293 - Universitário, Santa Cruz do Sul – RS

CEP: 96815-900

E-mail: guilherme.correa@acad.ufsm.br

Isadora Paczek

Mestranda em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal de Santa Maria

Endereço: Av. Independência, 2293 - Universitário, Santa Cruz do Sul – RS

CEP: 96815-900

E-mail: engisadorapaczek@gmail.com

Igor Silveira

Arquiteto e Urbanista

Instituição: Universidade Ritter dos Reis

Endereço: Rua Orfanotrófio, 555, Alto - Teresópolis, Porto Alegre - RS

CEP: 90840-440

E-mail: arq.igorsilveira@gmail.com

Leonardo Azevedo Massulo

Engenheiro Civil, MSc

Instituição: Universidade Federal de Santa Maria

Endereço: Av. Independência, 2293 - Universitário, Santa Cruz do Sul – RS

CEP: 96815-900

E-mail: engmassulo@gmail.com

Daniele Martins

Mestranda em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal de Santa Maria

Endereço: Av. Independência, 2293 - Universitário, Santa Cruz do Sul – RS

CEP: 96815-900

E-mail: engcivildanielemartins@gmail.com

RESUMO

A busca por técnicas econômicas, não destrutivas e ambientalmente corretas para lidar com concretos carbonatados, levou a abordagens corretivas mais conservadoras visando maximizar a quantidade de concreto original que é preservado, desta forma, aplicando-se

a técnica de realcalinização eletroquímica. O tratamento ER ocorre a partir de uma fonte de alimentação externa com um dos polos ligados ao aço (cátodo) e outro ligado a uma malha metálica auxiliar (ânodo), normalmente de titânio ou aço galvanizado, a estrutura deve estar embebida em um eletrólito, sendo comum a utilização da solução de carbonato de sódio. O tratamento visa restabelecer a alcalinidade do concreto em torno das armaduras e em toda a cobertura de concreto. Desta forma, o presente estudo visa abordar uma revisão da bibliografia, compilando diversos estudos sobre realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas.

Palavras-chave:concreto, realcalinização, eletroquímica, carbonatação, durabilidade.

ABSTRACT

The search for economical, non-destructive and environmentally friendly techniques to deal with carbonated concrete has led to more conservative corrective approaches aiming to maximize the amount of original concrete that is preserved, thus applying the electrochemical re-alkalinization technique. The ER treatment occurs from an external power supply with one of the poles connected to the steel (cathode) and the other connected to an auxiliary metal mesh (anode), usually of titanium or galvanized steel, the structure must be soaked in an electrolyte, being common the use of sodium carbonate solution. The treatment aims to restore the alkalinity of the concrete around the reinforcement and throughout the concrete cover. Desta forma, o presente estudo visa abordar uma revisão da bibliografia, compilando diversos estudos sobre realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas.

Keywords: concreto, realcalinização, eletroquímica, carbonatação, durabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas que afeta as estruturas de concreto armado inseridas em ambientes urbanos é a corrosão das armaduras de aço, que ocorre, principalmente, pela ação dos cloretos ou pela carbonatação do concreto. Em ambientes urbanos, distantes da zona marítima, a carbonatação é geralmente a principal responsável pela corrosão. Entretanto, em ambientes urbanos próximos à zona marítima, a carbonatação e a ação dos cloretos podem agir simultaneamente e causar corrosão. Em ambos os casos, muitos são os estudos que tentam avaliar o comportamento do fenômeno de corrosão em função de características dos materiais e do ambiente, com objetivo de estabelecer parâmetros de projeto ou fazer estimativas de vida útil da estrutura (TUUTTI, 1982; HO e LEWIS, 1987).

O concreto é um material alcalino com pH entre 12,6 e 13,6, nessas condições de pH, o aço espontaneamente forma uma camada passiva protetora. No entanto, essa camada passivadora pode ser destruída por agentes agressivos (íons cloreto e/ou dióxido de carbono), causando assim sua despassivação. Especificamente, carbonatação é um

processo em que o CO₂ atmosférico entra em contato com concreto, diminuindo a sua alcalinidade a pH de aproximadamente 9,0 fazendo com que a camada passiva seja desestabilizada o que permite o início do processo de corrosão das barras de aço. A taxa de penetração de CO₂ depende de fatores ambientais e de fatores relacionados ao concreto em si, a umidade relativa é um importante fator, devendo estar entre 50 e 70%, para que ocorra difusão de CO₂, fato que não ocorre de forma completa em concretos secos nem em concretos totalmente saturados.

Para corrigir e/ou prevenir problemas de corrosão em estruturas de concreto, vários métodos de reparo e de proteção têm sido utilizados, tais como a execução de reparos localizados, o uso de inibidores de corrosão, a aplicação de pinturas superficiais sobre o aço e o concreto, a proteção catódica, entre outro. Nos últimos anos, além da proteção catódica, estudos sobre outros métodos eletroquímicos para proteção e reabilitação de estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras têm sido realizados pelo meio científico. Dentre eles, a extração eletroquímica de cloretos (EEC) e a realcalinização eletroquímica (ER) ocupam espaço importante no conjunto de pesquisa realizadas sobre o tema (BANFILL 1996; BETOLINI et al., 1996; ANDRADE et al., 199; MONTEIRO, 2002). No país, alguns trabalhos na área de realcalinização de concretos carbonatados já foram desenvolvidos, porém, utilizando-se principalmente uma técnica alternativa conhecida como realcalinização eletroquímica (ER), cujo mecanismos de realcalinização ocorre por absorção/difusão de soluções alcalinas a partir da superfície dos concretos carbonatados (ARAÚJO, 2004; SÁ, 2006; MOREIRA, 2006; ARAÚJO, 2009).

A realcalinização eletroquímica consiste na aplicação de um campo elétrico entre a armadura da estrutura e uma ânodo externo, na presença de uma solução alcalina, com o objetivo de restabelecer a alcalinidade do concreto perdida com o processo de carbonatação (BANFILL, 1994; ODDENN, 1994). De modo diferente da proteção catódica, é um tratamento de aplicação temporária, que cessa após a realcalinização do concreto de cobrimento. Além disso, não produz uma intervenção destrutiva na estrutura, como ocorre na execução dos reparos localizados.

Embora a ER tenha apresentado eficiência em relação à realcalinização do concreto, a possibilidade de repassivação das armaduras após a aplicação do tratamento ainda é um aspecto em discussão no meio científico. Trabalhos como os de Odden (1994), Andrade et al. (1999) e Yieh et al. (2005) se apresentam favoráveis à repassivação das armaduras, embora os resultados apresentados não possam ser visto como conclusivos.

Por outro lado, trabalhos como os de Gonzáles (2000) e Mirandaa et al. (2003 e 2006) questionam os resultados do tratamento em relação à repassivação da armadura. Outro aspecto importante é que, em alguns estudos realizados sobre a eficiência da repassivação do tratamento, tem-se utilizado apenas a técnica eletroquímica do potencial de corrosão, que por si só, pode não garantir a efetiva repassivação das armaduras. Sendo assim, o mais prudente seria utilizar-se dessa técnica em conjunto com outras técnicas eletroquímicas tais como resistência de polarização e resistividade elétrica, para garantir um monitoramento mais efetivo quanto à repassivação das armaduras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo trata-se da revisão bibliográfica que foi realizada com intuito de fundamentar o presente trabalho. Para facilitar o entendimento sobre a realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado, o capítulo foi dividido em duas seções. Na primeira seção, refere-se ao fenômeno da corrosão das armaduras no interior do concreto. Na segunda seção, refere-se ao tratamento de realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto.

2.1 CORROSÃO ARMADURA DE CONCRETO ARMADO

Para Medeiros et al., (2011), agentes agressivos ao concreto como a chuva ácida ou as reações álcalis-sílica podem danificar o concreto de cobertura, facilitando a entrada de íons. Podendo-se destacar a ação do gás carbônico (CO_2) que reage com o concreto, reduzindo o pH da camada protetora, o que facilita a ocorrência de processo corrosivo na armadura.

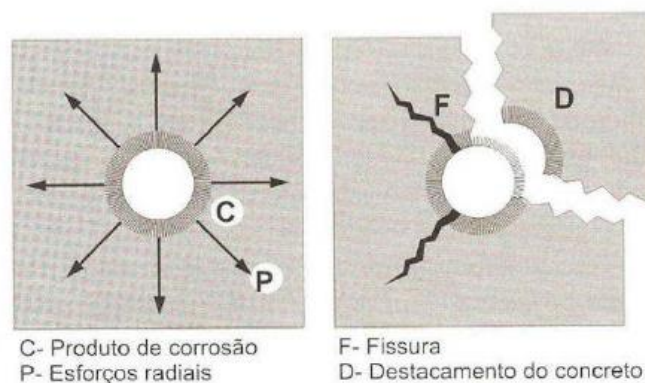
Dentre os mecanismos de deterioração, a corrosão devido à carbonatação ocorre geralmente em estruturas de concreto, principalmente em áreas urbanas, que costumam apresentar alta concentração de dióxido de carbono emitido para o meio ambiente por veículos ou indústrias. A carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono, que está naturalmente presente na atmosfera, penetra na superfície do concreto e reage com os álcalis presentes na pasta de cimento, neutralizando sua alcalinidade, levando a uma diminuição no pH do concreto a valores de 9,0 ou menos. O ambiente alcalino do concreto em torno do aço evita sua corrosão, pois promove a formação de uma fina película passiva na superfície do aço (passivação), quando a carbonatação atinge o aço, esta película protetora é destruída (despassivação) e na presença de oxigênio e umidade, induz a corrosão das armaduras.

A corrosão envolve um mecanismo de dano duplo: por um lado, reduz a seção transversal de aço, causando uma diminuição da resistência à tração da estrutura de concreto armado; por outro lado, ele cria uma expansão volumétrica que leva à fissuração do concreto e em alguns casos ocasionando o deslocamento do cobrimento de concreto.

Segundo Felix et al. (2018), a reação de carbonatação ocorre na superfície do concreto e, com o tempo, progride para camadas mais internas até a armadura, chamada de fase de progressão da corrosão. Na fase de propagação, o hidróxido de ferro se transforma em hidróxido férrico e posteriormente se transforma em óxido férrico hidratado.

O fenômeno de propagação da corrosão é determinado pela taxa de corrosão e a capacidade da cobertura do concreto em suportar tensões internas. O óxido férrico não hidratado possui volume 2 vezes maior que a seção do aço. Já, para o óxido férrico ao hidratar-se, ocorre expansão ainda maior, acarretando no aumento de volume da interface aço-concreto de 6 a 10 vezes. Essa expansão ocasiona fissuração do concreto de cobrimento, facilitando a ação de degradação por agentes externos, conforme ilustrado na Figura 1 (FELIX et al., 2018).

Figura 1. Expansão volumétrica das barras de aço (Felix et al. (2018)).



No caso de corrosão induzida por carbonatação, o dano no concreto geralmente ocorre antes das consequências estruturais, produzindo consequências estéticas como manchas de ferrugem, fissuras, armaduras expostas à corrosão.

2.2 PASSIVAÇÃO DA ARMADURA

As condições alcalinas do concreto proporcionam a formação de uma película passivadora sobre a superfície do aço. Essa película é gerada por uma rápida e extensa

reação eletroquímica onde, em presença de oxigênio, há formação de um filme de óxidos fino e aderente ao aço, formando, na superfície do metal, uma camada protetora (POURBAIZ, 1987 apud MEIRA, 2004). Desde que essa película se mantenha estabilizada e inalterada, por ser densa e impenetrável, ela é suficientemente capaz de evitar a posterior corrosão do aço (BROOMFIELD, 1997).

2.3 INÍCIO E PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO

O fenômeno de corrosão pode ser estudado segundo o modelo de vida útil de Tuutti, nesse modelo a primeira fase é a fase de iniciação da corrosão, na qual a armadura está passiva, porém ocorre o fenômeno da carbonatação ou penetração de cloretos na capa de cobrimento do concreto, o que pode provocar a despassivação da armadura. A segunda fase é a fase de propagação da corrosão que se inicia quando o aço é despassivado e acaba quando um estado limite é atingido, a partir do qual as consequências da corrosão não podem mais ser toleradas (TUUTTI, 1982).

A fase de iniciação depende essencialmente do transporte de agentes agressivos, tais como CO₂ e íons cloretos, para o interior do cobrimento do concreto. Essa fase pode ser estimada como uma função da natureza do ambiente agressivo e do próprio concreto, como o cobrimento, falhas no adensamento, altas relações de água/cimento (porosidade), baixo teor de cimento e condições de cura.

A fase de propagação se caracteriza pelo desenvolvimento das reações de corrosão, as quais podem ser mais ou menos rápidas, em função das variáveis que controlam a cinética das reações, ou seja, disponibilidade de oxigênio, resistividade do meio, entre outros fatores.

Dessa forma, o concreto de cobrimento passa a ter um papel de extrema importância na proteção da armadura frente à corrosão. Segundo Helene (1986), o concreto de cobrimento possui a função de proteção química e proteção física. A proteção química garante a estabilidade da película passivadora da armadura e a proteção física dificulta a entrada de agentes agressivos externos e a sua chegada ao nível da armadura.

2.4 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA (ER)

Essa técnica foi desenvolvida no final da década de 1980 por John Miller, na Noruega e foi patenteada pela Norcure sendo usada principalmente no norte da Europa. A realcalinização eletroquímica (ER) visa restabelecer a alcalinidade do concreto perdida com o processo de carbonatação. Sendo um tratamento temporário e não destrutivo, a ER tem o objetivo de restabelecer a alcalinidade do concreto de cobertura sem romper estruturalmente o concreto velho e sem a aplicação permanente de corrente elétrica, como requerido na técnica de proteção catódica (POLDER e Van den HONDEL, 1992).

Na carbonatação ocorre a diminuição do pH do concreto, que faz com que a camada passivadora em torno da armadura seja prejudicada, ocorrendo então, a corrosão das armaduras. Para tanto, o método busca aumentar o pH do concreto para restaurar e manter a película passivadora. Isso é possível porque durante o processo as reações entre oxigênio criam íons hidroxila na superfície do aço, o que ajuda atingir sua passividade (GOYAL et al., 2018 apud LACHOVICZ, 2020).

Segundo Bertolini (2012), a realcalinização eletroquímica é uma técnica baseada na aplicação de uma corrente catódica contínua no aço do concreto armado, juntamente com uma peça embebida em solução alcalina.

Ribeiro et al. (2013), classificou a realcalinização como um tratamento que ocorre a partir de uma fonte de alimentação externa com um dos polos ligados ao aço (cátodo) e outro ligado a uma malha metálica auxiliar (ânodo), normalmente de titânio. Para esse processo, a estrutura deve estar embebida em um eletrólito, sendo comum neste caso a utilização da solução de carbonato de sódio, para então ser submetida a uma corrente contínua, que varia entre 0,8 e 2 A/m², durante algumas semanas, até que seja possível verificar o retorno da alcalinidade do concreto. Conforme ilustrado na Figura 2 e Figura 3.

Figura 2. Tratamento de realcalinização: (a) configuração ER experimental, (b) amostras com fibra de celulose antes do tratamento ER, e (c) aplicação de ER. (Aguirre et al. (2018)).

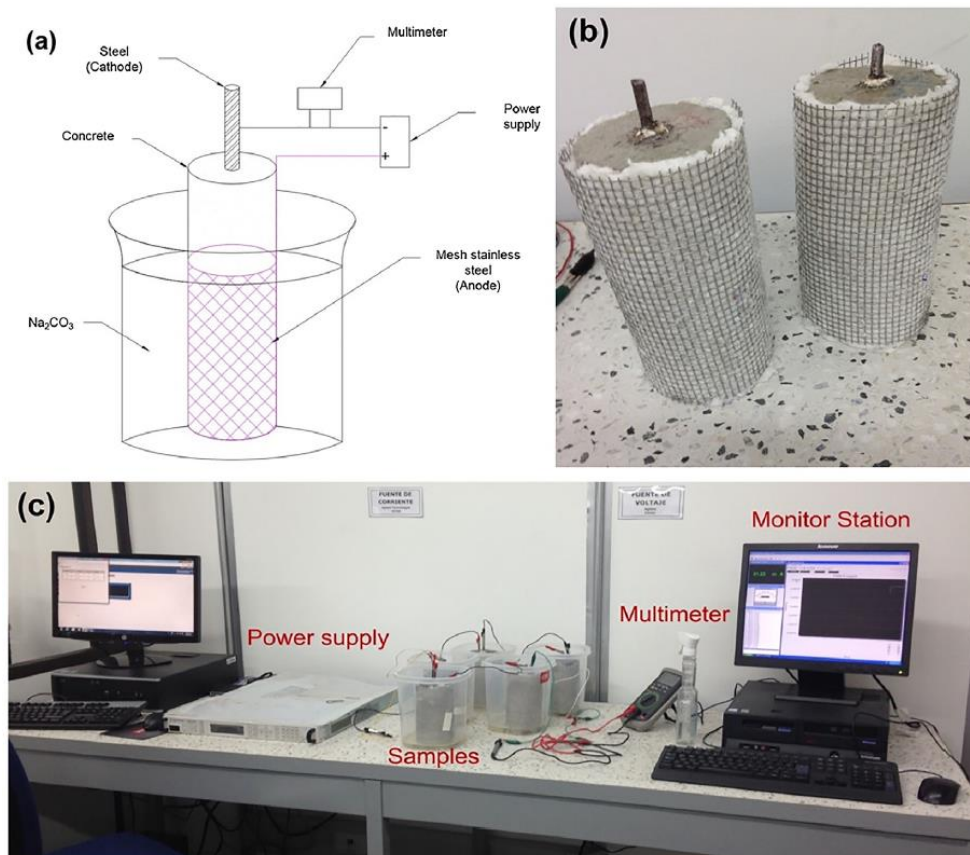
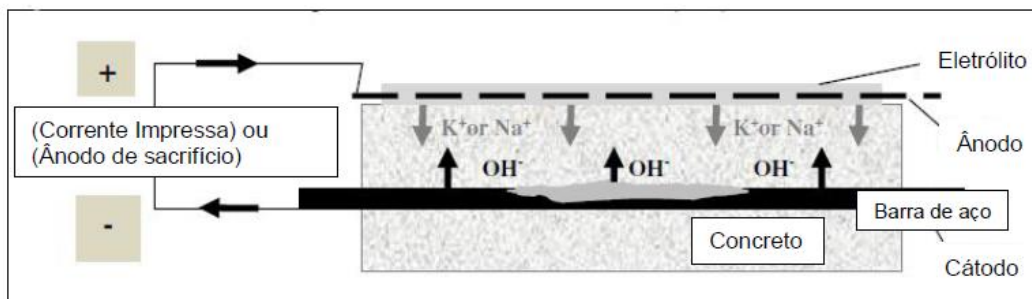


Figura 3. Esquema de realcalinização eletroquímica (Tong et al. (2012)).



Dessa forma, a solução alcalina (carbonato de sódio, lítio ou potássio) migra para o concreto carbonatado enquanto os íons hidroxila são, ao mesmo tempo, produzidos pela eletrólise da água ao redor da armadura. Assim, espera-se que esses fenômenos aumentem o pH e restabeleçam a passividade da armadura (TONG, 2012, apud LACHOVICZ, 2020).

Com a aplicação da corrente externa na armadura, a armadura passa a funcionar como um cátodo, produzindo, através de eletrólise da água, hidrogênio e hidroxila. Assim, a solução alcalina transportada para o interior do concreto carbonatado, em conjunto com as hidroxilas formadas ao redor da armadura, proporcionam um ambiente

alcalino. Embora a produção de hidroxila favoreça aumento do pH do concreto, também pode ocasionar problemas como a fragilização da armadura por hidrogênio e diminuir a aderência existente entre a armadura e o concreto (GONÇALCES, 2003 apud ARAÚJO, 2009).

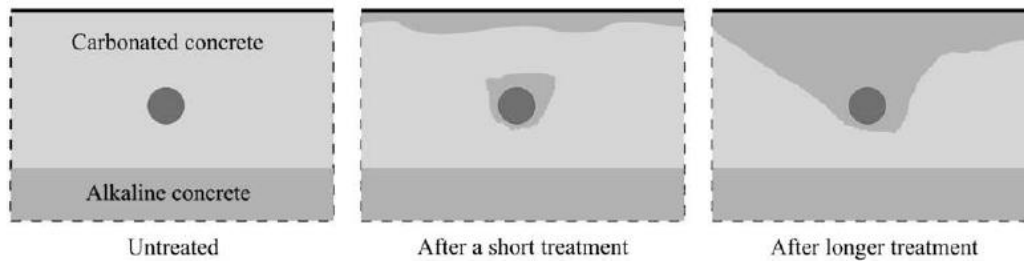
A ER do concreto ocorre em duas direções: Na primeira, do vergalhão em direção à superfície do corpo de prova, como consequência da corrente impressa. Na segunda, da superfície em direção ao reforço, como resultado da penetração do eletrólito. Essas duas contribuições geram duas frentes de realimentação através da cobertura de concreto, que progressivamente tendem a sobreposição. O tratamento de ER geralmente dura cerca de 1 a 3 semanas e é baseado na aplicação de correntes de aproximadamente $1A/m^2$ em relação à superfície do aço (Polder e van den Hondel 1992; Mietz 1995; 1998; CEN / TS 2004).

Caso seja necessário realizar reparos na estrutura antes do início do tratamento, deve-se verificar a existência de continuidade elétrica entre as armaduras de forma a garantir a eficácia da técnica de realcalinização eletroquímica. Caso a continuidade elétrica esteja prejudicada, deve-se estabelecer conexões adicionais entre as armaduras para não ocasionar a formação de macro pilhas de corrosão. Outro cuidado, é quando à continuidade eletrolítica do concreto para estabelecer o circuito de corrente internamente. A existência de fissuras, de concreto desagregado, de ninhos de concretagem ou de outros defeitos, pode comprometer a passagem uniforme do fluxo de corrente. Antes de realizar a realcalinização eletroquímica, deve-se conhecer a espessura do revestimento, pois, uma espessura de revestimento uniforme garantirá a homogeneidade do fluxo de corrente durante o tratamento eletroquímico. Por último, antes de qualquer método eletroquímico de reabilitação, é necessário realizar uma limpeza da superfície do concreto para eliminar qualquer vestígio de poeira ou graxa (GONÇALCES, 2005 apud ARAÚJO, 2009).

A corrente elétrica introduzida no concreto é cessada quando a realcalinização atinge o nível desejado, a verificação é realizada com aspersão de indicadores de pH na superfície das amostras, normalmente utiliza-se fenolftaleína.

A evolução da realcalinização é ilustrada na Figura 4, o concreto inicialmente carbonatado, então, seguindo a aplicação da corrente, regiões alcalinas são formadas em torno das armaduras (devido à reação catódica) e da superfície externa (devido ao transporte do eletrólito alcalino). Conforme o tratamento continua, as regiões alcalinas podem se estender para a espessura total do revestimento de concreto.

Figura 4. Representação esquemática do tratamento de realcalinização eletroquímica(Bertolini et al. (2008)).



O sistema anódico é aplicado na estrutura de concreto apenas durante o tratamento, em seguida, ele é removido, deixando a superfície inalterada. Esta peculiaridade torna o ER particularmente adequado para a conservação de edifícios históricos. É preferível em comparação com a técnica de reparo tradicional não apenas para estruturas de concreto, para as quais as superfícies não devem ser alterado, mas também por problemas estruturais, como pode acontecer com elementos ou quando as sobrecargas não são possíveis.

3 COMPILAÇÃO DE EXPERIMENTOS

Alguns autores realizaram o método da realcalinização eletroquímica em seus experimentos, com variáveis malhas, corrente aplicada e dias utilizados no tratamento. Para tanto, essas informações foram compiladas e apresentada na Tabela 1, as quais foram detalhadas ao longo deste capítulo.

Tabela 1. Compilação de trabalhos realizados sobre realcalinização eletroquímica.

AUTORES	TIPO DE MALHA UTILIZADA	CORRENTE APLICADA	PERÍODO DE APLICAÇÃO
Bertolini et al. (2008)	Aço galvanizado e titânio	0,8 A/m ²	17 dias
González et al. (2011)	Titânio	1 A/m ²	20 dias
Bertolini et al. (2012)	Titânio	0,5 A/m ²	21 dias
Ribeiro eu al. (2013)	Titânio	1 A/m ²	15 dias
Aguirre et al. (2016)	Aço galvanizado	1 A/m ²	15 dias
Aguirre, Guerrero (2018)	Aço inoxidável	1 A/m ²	7, 15 e 21 dias

3.1 TRABALHO DE BERTOLINI ET AL. (2008)

O trabalho busca descrever a restauração dos pilares de concreto armado de uma torre sineira construída na década de 1920, a base da torre é feita de blocos de cimento e tem uma altura de cerca de 40 m. A edificação possui 8 colunas circulares, todas as colunas são ocas, a espessura das faixas de parede de concreto de 55 a 78 mm.

Durante a restauração da torre sineira todos os elementos de concreto armado foram inspecionados visualmente, realizou-se medições de profundidade de carbonatação, potencial de aço e espessura da cobertura de concreto. As estruturas e acabamentos feitos de concreto armado mostraram claramente sinais de danos, principalmente devido à corrosão das barras de aço e subsequente deslocamento da cobertura de concreto, em particular as colunas mostraram vários pontos onde a corrosão das armaduras danificaram o concreto.

Em primeiro lugar, as conexões elétricas com os vergalhões foram preparadas, aproveitando os locais onde a superfície já estava danificada para evitar maiores danos ao concreto. Uma pequena placa de aço foi soldada ao reforço. Também um eletrodo de titânio ativado foi colocado nas proximidades de um vergalhão; este eletrodo foi usado como referência para o potencial medições durante o tratamento. A cobertura de concreto foi reparado com argamassa alcalina apenas nos locais onde estava danificado ou rachado.

Em seguida, o sistema anódico foi aplicado. A superfície a ser tratada foi coberta com uma camada de polpa de celulose embebida com uma solução de Na_2CO_3 1 M, envolvida com a malha anódica, coberto com outra camada de polpa de celulose e finalmente selado com um filme plástico.

O tratamento foi realizado com uma densidade de corrente de $0,8 \text{ A/m}^2$ no que diz respeito à superfície do aço, aplicado por 3 semanas. Durante o tratamento a polpa de celulose foi mantida úmida, adicionando-se a solução alcalina dentro do filme plástico. A Figura 5 mostra uma visão geral das colunas durante a aplicação do tratamento preliminar.

Figura 5. Aplicação do sistema anódico (Bertolini et al. (2008)).



Depois da interrupção da corrente, o sistema anódico foi removido. Então foi realizado teste com fenolftaleína em vários núcleos de concreto que foram retirados de ambas as colunas, conforme a Figura 6.

Figura 6. Teste de fenolftaleína em um núcleo de concreto retirado da coluna após o tratamento preliminar (Bertolini et al. (2008)).



O monitoramento realizado ao final de ambas as aplicações completas de realcalinização eletroquímica mostrou que o tratamento foi bem-sucedido, uma vez que o concreto foi alcalino em todos os pontos onde sua alcalinidade foi verificada. Também as medições de parâmetros elétricos, como o controle potencial de forçamento durante e após o tratamento, mostrou as tendências típicas esperadas após a aplicação de um forte catódico polarização, ou seja, o potencial atingiu valores muito negativos durante o tratamento e, após desligar a corrente, aumentou para valores mais altos após a despolarização do aço. Pode, portanto, pode-se concluir que após o tratamento o concreto em contato com o reforço era alcalino, promovendo sua proteção contra corrosão. Espera-se que esta proteção opere por pelo menos várias décadas.

3.2 TRABALHO DE GONZÁLEZ ET AL. (2011)

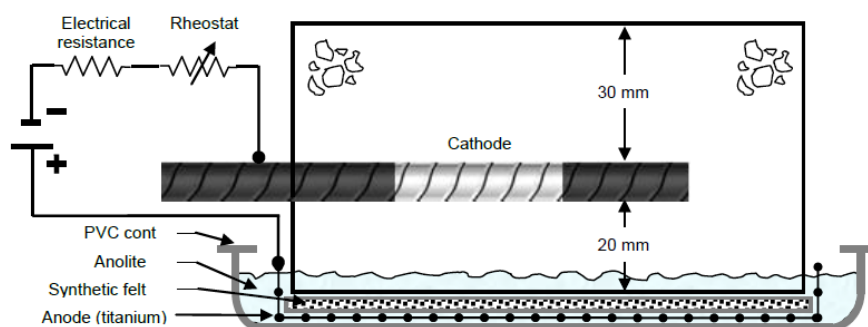
O artigo busca analisar o efeito do carbonato de sódio (Na_2CO_3) e do carbonato de potássio (K_2CO_3) anólito utilizado na ER de concreto parcialmente carbonatado. A influência do tipo de concreto na capacidade de recuperar alcalinidade também será analisada utilizando duas marcas comerciais de cimento comumente utilizado no México.

Assim, verificou-se que vários fatores têm impacto na eficiência do RE, alguns deles atribuíveis à microestrutura do concreto, e outros inerentes à própria técnica.

Partindo do pressuposto de que o ER deve ser aplicado como método preventivo, a abordagem desta pesquisa concentra-se no concreto apresentando carbonatação parcial, por exemplo, onde a frente de carbonatação (revelada através da técnica da fenolftaleína) não atingiu a armadura. Dois cimentos Portland de qualidade comercial chamados CPC e CPP foram utilizados nas misturas de concreto.

A técnica de ER foi aplicada da seguinte forma: Ânodos de malha de titânio foram fixados nas amostras paralela à superfície de realcalinização para fornecer os contatos elétricos, conforme Figura 7.

Figura 7. Esquema da configuração do experimento (González et al. (2011)).



Em seguida, as amostras foram colocadas em recipientes de PVC. A imersão parcial da superfície de realcalinização das amostras reduziu sua resistência elétrica e, conseqüentemente, os problemas de limitação de corrente ou tensão foram superados. Uma corrente constante de 1 A/m^2 de reforço de aço foi aplicado entre os dois eletrodos (vergalhão e ânodo de malha de titânio) por 20 dias.

Em todos os casos, a superfície de redimensionamento está na parte inferior das imagens. Antes do RE, duas áreas mostraram claramente a carbonatação parcial da profundidade de cobertura do concreto obtida após a indução da carbonatação. A profundidade média do concreto carbonatado foi de 15 mm.

Durante o tempo de aplicação do ER, foi observada uma recuperação na alcalinidade do concreto, principalmente da superfície de contato entre o anólito e a amostra. Neste caso, a aplicação de fenolftaleína mostrou progressão da profundidade realcalinizada. Após 13 dias da aplicação RE, da região carbonatada inicial apresentou uma tonalidade rosa, demonstrando um aumento no pH do concreto acima de 9,5 nesta

região. Em contraste, como pode ser visto nas diferentes imagens da Figura 8, o tamanho da área não carbonatada inicial ao contorno do reforço de aço não pareceu sofrer quaisquer mudanças significativas durante o ER.

Figura 8. Resultados de pulverização de fenolftaleína em fratura recente de amostras em 0, 5, 9, 13, 17 e 20 dias de realcalinização (González et al. (2011)).

Time (days)	Electrochemical Realkalisation (ER) with the two anolytes	
	Na ₂ CO ₃	K ₂ CO ₃
Prior to ER		
5		
9		
13		
17		
20		

A aplicação de ER em amostras parcialmente carbonatados utilizando carbonato de sódio e do carbonato de potássio como ânólitos, nos permite concluir que:

Nas condições experimentais da técnica, a recuperação do pH (realcalinização) em superfície de concreto (8 mm de profundidade de cobertura) é obtida principalmente durante os primeiros 5 dias, um período em que um maior aumento na alcalinidade é obtido. No entanto, foram necessários 13 dias para alcançar a realcalinização de concreto inicialmente carbonatado.

O tipo de anólito não tem influência direta na recuperação do pH em nenhum dos tipos de concreto. Neste caso, o nível de pH alcançado na zona próxima à armadura de aço e ao da superfície do concreto é influenciada pelo tipo de cimento usado e o nível de pH inicial do concreto matriz. Independentemente do anólito e do tipo de concreto utilizado, a ER é incapaz de restaurar o pH para um valor semelhante ao do concreto não carbonatado.

3.3 TRABALHO DE BERTOLINI ET AL. (2012)

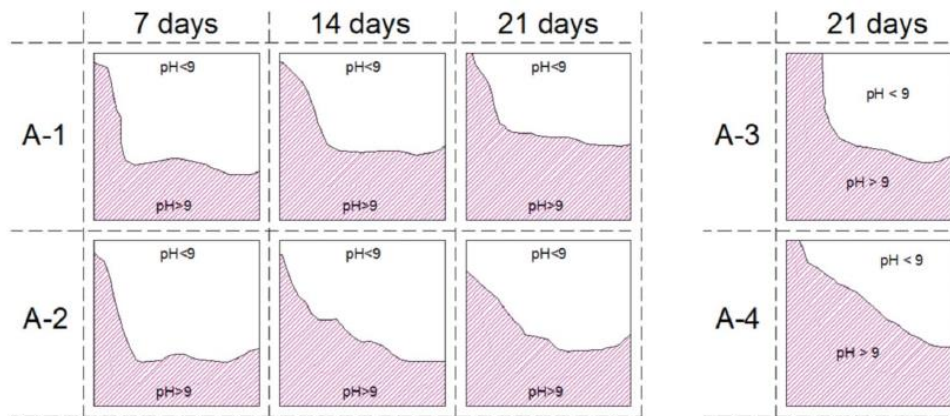
Para investigar a eficiência da técnica da ER e esclarecer alguns aspectos relacionados a sua durabilidade, uma pesquisa experimental foi realizada em prismáticos de pequeno porte moldados com argamassa. A argamassa tinha relação A/C de 0,65 com dimensões de 40 x 40 x 160 mm, e 40 x 40 x 150 mm, contendo uma barra de aço carbono, com diâmetro de 10 mm, colocada ao longo do eixo. Dois fios de titânio ativado foram colocados paralelo a barra de aço intereletrodos finais para medições eletroquímicas.

Em seguida, os corpos de prova foram curados a úmido por 7 dias, então, após 1 semana em condições de laboratório, eles foram colocados em uma câmara de carbonatação acelerada com 2% de CO₂. Assim que elas foram completamente carbonatadas, foram colocadas dentro de uma câmara climática e mantidas a 20°C e altos níveis de umidade relativa (95% UR) a fim de promover a corrosão do aço.

Então realizou-se a técnica de ER, colocando as amostras sobre uma camada de polpa de celulose embebida em solução alcalina de carbonato de sódio (Na₂CO₃). A corrente aplicada foi 0,5 A/m² referido à superfície do aço e fornecido por uma malha de titânio ativado embutido dentro da polpa de celulose, que estava ligada ao terminal positivo de um gerador, enquanto a barra de aço foi conectada ao terminal negativo. No final de cada intervalo de tempo, os corpos de prova foram cortados transversalmente ao vergalhão para verificar a realcalinização da argamassa.

Os resultados dos testes de fenolftaleína nas amostras sujeitas à absorção da solução alcalina de carbonato de sódio são apresentados na Figura 9, que mostra as áreas com pH superior a 9 na superfície dividida após durações de teste de 7, 14 e 21 dias.

Figura 9. Evolução da realocalização da argamassa avaliada com indicador fenolftaleína (Bertolini et al. (2012)).



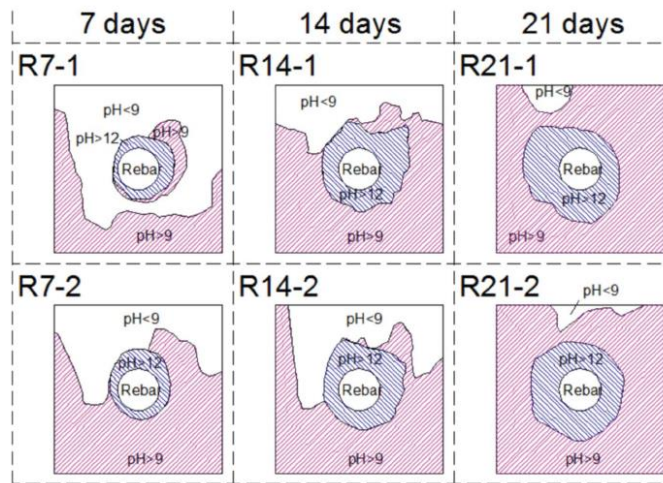
A quantidade de argamassa realcalinizada devido à penetração da solução foi avaliada como a porcentagem da superfície com pH superior a 9 em relação à superfície total da seção, conforme resultados apresentados na Figura 10.

Figura 10. Quantidade de área realcalizada avaliada com indicador de fenolftaleína (Bertolini et al (2012)).

Specimen	Duration (days)	pH>9		
		(cm ²)	(%)	(% avg)
A-1	7	6.48	40.5	38.7
A-2	7	5.90	36.9	
A-1	14	8.19	51.2	47.7
A-2	14	7.06	44.1	
A-1	21	9.05	56.6	55.9
A-2	21	8.85	55.3	
A-3	21	7.49	46.8	
A-4	21	10.11	63.2	

A Figura 11 mostra a evolução da realcalinização nas amostras reforçadas submetido a tratamento ER com densidade de corrente de 0,5 A/m² aplicada em diferentes períodos.

Figura 11. Evolução da realcalinização da argamassa avaliada com indicador fenolftaleína e indicador universal ligado espécimes reforçados sujeitos a tratamento de realcalinização eletroquímica (Bertolini et al. (2012)).



3.4 TRABALHO DE RIBEIRO ET AL. (2013)

Este trabalho estuda a influência do tipo de cimento, a relação água/cimento e reforço cobertura de concreto na realcalinização eletroquímica de concretos carbonatados e sua eficiência na repassivação de armaduras.

Para realização dos experimentos os autores moldaram corpos de prova prismáticos com 8 x 8 x 8 cm, as relações água/cimento foram fixadas em 0,55 e 0,65, duas barras de reforço com 6,3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento foram embutidas em cada corpo de prova respeitando 1 ou 2,5 cm de cobertura de concreto.

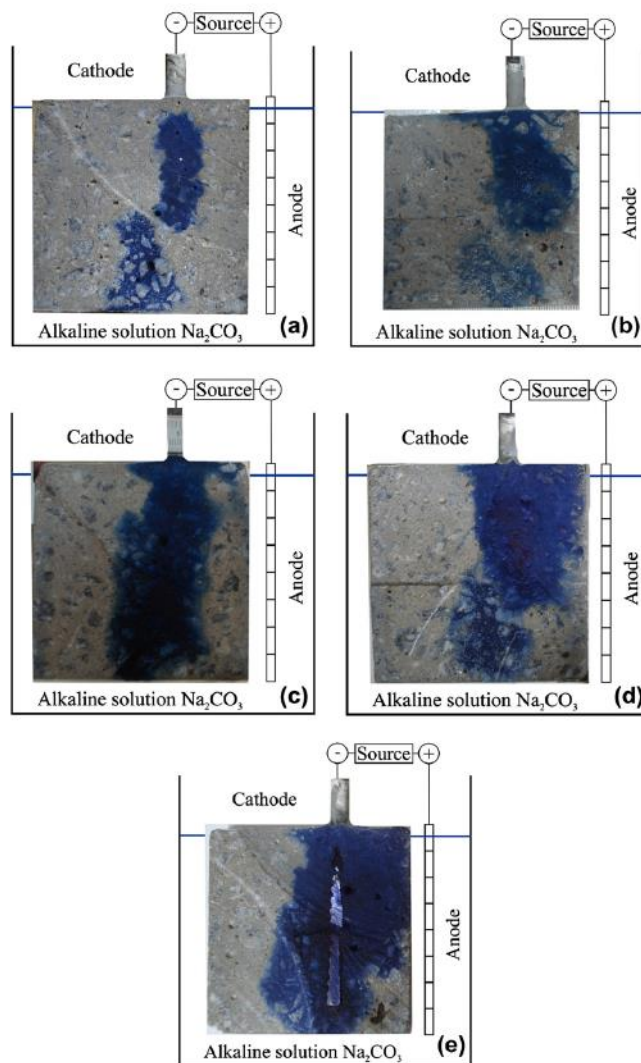
Os corpos de prova foram submetidos ao processo de carbonatação acelerada, em uma câmara de carbonatação saturada sob $75 \pm 5\%$ de umidade relativa e $28,5 \pm 1^\circ \text{C}$ de temperatura, por um período de 180 dias.

Então, os corpos de prova foram submetidos ao tratamento de ER até ocorrer a realcalinização do cobrimento de concreto, os ânodos foram realizados com malha de titânio colocado na superfície da amostra e o eletrólito foi carbonato de sódio, a corrente aplicada foi entre 0,8 e 2 A/m².

A Figura 12 mostra o avanço da realcalinização no concreto durante o tratamento, observando claramente que o processo de realcalinização começou próximo ao reforço e avançou progressivamente em direção à superfície de concreto, no último caso, as amostras foram extraídas 30 dias após o tratamento. Isso indica que a eletrólise da água na região do cátodo foi o principal fenômeno envolvido na realcalinização da cobertura de concreto neste experimento. Observou-se também que o tratamento aumenta a alcalinidade do concreto na cobertura total de concreto, incluindo as camadas próximas a

superfície. Este comportamento foi observado para todos os concretos estudados, confirmando a eficiência do tratamento de ER.

Figura 12. Monitoramento visual do avanço da frente de realcalização durante o tratamento (Ribeiro et al. (2013)).



Levando em consideração que a eletrólise da água é o principal fenômeno envolvido, a carga total passada é a variável que fortemente influencia a realcalinização. O número de hidróxidos gerados perto do reforço é uma consequência da corrente aplicada durante o tratamento. Isso significa que, quanto mais longo o tratamento, mais hidróxidos são gerados e níveis mais elevados de alcalinidade são alcançados próximo a região de reforço.

A espessura da camada de concreto influencia o tempo exigido para completar o processo de realcalinização. Uma cobertura de concreto mais espessa exige mais tempo

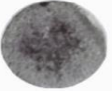



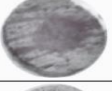
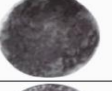
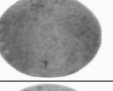
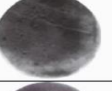
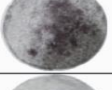
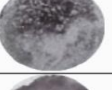

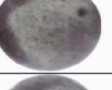
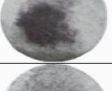
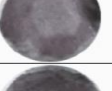

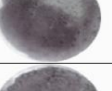




e, conseqüentemente, mais carga para produzir alcalinidade para toda a região de cobertura de concreto.

3.5 TRABALHO DE AGUIRRE ET AL. (2016)

Este trabalho estuda a influência de duas adições pozolânicas, metacaulim (MK) e sílica ativa (SF), e a relação água/aglutinante na realcalinização eletroquímica de argamassas reforçadas como técnica para prevenir a corrosão das armaduras em estruturas de concreto carbonatadas. Foram preparadas misturas com adição de 10% em substituição ao cimento nas relações a/b de 0,45 e 0,65. Os corpos de prova foram expostos à carbonatação em uma câmara sob condições controladas (1% CO₂, 65% UR e 25 ° C), até atingirem dois níveis de carbonatação, um nível parcial (50%) e um nível completo (100%). Então iniciou-se o tratamento com ER utilizando ânodo externo galvanizado com malha de aço e eletrólito alcalino de carbonato de sódio. Polpa de celulose foi colocada entre o ânodo externo e a superfície de concreto, então uma densidade de corrente de 1 A/m² foi aplicada por 15 dias.

A Figura 13 mostra as amostras antes e depois da ER. A coloração magenta pode ser observada após o tratamento ER, que é indicativo de regiões não carbonatadas em regiões que foram anteriormente incolor e é onde o aumento do pH é deduzido nas amostras para ambos os níveis de carbonatação (50 e 100%). Deve-se notar que a coloração violeta ocorre mais na parte central das amostras, em torno do reforço de aço, o que coincide com os resultados apresentados por Bertolini 2012.

Figura 13. Evolução da frente de carbonatação parcial/completa antes e após ER (Aguirre et al. (2016)).

Carbonat-ion Sample	Partial (50%)		Complete (100%)	
	Before	After ER	Before	After ER
OPC-45				
OPC-65				
MK-45				
MK-65				
SF-45				

Observa-se também que no caso parcial de carbonatação, a frente de realcalinização é superior em comparação como do nível de carbonatação completo.

3.6 TRABALHO DE AGUIRRE-GUERRERO (2018)

O trabalho realizado pelos autores visa avaliar a eficiência da aplicação de realcalinização eletroquímica como técnica de concreto armado misturado parcialmente carbonatado usando duas adições pozolânicas, metacaulim (MK) e sílica ativa (SF), em substituição a 10% de cimento, além disso, um concreto sem adições (OPC) exposto as mesmas condições de carbonatação e realcalinização foram usadas como o material de referência. Os autores moldaram corpos de prova cilíndricos com dimensões de 76,2 mm de diâmetro x 152,4 mm de altura, o concreto foi exposto a condições climáticas controladas (1% CO₂, 65% UR, 25 ° C) até que 65% de carbonatação fosse alcançada (sem pré-corrosão inicial).

Posteriormente, o tratamento com ER foi aplicada por um período de 7, 15 e 21 dias para a especificação de concreto; no caso de concretos misturados, um único período de 15 dias foi realizado. Em todos os casos, foi utilizado carbonato de sódio (Na₂CO₃) como um eletrólito e aplicado uma densidade de corrente de 1 A/m², a malha utilizada foi de aço inoxidável.

As Figura 14 e Figura 15 demonstram o progresso do realcalinização obtida para o concreto sem adições pozolânicas (OPC), após 7, 15 e 21 dias de tratamento. A ER ocorre em duas direções: do aço para a superfície (interno) e da superfície do concreto ao aço (externo). A frente interna ocorreu devido à produção de alcalinidade (OH⁻) induzida pela aplicação de uma corrente catódica. O frente externa ocorreu devido à penetração do eletrólito alcalino através do concreto.

Conforme a idade de tratamento é aumentada, os concretos são reabilitados mais efetivamente, portanto, na idade de 21 dias de tratamento, o frentes internas e externa final se sobrepõem em quase toda a circunferência. A evolução da recuperação da alcalinidade da matriz de concreto tratada é evidente.

Figura 14. Monitoramento visual da evolução da frente ER para as amostras sem adições pozolânicas em diferentes idades de tratamento: (a) 7 dias, (b) 15 dias e (c) 21 dias (Aguirre-Guerrero et al. (2018)).

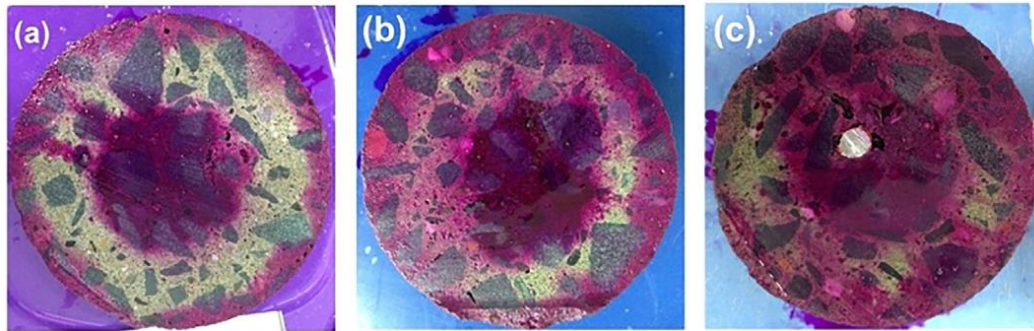
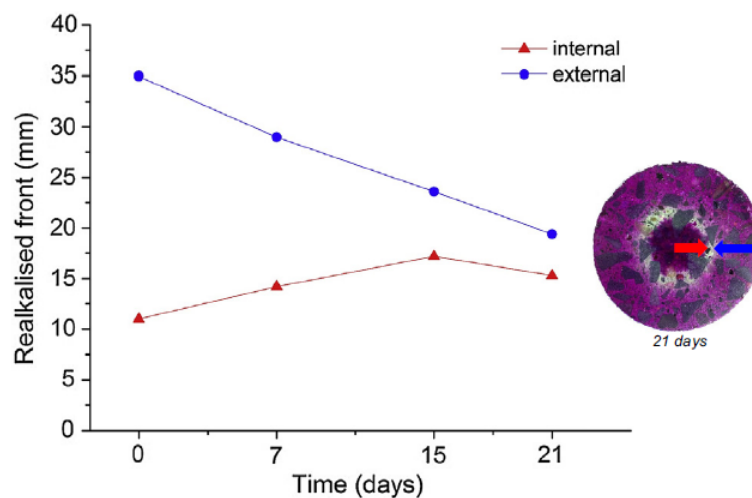
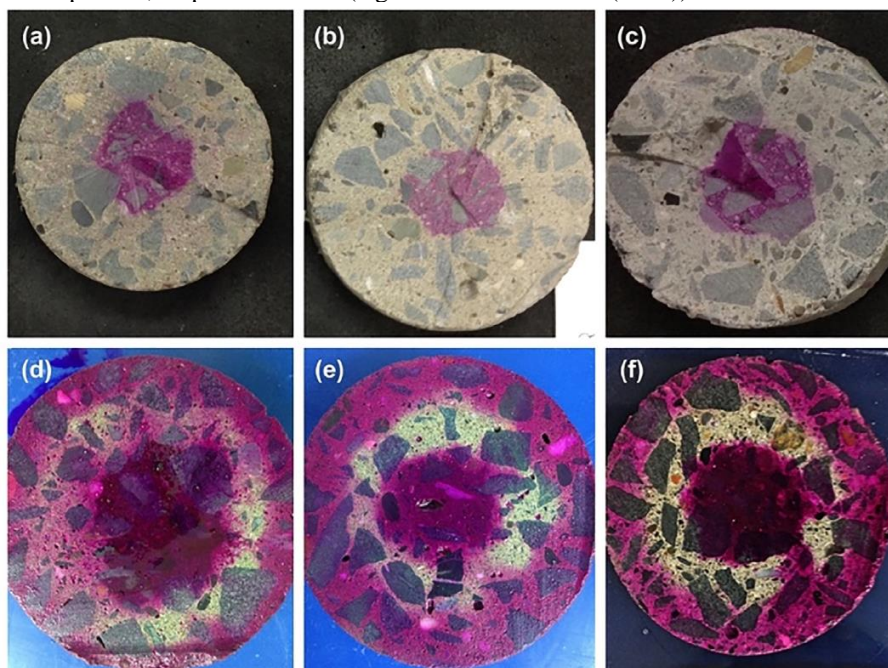


Figura 15. Frente realcalinização para as amostras sem adições pozolânicas em diferentes idades de tratamento (Aguirre-Guerrero et al. (2018)).



As Figura 16 mostra o progresso do realcalinização obtida para o concreto com adições pozolânicas (metacaulim e sílica ativa) comparando com o obtido para o concreto sem adições com a mesma idade de tratamento. O concreto OPC sem adições apresenta o maior avanço da ER em relação aos concretos com adições, o que é esperado porque a permeabilidade dos concreto MK e SF são muito mais baixos do que o concreto OPC.

Figura 16. Monitoramento visual da evolução da frente ER aos 15 dias de tratamento para corpos de prova com e sem adições: (a), (b), e (c) concretos OPC, MK e SF antes ER, respectivamente; (d), (e) e (f) concretos OPC, MK e SF após ER, respectivamente. (Aguirre-Guerrero et al. (2018)).



4 CONCLUSÕES

Com base nos trabalhos realizados pelos autores pode se concluir que, apesar de estudos evidenciarem a técnica, não existe um padrão para aplicação da mesma e, portanto, novas pesquisas podem colaborar para o aprimoramento e melhoria do método.

Conforme os resultado obtidos no experimento realizados pelos autores, os estudos demonstraram a eficácia desta técnica, cumprindo com os objetivos propostos de reestabelecer a alcalinidade em estruturas de concreto carbonatadas.

Em resumo, nas condições experimentais desenvolvidas nesta investigação, todos os resultados levam à conclusão de que a realcalinização eletroquímica pode ser aplicada como uma técnica preventiva em concreto parcialmente carbonatado.

O tratamento dura de alguns dias ou semanas, então, quando toda a cobertura de concreto for realcalinizada, o ânodo externo que fornecia a corrente é removido, deixando a superfície inalterada. Além disso, o ER não exige a substituição do concreto carbonatado se ele não estiver danificado, por isso pode ser vantajoso em comparação com o reparo tradicional, que geralmente requer a remoção de grandes quantidades de concreto.

Com base nos experimentos, evidencia-se que o processo de realcalinização eletroquímica pode agir de maneira preventiva nas estruturas de concreto armado,

evitando assim a diminuição do pH e, conseqüentemente, a carbonatação e corrosão das armaduras.

Bertolini et al. (2016) mencionou que a aplicação da técnica apresenta vários efeitos secundários potenciais, tais como fragilização por hidrogênio, reação álcali-agregado, e perda de adesão, e afirmam que um nível extremamente elevado a densidade de corrente pode afetar a microestrutura do concreto.

Apesar de ser um processo eficiente, a ER não pode reverter situações em que o aço está com grandes corrosões que comprometa a seção da armadura, desse modo, a aplicação deve ser realizada em estruturas que possuem corrosão em estado inicial. Esse método também pode ser considerado um procedimento de manutenção preventiva nas estruturas, reduzindo os custos de intervenção e prolongando a vida útil da estrutura, mas não deve ser classificado como uma reabilitação.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, A. M. et al. Study of a repair technique in carbonated blended mortars: Electrochemical re-alkalization. *Dyna*, v. 83, n. 196, p.93-99, 20 abr. 2016. Universidad Nacional de Colombia. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n196.49249>.

AGUIRRE-GUERRERO, A. M.; GUTIÉRREZ, R. M. Efficiency of electrochemical realkalisation treatment on reinforced blended concrete using FTIR and TGA. *Construction And Building Materials*, v. 193, p.518-528, dez. 2018. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.195>.

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; REDAELLI, E. Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation. *Journal of Cultural Heritage*, v. 9, n. 4, p.376-385, set. 2008. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2008.01.006>.

BERTOLINI, L.; SPAGNOLO, S. L.; REDAELLI, E. Electrochemical Realkalization as a Conservation Technique for Reinforced Concrete. *International Journal of Architectural Heritage*, [s.l.], v. 6, n. 2, p.214-227, mar. 2012. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2010.528147>.

FIGUEIREDO, E.J.P. Avaliação do Desempenho de Revestimentos para Proteção da Armadura Contra a Corrosão Através de Técnicas Eletroquímicas – Contribuição ao Estudo de Reparo de Estruturas de Concreto Armado. 423 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

GONZÁLEZ, F. et al. Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concrete: an Alternative Approach to Prevention of Reinforcing Steel Corrosion. *International Journal of Electrochemical Science*. p. 367-378. fev. 2011.

GONZÁLEZ, J.a. et al. On the effectiveness of realkalisation as a rehabilitation method for corroded reinforced concrete structures: Zur Wirksamkeit der Realkalisierung als Instandsetzungsmethode für korrodierte Stahlbetonbauwerke. *Materials and Corrosion*. Weinheim, p. 97-103. jan. 2000.

HELENE, P. R. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

P.F.G. Banfill, Re-alkalisation of carbonated concrete — Effect on concrete properties, *Constr. Build. Mater.* 11 (4) (1997) 255–258, [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00045-7](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00045-7).

REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. Resistance to carbonation of concrete after re-alkalization by absorption of sodium carbonate solution. *Studies In Conservation*, 113 [s.l.], v. 61, n. 5, p.297-305, 4 abr. 2016. Maney Publishing. <http://dx.doi.org/10.1179/2047058415y.0000000011>.

RIBEIRO, P.H.L.C. Realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas inseridas no meio urbano: influência de características da estrutura no comportamento do tratamento. 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

RIBEIRO, P.H.L.C. et al. Electrochemical realkalisation of carbonated concretes – Influence of material characteristics and thickness of concrete reinforcement cover. *Construction and Building Materials*, [s.l.], v. 40, p.280-290, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.076>.

TONG, Y. et al. Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete — Part 1: Sacrificial anode process. *Cement and Concrete Research*, [s.l.], v. 42, n. 1, p.84-94, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.008>.

XIONG, Y.; DENG, S.; WU, D. Experimental Study on Compressive Strength Recovery Effect of Fire-damaged High Strength Concrete after Realkalisation Treatment. *Procedia Engineering*, [s.l.], v. 135, p.476-481, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.158>.