

Realcalinização do concreto sujeito à carbonatação: Revisão sistemática da literatura sobre os métodos de tratamento, eficácia e mecanismos da reação

Concrete realkalization subject to carbonation: Systematic review of the literature on treatment methods, efficacy and reaction mechanisms

Maryah Costa de Moraes¹ , Oswaldo Cascudo¹, Andrielli Morais de Oliveira¹, Helena Carasek¹

¹Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil. Av. Universitária, nº 1488, 74605-220, Setor Universitário, Goiânia, GO, Brasil.

e-mail: maryahcmoraes@gmail.com, andriellimorais@ufg.br, ocascudo@ufg.br, hcarasek@ufg.br

RESUMO

A realcalinização química (RAQ) e a realcalinização eletroquímica (RAE) são procedimentos utilizados como reparo de estruturas em concretos sujeitos à corrosão nas armaduras por ação da carbonatação. A premissa é elevar o pH da solução do poro do concreto, com o intuito de reestruturar o filme passivo das armaduras. A RAE é aplicada em estruturas a 40 anos e apresenta eficácia na reestruturação desta película. Já a RAQ é um método pouco abordado no meio científico. Este trabalho sintetiza informações, através de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com a técnica de *snowballing*, foram aderidos 24 trabalhos dos quais levantou-se os principais métodos de aplicação, soluções alcalinas e reações físico-químicas. Foi realizada uma análise comparativa entre a RAE e a RAQ, apesar de serem governados por mecanismos diferentes ambos foram eficazes em um período de tempo de 15 dias para reestabelecer o pH superior a 12, sendo também capazes de reestruturar o filme passivo das armaduras em sistemas com perda de massa decorrentes da corrosão abaixo de 0,25%. As principais lacunas da literatura são referentes aos mecanismos de reação da RAQ, alterações nas propriedades do concreto, duração de ambos os tratamentos e maior pré-disposição a reação álcali-agregado após o tratamento.

Palavras-chave: Concreto Armado; Corrosão; Carbonatação; Realcalinização Química; Realcalinização Eletroquímica.

ABSTRACT

Chemical realkalization (CRA) and electrochemical realkalization (ERA) are procedures used to repair concrete structures subject to corrosion in reinforcement due to carbonation. The premise is to raise the pH of the concrete pore solution, with the aim of restructuring the passive film of the reinforcement. ERA has been applied to structures for 40 years and is effective in restructuring the passive film. The CRA is a little discussed method in scientific circles. This paper synthesizes information on these methods, through a Systematic Literature Review (SLR) and snowballing technique, with the adherence of 24 works where the main methods of applying treatments, alkaline solutions and physical-chemical reactions. A comparative analysis was carried out between ERA and CRA, although being governed by different mechanisms both raised the pH of the carbonation front to a value higher than 12, were effective in a period less than 15 days, and were also capable of restructuring the passive film of reinforcement in systems with mass loss due to corrosion below 0.25%. The main gaps are CRA reaction mechanisms, changes in concrete properties, duration of both treatments and greater predisposition to the alkali-aggregate reaction after treatment.

Keywords: Reinforced Concrete; Corrosion; Carbonation; Chemical Realkalization; Electrochemical Realkalization.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão de armaduras do concreto pode colocar em risco a durabilidade, a vida útil e a segurança de estruturas de concreto [1–4]. Neste sentido, custos relacionados ao tratamento da corrosão e a redução de desempenho de estruturas de concreto armado e protendido em um contexto nacional e internacional são elevados, a *World Corrosion Organization* estima um gasto superior a 3% do Produto Interno Bruto (PIB) em diversos países [5].

A carbonatação, o ataque por cloretos e a lixiviação do hidróxido de cálcio são mecanismos que podem acarretar a corrosão das armaduras. Uma das proteções contra estes ataques ao aço é natural, em decorrência da alta alcalinidade da solução do poro do concreto que apresenta pH em torno de 12,5 – 13,5. A presença de íons Na^+ , K^+ e Ca^+ , juntamente com OH^- , formam hidróxidos alcalinos, responsáveis pelo elevado pH, que propicia reações de passivação no conjunto metal-solução, com a formação de uma camada muito fina no entorno das armaduras [6, 7].

O ataque às armaduras tem início com a destruição desta camada passivadora, que ocorre a partir de reações químicas ou mecanismos físicos que dissolvem e reagem com o principal hidrato do cimento responsável pela alta alcalinidade do meio, o hidróxido de cálcio. De forma simplificada, na carbonatação, o CO_2 da atmosfera entra na matriz cimentícia pelo sistema de poros e reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, precipitando CaCO_3 . Esse mecanismo gera uma frente ampla de carbonatação que progride no concreto e, ao atingir o nível das armaduras, leva à sua despassivação provocando corrosão generalizada [8].

Tendo em vista os problemas causados pelo mecanismo de corrosão por carbonatação, surgem métodos de tratamento e manutenção preventiva, que tem como objetivo elevar novamente o pH do meio e reconstituir a película passivadora do aço. Estes tratamentos são denominados de realcalinização, existindo métodos passivos, químicos e eletroquímicos [9]. A realcalinização passiva foi pouco estudada devido à baixa velocidade de difusão, seu mecanismo parte da aplicação de material cimentício altamente alcalino na superfície da peça de concreto a ser tratada. Já a realcalinização química (RAQ) parte do mesmo princípio de aplicação de substância alcalina na superfície do concreto, entretanto, esta substância é aplicada diretamente e em maiores quantidades, além da reposição da substância até a realcalinização do revestimento carbonatado [10]. A realcalinização eletroquímica (RAE) é um método de tratamento preventivo e temporário, desenvolvido no final do século passado pela *US Federal Highway Administration* [11]. O procedimento consiste na aplicação de corrente elétrica proveniente de uma fonte de energia externa, entre a armadura de aço e um ânodo externo [12, 13]. Especificamente, o mecanismo se dá da seguinte maneira: no ânodo (uma tela metálica fixada externamente ao concreto) ocorre oxidação do metal e no cátodo (armadura), simultaneamente, ocorre redução de oxigênio do meio, com produção de íons OH^- (clássica reação catódica em um processo eletroquímico). Além disso, a diferença de potencial entre a malha externa (ânodo) e as armaduras (cátodo) provoca migração iônica de cátions alcalinos da solução de contato – uma solução alcalina geralmente à base de carbonato de sódio – em direção ao interior do concreto, colaborando assim para a realcalinização do meio carbonatado. Isto leva a uma restituição do elevado pH no entorno das armaduras, havendo, como consequência, a repassivação dessas barras de aço [8].

As pesquisas baseadas nestes mecanismos de tratamento do concreto vêm enfatizando a eficiência dos métodos em elevar novamente o pH do revestimento do concreto e no entorno das armaduras [10, 12, 14], e indicam uma repassivação das armaduras em sistemas com baixa taxa de corrosão [9, 15–17]. Além disso, alguns pesquisadores investigaram os mecanismos e atuação da RAE, indicando precipitação de OH^- entre as camadas de aço e os produtos de corrosão, além de uma alteração da composição química da película passivadora [18–20].

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo reunir informações sobre metodologias de aplicação de tratamentos RAE e RAQ, seus mecanismos de ação na repassivação das armaduras de aço e a eficiência na realcalinização do concreto. Além disso, apresenta relevância ao agrupar, sintetizar e consolidar informações dispersas na literatura de forma protocolar e com rastreabilidade sobre o tema de RAE e RAQ, permitindo replicações do protocolo para busca dos trabalhos selecionados [21, 22].

2. METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão sistemática em três principais etapas, a saber: planejamento, condução e relatório (documentação) sobre as técnicas de realcalinização no concreto. A metodologia RSL vem sendo aplicada em várias áreas do conhecimento [21–24].

Na fase de planejamento da RSL, evidenciou-se a pergunta “*quais as lacunas na bibliografia sobre realcalinização do concreto armado em processo de corrosão produzido por carbonatação?*”. Após isso, escolheram-se as bases de dados para a pesquisa, sendo: *Engineering Village*, *Science Direct* e *Scopus*.

Na sequência, as palavras-chaves foram definidas: realcalinização, carbonatação e corrosão. Como realcalinização é um termo encontrado em diversas formas de escrita, as quais foram incluídas na *string* de

Tabela 1: Critérios de inclusão adotados.

| ETAPA | CRITÉRIOS DE INCLUSÃO |
|-------------------------------|---|
| Leituras de títulos e resumos | Aderência ao tema |
| Leitura na íntegra | Descrição do método de tratamento adotado |
| | Eficácia e duração do tratamento |
| | Análises por métodos eletroquímicos |
| | Análises microestruturais |
| Relevância científica | Mecanismos de reação |
| | Periódicos > normatizações > livros > teses > dissertações > congressos > produtos comerciais |

buscas com diferentes ortografias: Corrosion AND Carbonation AND (Realkalization OR Realkalisation OR Re-alkalisation OR Re-alkalization).

Na condução da pesquisa, foram selecionados os trabalhos que compuseram o portfólio atrelado à pergunta norteadora e na filtragem dos artigos duplicados e uma seleção por afinidade ao tema por título, resumo e também pela leitura de texto completo.

Além disso, na etapa de condução adotaram-se os critérios de inclusão e de exclusão. Para os critérios de exclusão, foram consideradas as repetições de trabalhos de mesmos autores e também trabalhos que combinaram agentes agressivos, como por exemplo, cloretos e lixiviação, ataque combinado a altas temperaturas e utilização de inibidores de corrosão. Os critérios de inclusão estão apresentados na Tabela 1.

Posteriormente, foi realizada a técnica de *snowballing* que consistiu na leitura das referências e citações do artigo de RAQ do portfólio seminal de RÉUS e MEDEIROS [10], publicado em 2020, com 35 referências e 4 citações em fevereiro de 2023, onde essas foram filtradas novamente pelos mesmos critérios de inclusão anterior, formando assim o portfólio final [25]. A terceira etapa do mapeamento consistiu em documentar e analisar os resultados identificados referentes a realcalinização de concretos armados carbonatados. Não houve recorte temporal e a busca foi realizada em fevereiro/2024.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultados bibliométricos

Os resultados das buscas nas três bases de dados retornaram 292 documentos no total antes da filtragem e da adesão ao tema da pesquisa. A Figura 1, apresenta os documentos iniciais e os aderidos para cada base de busca.

A Tabela 2 apresenta a quantificação do processo tanto para criação do portfólio seminal, quanto do *snowballing*.

Totalizando os documentos do portfólio seminal e da técnica de *snowballing*, foram aderidos 24 trabalhos. Os documentos encontrados datam no início da década de 90, onde já indicam a aplicação *in loco* da realcalinização eletroquímica no ano de 1987 [26]. A Figura 2 apresenta o ano das publicações aderidas, onde apenas a partir dos anos 2000 começaram a ser mais frequentes, indicando um interesse da comunidade científica pelo tema.

Foi analisado também o tipo de documento, os editores dos artigos aderidos e países dos primeiros autores das publicações (Figura 3 a 5).

A maioria dos documentos foram publicados em periódicos de alto impacto. Assim, a revista *Construction and Building Materials* apresentou 8 publicações, sendo que o país que mais apresentou publicações sobre o assunto foi o Brasil, com 3 artigos em periódicos, 4 dissertações e 2 teses, seguido de China, Colômbia e Itália.

Para além do mapeamento sistemático, foram também investigadas normatizações nacionais e internacionais sobre o tema, pedidos de patentes e patentes registradas, em níveis nacional e internacional, e empresas privadas que comercializam esse tipo de tratamento.

Para a realcalinização eletroquímica foram encontradas patentes nacionais e internacionais, além de normatizações internacionais que regulamentam o método e impõe padrões a serem seguidos para seu desenvolvimento, como a norma europeia EN 14038-1 [27]. Para a realcalinização química tem-se um amplo campo para

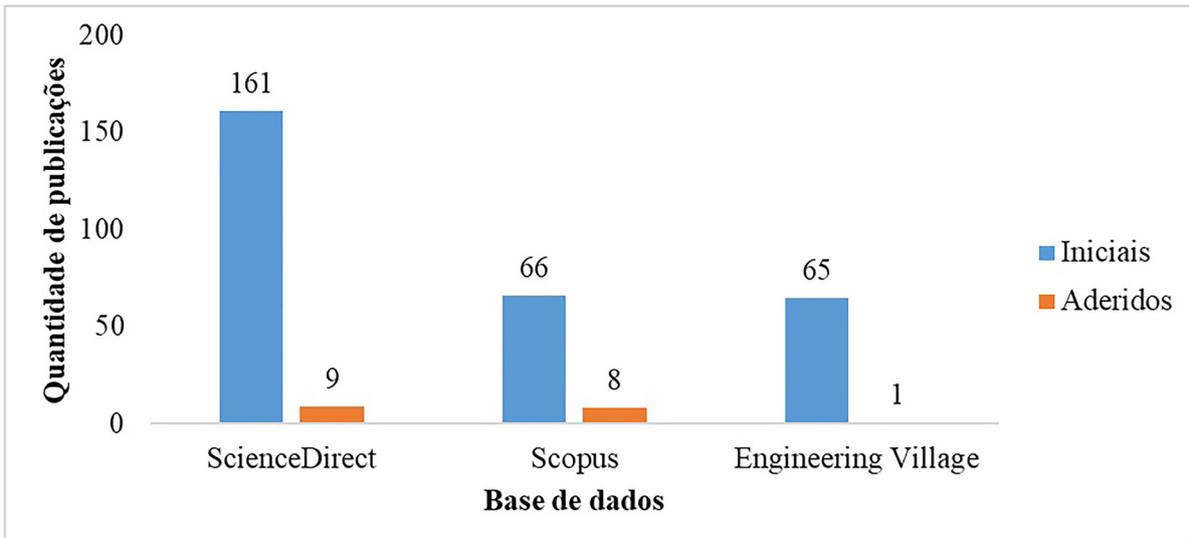


Figura 1: Quantidade de documentos iniciais e aderidos para cada base de dados.

Tabela 2: Protocolo de filtragem dos documentos.

| ETAPA DE FILTRAGEM | QUANTIDADE | |
|-------------------------------------|-------------------|-------------|
| | PORTFOLIO SEMINAL | SNOWBALLING |
| Resultado das buscas | 292 | 39 |
| Duplicados | 75 | 7 |
| Excluídos por título | 150 | 7 |
| Excluídos por resumo | 35 | 1 |
| Excluídos por relevância científica | 6 | 11 |
| Documentos não disponíveis | 8 | 7 |
| Portfólio | 18 | 6 |

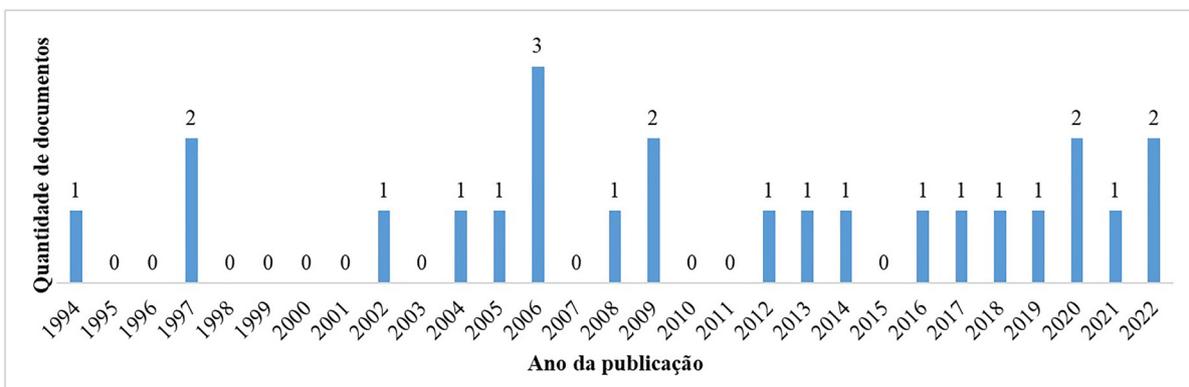


Figura 2: Ano de publicação dos artigos aderidos.

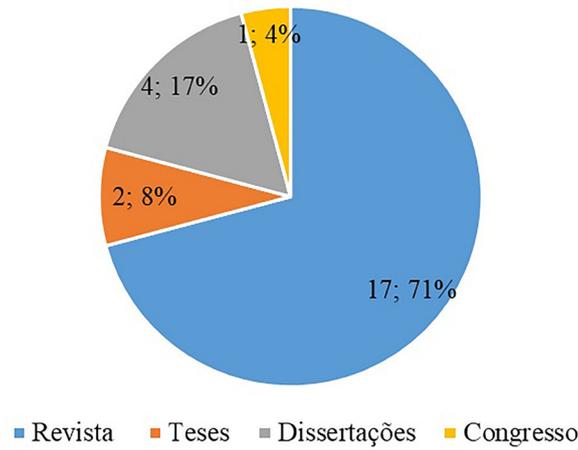


Figura 3: Quantidade de trabalhos aderidos em percentual e em número de publicação e identificação do tipo de veículo da publicação.

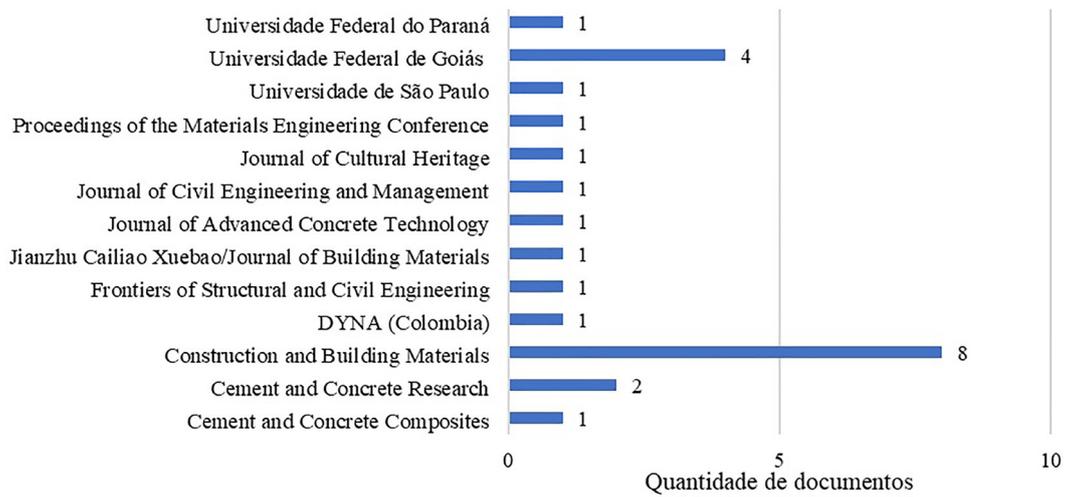


Figura 4: Documentos aderidos por periódicos, congresso e universidades.

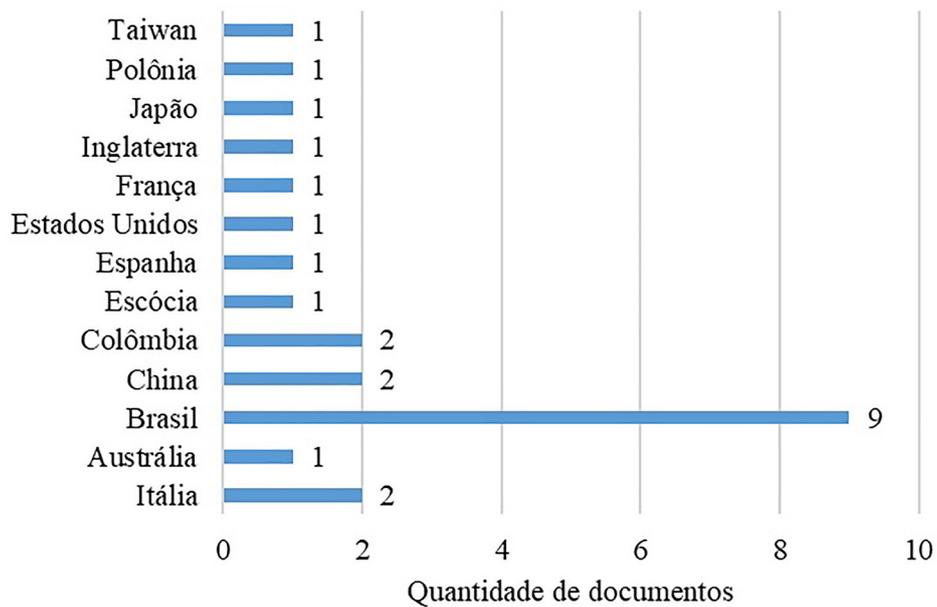


Figura 5: Países das instituições dos pesquisadores com artigos aderidos.

investigação, pois apenas uma norma europeia EN 1504 [28] indica a possibilidade de aplicação deste tratamento como método de manutenção, porém apenas o identifica como realcalinização do concreto por difusão e cita que alguns lugares na Europa utilizam este tratamento. ROBERY e SHAW [29] citaram a RAQ como um método de tratamento que necessita investigação e padronização já em 1997, entretanto, até os dias atuais não foram normatizados parâmetros de controle.

3.2. Revisão sobre a realcalinização eletroquímica

O método mais frequentemente utilizado é a partir da aplicação temporária de uma corrente elétrica entre a armadura do concreto (cátodo) e um ânodo externo, constituído de uma malha condutora, geralmente de titânio, imersa em eletrólito. O eletrólito é composto por uma manta que envolve o concreto, saturada de substância alcalina, geralmente de Na_2CO_3 ou KOH . A corrente elétrica pode variar de 0,8 a 2,0 A/m^2 , o polo positivo de uma fonte retificadora é conectado ao ânodo externo e o polo negativo a armadura de aço, sendo esta, aplicada ao concreto por alguns dias ou semanas, em função da profundidade de carbonatação e propriedades do concreto [30]. A Figura 6 representa o esquema de funcionamento da técnica.

Com o início da passagem de corrente elétrica a armadura do concreto trabalha como cátodo, e, com isso, precipita-se hidroxilas e hidrogênio no seu entorno a partir da eletrólise da água, sendo este o principal processo de aumento do pH no entorno da armadura. As Equações (1) e (2) correspondem aos fenômenos que atuam nesse mecanismo [31].



Outros processos também são importantes na realcalinização eletroquímica, como a eletro-osmose que atua movendo a solução alcalina para o interior do concreto em um fluxo não constante [32–34], e eletromigração, na qual os íons se movimentam de acordo com a polaridade elétrica, íons positivos como Na^+ ou K^+

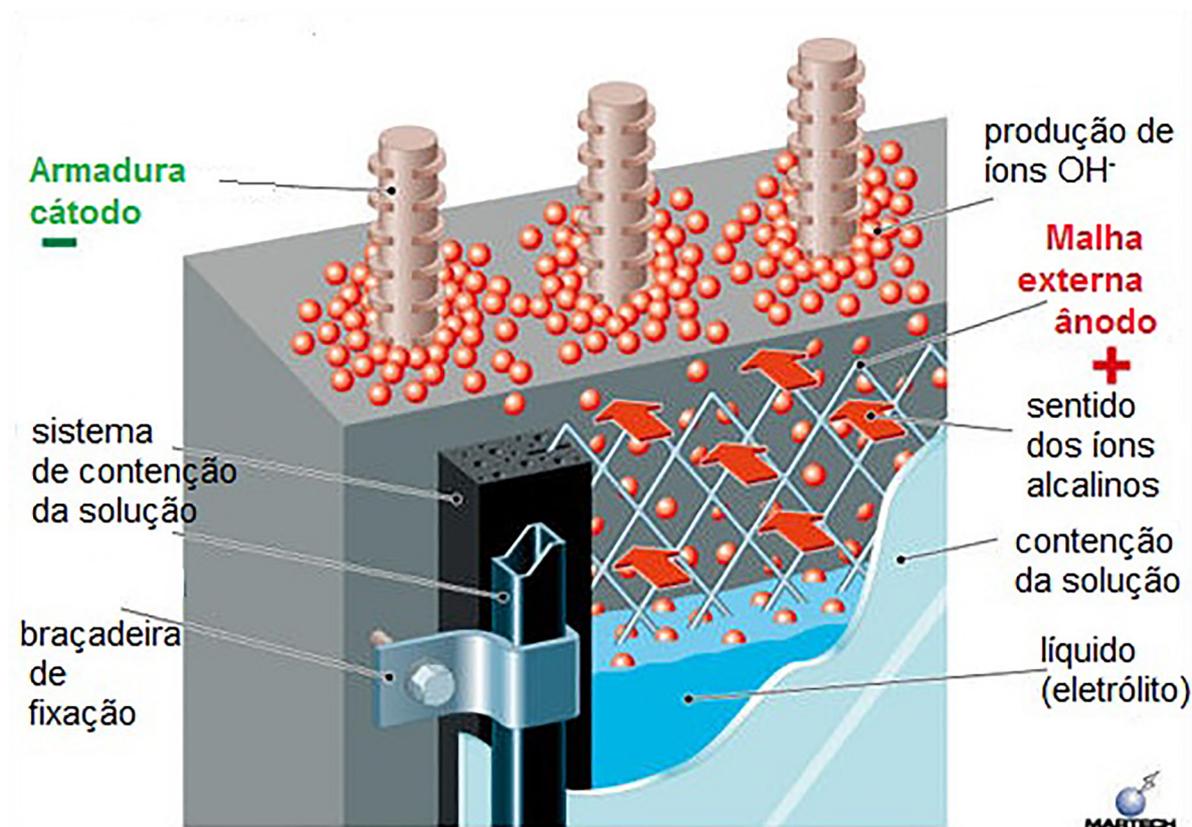


Figura 6: Princípio da técnica de realcalinização eletroquímica [8].

migram para o interior do concreto (cátodo) e íons negativo como OH^- e Cl^- migram em direção ao exterior do concreto (ânodo). A absorção e difusão da substância alcalina do eletrólito para o interior do concreto também ocorrem nas camadas mais superficiais [35, 36].

Os fatores que interferem na duração do tratamento e na intensidade da corrente elétrica são variados, além disso, existem diversas metodologias de aplicação para esse tratamento. Algumas mudanças recorrentes são o tipo de solução alcalina, o meio utilizado para aplicação e sustentação desse eletrólito, e o tipo de malha metálica utilizada.

A norma europeia EN 14038-1 [27] regulamenta alguns parâmetros a serem adotados na execução da RAE, o tamanho do ânodo não pode passar de 50 m^2 , e a corrente elétrica aplicada deve ser inferior a $2,0 \text{ A/m}^2$, as soluções mais adequadas são carbonato de sódio (1M), carbonato de potássio (1M) e hidróxido de lítio (1M), o período mínimo de tratamento deve ser de 200 horas e a carga total mínima deve ser de 200 A.h/m^2 . A norma europeia também menciona que esse tratamento não deve ser utilizado em concretos com agregados com potencial para desenvolver reações álcali-agregado.

Na Tabela 3, tem-se um resumo dos principais estudos com realcalinização eletroquímica.

Tabela 3: Caracterização das principais metodologias sobre realcalinização eletroquímica.

| AUTORES | CORRENTE ELÉTRICA | TIPO DE MALHA | SOLUÇÃO ALCALINA | SUSTENTAÇÃO DO ELETRÓLITO | DURAÇÃO DO TRATAMENTO |
|-----------------------------------|---|--------------------------------|---|---------------------------|------------------------------------|
| BANFILL [37] | $1,0 \text{ A/m}^2$ | Titânio | Na_2CO_3 | Parcialmente imerso | – |
| YEIH e CHANG [11] | $0,8 \text{ A/m}^2$ $1,2 \text{ A/m}^2$ 2 A/m^2 | Titânio | Na_2CO_3 (1M) | – | 7, 14 e 21 dias |
| CASTELLOTE <i>et al.</i> [34] | 72 V | Titânio | Na_2CO_3 (1M) | – | – |
| TONG <i>et al.</i> [13] | 0,40 a $1,86 \text{ mA/m}^2$ | Ânodo de sacrifício – Alumínio | Na_2CO_3 (1M) | Polpa de celulose | 33 dias |
| BERTOLINI <i>et al.</i> [38] | $0,8 \text{ A/m}^2$ | Aço galvânico; Titânio | Na_2CO_3 (1M) | Polpa de celulose | 17 dias |
| ARAÚJO [9] | $1,0 \text{ A/m}^2$ | Aço inoxidável | Na_2CO_3 KOH $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | Uma face imersa | 14 dias |
| GONZÁLEZ <i>et al.</i> [39] | $1,0 \text{ A/m}^2$ | Titânio | Na_2CO_3 (1M); K_2CO_3 (1M); | Parcialmente imerso | 20 dias |
| RIBEIRO <i>et al.</i> [12] | $2,0 \text{ A/m}^2$ | Titânio | Na_2CO_3 (1M) | Imerso | 8 a 18 dias |
| FRANZONI <i>et al.</i> [40] | $1,0 \text{ A/m}^2$ e $2,0 \text{ A/m}^2$ | Gaiola metálica | Na_2CO_3 (1M) | Parcialmente imerso | 72 h e 48 h, em função da corrente |
| AGUIRRE <i>et al.</i> [41] | $1,0 \text{ A/m}^2$ | Aço galvanizado | Na_2CO_3 (1M) | Polpa de celulose | 15 dias |
| AGUIRRE-GUERRERO e GUTIÉRREZ [14] | $1,0 \text{ A/m}^2$ | Aço inoxidável | Na_2CO_3 (1M) | Fibra de celulose | 7, 15 e 21 dias |
| ZHU <i>et al.</i> [42] | $3,0$; $5,0$ e $10,0 \text{ A/m}^2$ | Malha de aço | Na_2CO_3 (1M) | – | 14 e 28 dias |
| UEDA <i>et al.</i> [19] | $1,0 \text{ A/m}^2$ | Titânio | K_2CO_3 (1,5 M); Li_2CO_3 (0,18 M); | Imerso | 14 dias |
| PAAT ESTRELLA <i>et al.</i> [15] | $1,0$; $2,0$ e $4,0 \text{ A/m}^2$ | Malha de aço galvanizado | Aço galvanizado | Parcialmente imerso | 7 a 28 dias |

O primeiro estudo selecionado para compor o portfólio data de 1997, em que Banfill [37] avaliou as propriedades do concreto após a realcalinização eletroquímica, empregando porosimetria por intrusão de mercúrio, tendo verificado uma densificação da estrutura dos concretos realcalinizados, principalmente próximo à armadura (cátodo). Além disso, a resistência mecânica dos materiais submetidos ao tratamento RAE também aumentou, assim como diminuiu a absorção e as expansões por reação álcali-silica, comparado a concretos não-carbonatados e carbonatados. Entretanto, a maior parte dos autores e a EN 14038-1 [27] não recomendam a aplicação dessa técnica em concretos que contenham agregados sujeitos a reação álcali-agregado [43].

A utilização da RAE *in situ* foi acompanhada por BERTOLINI *et al.* [38] com a aplicação do sistema anódico em colunas de monumentos históricos. Com uma duração de tratamento de 17 dias recuperou-se a alcalinidade de 10 mm de concreto no entorno da armadura devido ao processo de eletrólise na região catódica. A superfície do concreto, em contato com o ânodo externo, apresentou camadas muito superficiais de recuperação devido à baixa permeabilidade do concreto.

Diversos estudos investigam fatores que interferem na velocidade de realcalinização, como tipo de eletrólito utilizado e propriedades do concreto a ser recuperado. Em estudo que verificou a eficiência de três diferentes eletrólitos em frente à repassivação da armadura, Na_2CO_3 , KOH e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ através de ensaios eletroquímicos, foi averiguada a repassivação das armaduras após um ano para a análise de potencial de corrosão e 9 meses para a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). O eletrólito a base de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresentou maior recuperação do filme passivo na superfície da armadura para todas as configurações de concretos analisados, seguido do KOH e por último o Na_2CO_3 [9].

Com relação às propriedades do concreto, a realcalinização eletroquímica é mais efetiva para materiais com maiores relações água/cimento, em que sistemas mais porosos contribuem para os mecanismos de transporte no interior do concreto, em função da maior interligação dos poros e maior quantidade da fase líquida do concreto, a solução do poro, o que promove maior dissolução e velocidade no transporte de íons, conceito verificado através da maior deposição de materiais sólidos nos poros do concreto. Os autores indicam a eficácia do tratamento, porém como método preventivo em casos de concretos parcialmente carbonatados [40, 41].

A instabilidade nas medições eletroquímicas logo após a aplicação do tratamento RAE é um assunto amplamente discutido na bibliografia, sendo necessário um período de aproximadamente seis meses para estabilização e com isso a aferição das propriedades eletroquímicas do concreto armado [12]. Em 2018, AGUIRRE-GUERRERO e GUTIÉRREZ [14] também verificaram o lento processo de despolarização após a aplicação da realcalinização eletroquímica, levou-se 103 dias para o potencial de corrosão indicar a passivação das armaduras, com 15 dias de tratamento. Ademais, para maiores períodos de tratamento e utilização de adições pozolânicas o período de estabilização aumentou para 465 dias. Apesar disso, os autores afirmam que a RAE é um eficaz tratamento preventivo para a carbonatação, que reestabelece elevada alcalinidade ao meio, porém, os mecanismos de transporte que atuam no período de polarização afetam as medições eletroquímicas após o tratamento dificultando a análise da repassivação da armadura.

Para minimizar os problemas de polarização após o tratamento de RAE, foi realizado um estudo comparativo entre normatizações que regulamentam este tratamento, indicando que a corrente sendo menor do que $1,0 \text{ A/m}^2$ possibilita a recuperação do pH e diminui os efeitos de polarização e possível produção de hidrogênio [15].

Além das medições eletroquímicas para verificar a repassivação das armaduras, um grupo de pesquisadores franceses, realizaram análises da película passivadora através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) com EDS e também espectroscopia micro Raman, para avaliar alterações na microestrutura antes e depois da RAE. Alguns resultados indicam alterações na película passivadora de modo que no estado de carbonatação verificaram um produto de corrosão esverdeado, e após realcalinizada a película passivadora voltou a ser constituída por magnetita e hematita, óxidos de ferro mais estáveis. Produtos de reação álcali-silica também foram verificados no estado carbonatado e no realcalinizado, o que não corrobora validar o desenvolvimento de RAA devido a realcalinização [13, 20, 44].

Com relação a durabilidade do tratamento, um ano após sua aplicação a seção realcalinizada indicada pela fenolftaleína reduziu de área, apesar de medições eletroquímicas ainda demonstrarem a eficácia do tratamento, a partir disso os autores sugerem a necessidade de análises sobre o pH e a durabilidade da técnica [13, 20, 44]. ZHU *et al.* [42] avaliaram concretos submetidos a RAE após 7 anos de tratamento e concluíram que após esse período a carbonatação já teria atingido as armaduras novamente para concretos com água/cimento 0,65. Os autores também observaram uma instabilidade nas medidas eletroquímicas logo após o período de tratamento e estabilização dentro de 5 meses.

Em resumo e a partir de diversos estudos da literatura, conclui-se que a realcalinização eletroquímica é eficaz em repassar as armaduras, entretanto é necessária a despolarização do aço para uma correta medição

dos ensaios eletroquímicos. Contudo, apesar de eficaz, tem-se uma duração na eficácia desse tratamento, sendo que após realcalinizado seria como se aos poucos o concreto voltasse ao estado inicial e pudesse carbonatar novamente, sendo necessários ensaios de manutenção periódicos, em função da agressividade do meio, para manter a alta alcalinidade do concreto e a eficácia da película passivadora.

As principais lacunas na literatura são com relação a durabilidade do tratamento, período entre manutenções, reação álcali-agregado e fixação de substratos, além de uma análise do custo do tratamento [12, 14, 42, 44].

3.3. Revisão sobre a realcalinização química

A realcalinização química (RAQ) é um tratamento não destrutivo, de curta duração e fácil aplicação para concretos carbonatados. Também é possível encontrar alguns produtos disponíveis para venda no mercado com o mesmo embasamento teórico, mas sem indicação de sua composição química e concentração. Sendo que a eficácia da repassivação das armaduras e duração do tratamento é uma incógnita [9, 10, 17, 45–48].

O método consiste na aplicação de solução alcalina de alta concentração na superfície do concreto, em que atuam mecanismos de transporte, como absorção e difusão, promovendo o aumento do pH da solução do poro do concreto através da maior disponibilidade de íons alcalinos, até alcançar as barras de aço ou a frente de carbonatação a ser recuperada. A Figura 7 indica o esquema de funcionamento da técnica de RAQ por imersão.

Para este mecanismo de tratamento pode-se variar o tipo e concentração das soluções alcalinas, assim como o método de aplicação e período de tratamento. As soluções alcalinas que vêm sendo utilizadas são de KOH, Na_2CO_3 , NaOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou misturas entre estas. E como método de aplicação avaliam-se ciclos de molhagem ou imersão. Os métodos de pintura e spray, recomendados para aplicação da solução realcalinizadora pelos fabricantes dos produtos comercializados, não foram eficazes para realcalinizar o cobrimento do concreto [10, 49].

Na Tabela 4 tem-se um resumo dos estudos realizados.

Percebe-se que os métodos de imersão em solução foram mais eficazes em elevar a velocidade de realcalinização, assim como o método de manta utilizado por RÉUS e MEDEIROS [10], um procedimento similar ao da realcalinização eletroquímica *in loco*, apenas evitando a malha de aço e aplicação de corrente elétrica. MOREIRA [47] aplicou um procedimento de re-saturação do gel, durante todo o tratamento da estrutura foi adicionado mais solução alcalina ao gel, e seus resultados foram satisfatórios, em decorrência disso, a re-molhagem da manta de polietileno tereftalato reciclado também pode se mostrar um procedimento eficaz, assim como a possível utilização de polpa de celulose como no método de RAE.

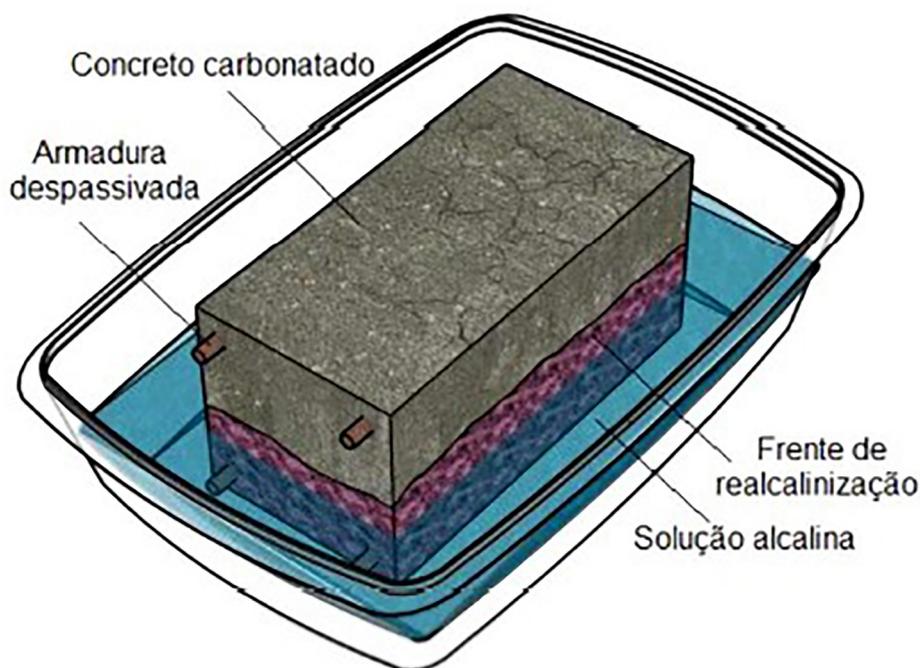


Figura 7: Princípio da técnica de realcalinização química [10].

Tabela 4: Caracterização das principais metodologias sobre realcalinização química.

| AUTORES | MATERIAL | CARBONATAÇÃO | SOLUÇÃO E CONCENTRAÇÃO (mol/L) | APLICAÇÃO | PERÍODO PARA REALCALINIZAÇÃO |
|---------------|---|---|--|--|---|
| TEIXEIRA [45] | Argamassa a/c = 0,4 CP I-S; CP II-F; CP III; CP IV; CP V-ARI | Carbonatação em câmara de CO ₂ | Na ₂ CO ₃ (1,89M) | 2 dias imerso e 5 dias de secagem (T = 25°C; UR = 50%) | Para realcalinizar 2,5 cm de 5 a 15 dias; |
| ARAÚJO [46] | Argamassa a/c = 0,5 | Carbonatação em câmara de CO ₂ | Na ₂ CO ₃ (0,94M); KOH (2,67M); Tripla ¹ ; | 2 dias imerso e 5 dias de secagem (T = 25°C; UR = 50%) | Para realcalinizar 2,5 cm de 28 a 63 dias; |
| SÁ [48] | Argamassa a/c = 0,5 | Carbonatação em câmara de CO ₂ por 42 d (profundidade carbonatação = 2,5 cm) | Na ₂ CO ₃ (0,94M); KOH (2,67M); Tripla ¹ ; | 2 dias imerso e 5 dias de secagem (T = 25°C; UR = 50%) | Para realcalinizar 2,5 cm: 34 dias com KOH; 59 dias com tripla; 73 dias com Na ₂ CO ₃ ; |
| MOREIRA [47] | Concreto a/c = 0,7 | Carbonatação em câmara de CO ₂ por 180 dias (até despassivar) | Tripla ² | Imersão | Para realcalinizar 1,5 cm: 5 dias imerso; 7 dias com gel saturado; |
| ARAÚJO [9] | Concreto a/c = 0,65 | Carbonatação acelerada: CO ₂ = 10%; T = 23°C; UR = 75%; | Na ₂ CO ₃ (1M); KOH (2,5M); Ca(OH) ₂ (Saturada); | 2 dias imerso e 3 dias de secagem (Estufa T = 40°C) | Para realcalinizar 1,5 cm: 63 dias com Na ₂ CO ₃ ; 47 dias com KOH; |
| RÉUS [50] | Concretos com variadas adições (CCA, SA, Filer e MK) e a/c = 0,7; | Carbonatação acelerada por 18 semanas: CO ₂ = 5%; T = 40°C; UR = 60% | NaOH (3,75M); KOH (2,67M); Ca(OH) ₂ (Saturada); Tripla ¹ | Imersão; Manta; Spray; Trincha; (5 demãos, de 30 min) | Para realcalinizar 1,6 cm: 14 dias com KOH; 31 dias com NaOH, Tripla e Comercial; |
| RÉUS [16] | Concretos com variados tipos de cimento (CP II-F, CP II-Z, CP IV e CP V-ARI) e a/c = 0,7; | Carbonatação acelerada: CO ₂ = 5%; T = 23°C; UR = 65% | KOH (2,67); NaOH (3,75M); Na ₂ O.SiO ₂ ; Tensoativo (ácido sulfônico); Pré-tratamento com H ₂ SO ₄ ; | Imersão | Para realcalinizar 1,5 cm: de 16 a 36 dias A utilização de tensoativo ou pré-tratamento não foi eficiente, assim como Na ₂ O.SiO ₂ . |

Tripla¹ = Na₂CO₃ (0,28 M) + NaOH (0,38 M) + KOH (0,89 M);

Tripla² = Na₂CO₃ (0,09 M) + NaOH (0,38 M) + KOH (0,89 M).

O coeficiente de realcalinização, Equação (3), pode ser calculado da mesma forma que o coeficiente de carbonatação [51], através da 1ª Lei da Difusão de Fick, devido à similaridade de mecanismos envolvidos, esta foi uma constatação comprovada por ajuste de curvas no trabalho de RÉUS e MEDEIROS [10, 50].

$$x = k_{RAQ} \sqrt{t} \quad (3)$$

Em que:

x = profundidade de carbonatação (mm)

k_{RAQ} = coeficiente de realcalinização, em função da difusão da solução alcalina (mm/ $\sqrt{\text{dias}}$)

t = tempo de exposição (dias)

A fim de comparar os coeficientes obtidos em diferentes trabalhos, foi calculada a velocidade de realcalinização, k_{RAQ} em mm/ $\sqrt{\text{dias}}$, por este ser um tratamento que tem o objetivo de durar apenas alguns dias. Na Figura 8, tem-se os coeficientes de realcalinização química das principais pesquisas brasileiras.

O primeiro estudo que compõe este portfólio data de 2002, no qual TEIXEIRA [45] comparou diferentes tipos de cimento Portland e constatou a influência deste fator na taxa de realcalinização, os cimentos com maiores teores de materiais cimentícios suplementares, o CP IV-32 (material pozolânico) e o CP III-32 (escória

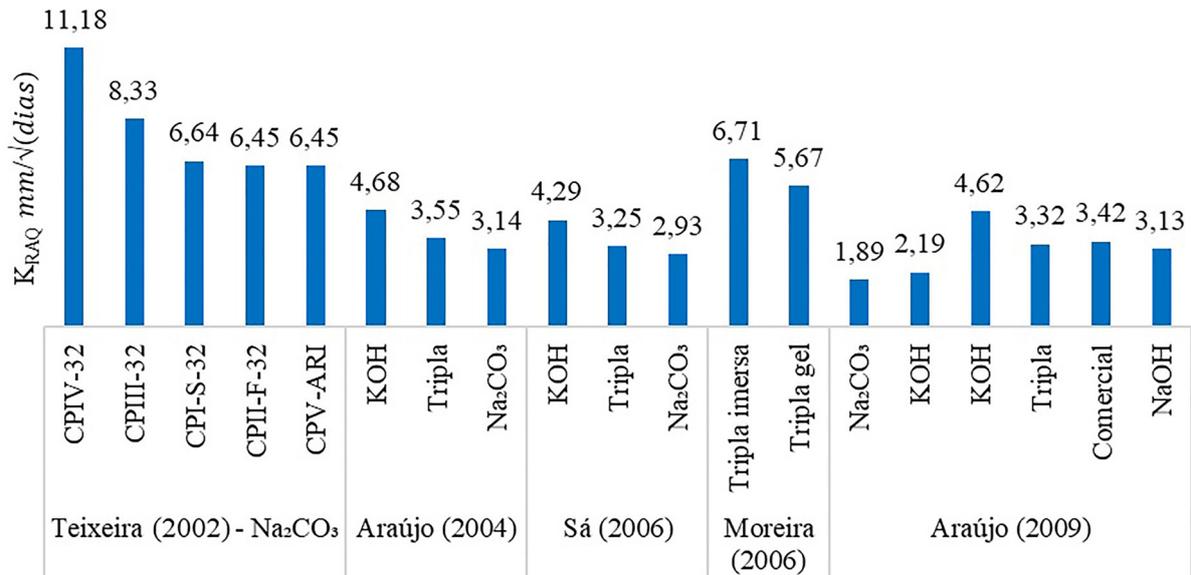


Figura 8: Coeficiente de realcalinização química, por meio da imersão ou ciclos de imersão, com diferentes soluções alcalinas ou tipos de cimento.

de alto forno) apresentam maiores k_{RAQ} , respectivamente. Além disso, esse autor utilizou o Na₂CO₃ em maior concentração, de 1,89 M, enquanto os outros autores utilizaram de 0,94 a 1,0 M, em função disto obteve maior velocidade de realcalinização devido ao mais gradiente de concentração [9, 46, 48].

Os coeficientes de realcalinização indicam que a solução mais eficaz foi a de hidróxido de potássio (KOH) em frente às demais soluções alcalinas utilizadas [9, 10, 46, 48]. Algumas questões influenciaram no k_{RAQ} , como as diferentes relações a/c entre os estudos, a resistência mecânica dos materiais, o tipo de material (concreto ou argamassa) e o método de aplicação da solução (imersão ou ciclos de imersão e secagem).

Outro fator que influencia na taxa de realcalinização é a resistência mecânica do concreto. Em um grupo de pesquisa, diferentes autores produziram seus corpos de prova utilizando o mesmo traço de argamassa e mesmas condições de ensaio, o que alterou as taxas de realcalinização entre estes foi à resistência à compressão dos CP's, sendo que quanto maior a resistências mecânica, menor k_{RAQ} . Isso ocorre em decorrência da menor porosidade do material e maior dificuldade no transporte da solução alcalina para o interior do concreto [46, 48].

O principal fator que governa a resistência mecânica do concreto e sistema de poros é a quantidade de água inserida na mistura, responsável por produzir estes vazios após o endurecimento do material. Em função disto, diferentes autores investigam a influência da relação água/cimento nas taxas de realcalinização. Os autores que confeccionaram concretos com traços diferentes, porém com relação água/cimento elevada, igual a 0,70, obtiveram maiores velocidades de realcalinização, nos quais o cobrimento carbonatado foi recuperado em até 15 dias [10, 47]. ARAÚJO [9] utilizou menor relação a/c, decorrente disso o seu k_{RAQ} foi significativamente inferior aos demais, além disso, também foi realizado ciclos de molhagem e secagem, enquanto ou outros autores fizeram a imersão dos CP's durante todo o tratamento.

Além da elevada relação água/cimento, a solução tripla de MOREIRA [47] apresentou uma alta velocidade de realcalinização em função do curto período de tratamento, as medições foram acompanhadas apenas nos cinco primeiros dias, nos quais alcançou uma profundidade de realcalinização de 1,5 cm (cobrimento), nesse período inicial a taxa de realcalinização tende a ser mais rápida, assim como na carbonatação, em função do elevado gradiente de concentração que acelera a difusão da solução mais concentrada para o interior, com solução do poro pouco concentrada.

Os parâmetros eletroquímicos também foram acompanhados por alguns autores. Em um primeiro estudo no qual a velocidade de realcalinização foi lenta, superior a 3 meses para recuperar o pH de 2,5 cm de cobrimento, não foram recuperadas as propriedades da película passivadora, sendo que todos os concretos em diferentes soluções se enquadraram fora da faixa superior a -200 mV no ensaio de potencial de corrosão, ou seja, apresentaram certa probabilidade de corrosão, apesar do pH ser superior a 12,5 [48]. Em contra partida, ARAÚJO [9] obteve resultados eficazes para reestruturação do filme passivo do aço para todas as soluções alcalinas analisadas, a exceção se fez apenas para duas amostras que apresentaram as mais elevadas taxas de

corrosão. Além disso, a ordem de eficácia na repassivação também foi inversa, tendo o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com melhores resultado, seguido pelo Na_2CO_3 e KOH , respectivamente. Outra particularidade foi que apesar de apresentar a repassivação da armadura, a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ não elevou o pH do concreto. A autora especulou que pode ter ocorrido a precipitação de produtos na superfície do aço, sendo necessárias análises microestruturais para comprovação desta teoria.

Outro grupo de pesquisadores brasileiros confeccionaram células de ensaio que representassem o concreto armado em diferentes condições: pré-carbonatação, carbonatado e realcalinizado. Medidas eletroquímicas acompanharam a evolução e indicaram a eficácia da realcalinização em função do grau de corrosão das armaduras, e concluíram que barras de aço com perda de massa superior a 0,25% não retornam à condição de passividade após o tratamento de realcalinização [18, 52].

Apenas um estudo avaliou a durabilidade de ambos os tratamentos, e constatou que amostras realcalinizadas quimicamente possuem mais dificuldade em carbonatar novamente após o tratamento, em comparação com a RAE. As amostras foram novamente para a câmara de carbonatação após duas semanas do fim do tratamento, e com isso, observou-se que além de elevar o pH da solução do poro, o tratamento também reduziu a taxa de carbonatação após finalizado [9].

É evidente a eficácia da RAQ a partir de análises eletroquímicas, como potencial de corrosão e espectroscopia de impedância eletroquímica, sendo que após o tratamento o concreto tende a apresentar resultados similares aos do estado de passivação, e também em função do aumento de pH acompanhado através do indicador de fenolftaleína. Contudo, os mecanismos de transporte e alterações na microestrutura do material precisam ser analisados, apenas um estudo buscou identificar os produtos de hidratação do cimento após a RAQ, e constatou uma precipitação de Portlandita após o tratamento, indicando a alteração na configuração da matriz cimentícia, mas sem explicar os mecanismos de reação [16].

Outro ponto inexplorado é a reconstrução da película passivadora, não se sabe se a solução alcalina altera a sua composição química. Alguns autores exploram alterações nesta camada extremamente fina através de técnicas como espectroscopia micro Raman, entretanto, os resultados são apenas qualitativos [44].

3.4. Correlações entre métodos

Como visto nos itens anteriores a realcalinização eletroquímica e química se baseiam em mecanismos diferentes para alcançar o mesmo objetivo, elevar o pH da solução do poro do concreto e promover a repassivação das armaduras. A RAE apresenta desde o início do tratamento um aumento do pH no entorno da armadura, enquanto a RAQ realcaliniza o concreto apenas da superfície para o interior.

Ambos os tratamentos quando utilizadas as soluções alcalinas mais eficazes, apresentam um curto período de aplicação, em torno de 15 dias [10, 12, 14]. Para uma melhor comparação entre as velocidades de realcalinização entre os dois métodos, foi construído o gráfico apresentado na Figura 9.

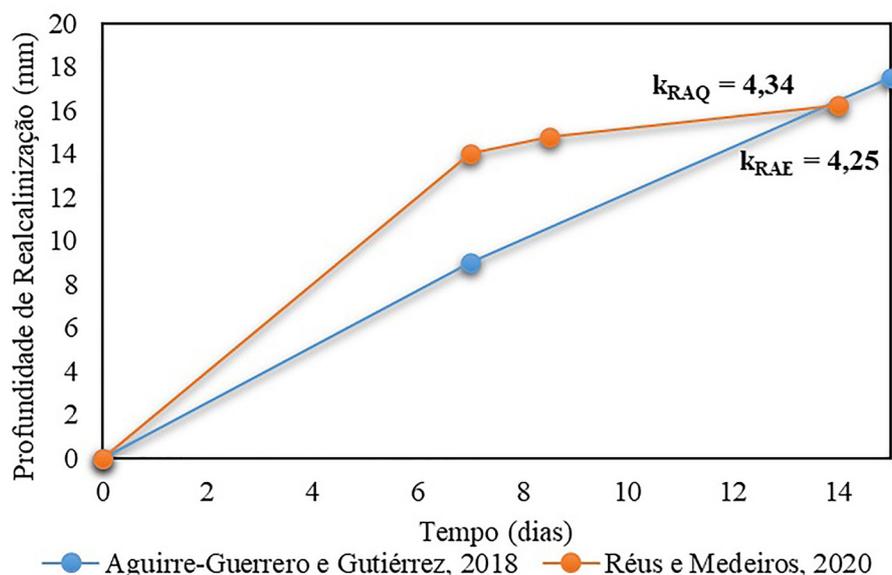


Figura 9: Avanço da realcalinização eletroquímica por AGUIRRE-GUERRERO e GUTIÉRREZ [14] e realcalinização química por RÉUS e MEDEIROS [10].

A Figura 9 indica velocidades de realcalinização próximas entre a RAE e RAQ, com base em dois estudos mais recentes com dados sobre o avanço da profundidade de realcalinização. Em um desses estudos Aguirre-Guerrero e Gutiérrez [14] utilizaram uma solução de Na_2CO_3 (1M) como eletrólito e, no outro, RÉUS e MEDEIROS [10] utilizaram KOH (2,67 M). Para o cálculo da profundidade de realcalinização da RAE foi considerado o avanço da alcalinidade tanto no sentido externo (contato com o eletrólito) quanto no interno (armadura). O concreto utilizado pelos pesquisadores que estudaram a RAE possuía uma relação água/cimento de 0,55, valor este menor que a da RAQ, igual a 0,70. A alta relação a/c causa influência na taxa de realcalinização em função da maior porosidade e interligação dos poros, o que beneficia o transporte da solução alcalina para o interior do concreto.

Considerando o aumento do pH obtido, deve-se analisar também a repassivação da armadura. Ambos os métodos tendem a apresentar a reconstrução da película passivadora, porém com longo período de tempo para estabilização desta nova camada de óxidos de ferro formada [9, 12, 16, 48]. Para averiguar esta propriedade, ARAÚJO [9] determinou os potenciais de corrosão em corpos de prova de concreto com o mesmo traço, cura e carbonatação, porém realcalinizados pelos dois diferentes métodos. Os resultados indicaram potencial de corrosão mais eletronegativo após a realização dos tratamentos, tanto para a RAE quanto para a RAQ, devendo-se, contudo, esperar a despolarização das amostras para avaliar a eficácia do tratamento, o que pode levar um período de até 6 meses. Essa propriedade indica, de modo bastante sensível, o estado superficial da armadura, informando se o aço se encontra em estado passivo ou de corrosão ativa. No estudo em questão, os resultados de potencial de corrosão também se mostraram muito sensíveis às taxas de corrosão da armadura, uma vez que as amostras que apresentaram maior probabilidade de corrosão, ao final do tratamento RAQ, foram as mesmas que apresentaram maior taxa de corrosão após a carbonatação [53].

Com relação aos efeitos negativos de ambos os tratamentos no concreto, pode-se ter um ambiente potencial para o desenvolvimento da reação álcali-agregado, perda de aderência entre a armadura e o concreto, fragilização do aço na RAE, deposição de materiais nos poros (o que causa alteração na distribuição da porosidade do concreto) e alteração da resistência mecânica [11, 12, 34, 37, 54].

Outro fator em comum entre estes dois tratamentos é o prejuízo causado na aderência do concreto a revestimentos, tintas e vernizes [48]. A baixa aderência pode ser resultado da alta alcalinidade na superfície do concreto após a aplicação do tratamento ou contato com o eletrólito, devido à precipitação de eflorescências (cristais salinos) na superfície. O tipo de solução alcalina utilizada tem influência no desenvolvimento de eflorescências, sendo que soluções de Na_2CO_3 tendem a apresentar maior cristalização de sais em sua superfície, comparado ao KOH [9].

As principais lacunas da literatura são referentes aos mecanismos de reações desenvolvidos pela realcalinização química e a interação entre a solução alcalina com a solução do poro e matriz cimentícia do concreto. RÉUS [16] indicou uma precipitação de Portlandita após o tratamento, mas faltam indícios sobre os precursores e catalisadores desta reação. Do mesmo modo, existem análises qualitativas sobre a precipitação do gel álcali-silica da reação álcali-agregado [55], mas sem mensuração quantitativa da significância destas reações no concreto após a RAQ e ERA, em função da expansão mensurada em barras de argamassa ou primas de concreto [56, 57, 58].

A estimativa da nova resistência à carbonatação do concreto após o fim destes tratamentos é pouco explorada. Isto abre oportunidades para pesquisas futuras voltadas à estimativa de novos coeficientes de carbonatação (em concretos realcalinizados), descortinando, assim, novas perspectivas no campo dos modelos preditivos de vida útil em se tratando de estruturas reabilitadas por meio de processos de realcalinização.

4. CONCLUSÕES

Com base dos resultados obtidos, têm-se as seguintes conclusões:

- A realcalinização eletroquímica possui uma metodologia já consolidada, sendo a principal lacuna deste método o reconhecimento da durabilidade do tratamento e a periodicidade entre as manutenções para garantir as características do concreto, como o elevado pH da solução do poro e a película passivadora atuante;
- A realcalinização química apresenta eficácia em elevar o pH da solução do poro do concreto, principalmente com a utilização de KOH (2,67 M), por meio de aplicações com manta saturada ou de imersão. A reestruturação da película passivadora foi analisada apenas por um grupo de pesquisadores usando medições eletroquímicas. Nesse sentido, a principal lacuna refere-se aos mecanismos de reação do tratamento, alterações na microestrutura e solução do poro, bem como as correlações das propriedades dos concretos com os coeficientes de realcalinização;

- A reação álcali-agregado não foi testada quantitativamente para concretos submetidos a RAQ; apesar da norma europeia e outros autores não recomendarem a utilização da RAE em estruturas com agregados potencialmente reativos, alguns estudos não identificaram correlações entre estes dois fatores;
- A RAQ apresenta menores velocidades de realcalinização em concretos com baixa relação água/ligante comparando-se a RAE, no entanto, este é um tratamento com menor complexidade para desenvolvimento, podendo-se utilizar de maiores períodos de aplicação para garantir eficácia similar.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), Furnas Centrais Elétricas, CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro e bolsas concedidas.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] CASCUDO, O., *O Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*, São Paulo, Pini, Goiânia, Editora UFG, 1997.
- [2] TREVISOL, C.A., SILVA, P.R.P.D., PAULA, M.M.D.S., *et al.*, “Avaliação de inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, n. 4, pp. e11904, 2017. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0238>.
- [3] CASCUDO, O., “*Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armado no comportamento frente à corrosão*”, Tese de D.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [4] JAMES, A., BAZARCHI, E., CHINIFORUSH, A., *et al.*, “Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: a review.”, *Construction & Building Materials*, v. 224, pp. 1026–1039, 2019. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.250>.
- [5] FELIZ, E.F., CARRAZEDO, R., “Análise probabilística da vida útil de lajes de concreto armado sujeitas à corrosão por carbonatação via simulação de Monte Carlo”, *Revista Matéria*, v. 26, n. 3, pp. e11904, 2021.
- [6] OLLIVIER, J.P., TORRENTI, J.M., “A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte”, In: Cascudo, O., Carasek, H. (eds), *Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*, São Paulo, IBRACON, Cap. 3, pp. 237–254, 2014.
- [7] POURBAIX, M., *Atlas of electrochemical equilibrium in aqueous solutions*, 2 ed., Houston, NACE, 1974.
- [8] CASCUDO, O., CARASEK, H., “Carbonatação do concreto”, In: Tutikian, B., Pacheco, F., Isaia, G.C., Battagin, I. (eds.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*, 3 ed., São Paulo, IBRACON, cap. 23, v. 2, p. 965–011, 2022.
- [9] ARAÚJO, F.W.C., “*Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química*”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [10] RÉUS, G., MEDEIROS, M., “Chemical realkalization for carbonated concrete treatment: alkaline solutions and application methods”, *Construction & Building Materials*, v. 262, n. 120880, pp. 120880, 2020. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120880>.
- [11] YEIH, W., CHANG, J., “A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete”, *Construction & Building Materials*, v. 19, n. 7, pp. 516–524, 2005. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.006>.
- [12] RIBEIRO, P., MEIRA, G., FERREIRA, P., *et al.*, “Electrochemical realkalisation of carbonated concretes – Influence of material characteristics and thickness of concrete reinforcement cover”, *Construction & Building Materials*, v. 40, pp. 280–290, 2013. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.076>.
- [13] TONG, Y., BOUTEILLER, V., MARIE-VICTORIE, E., *et al.*, “Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete — Part 1: sacrificial anode process”, *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 1, pp. 84–94, 2012. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.008>.
- [14] AGUIRRE-GUERRERO, A., GUTIÉRREZ, R., “Efficiency of electrochemical realkalisation treatment on reinforced blended concrete using FTIR and TGA”, *Construction & Building Materials*, v. 193, pp. 518–528, 2018. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.195>.

- [15] PAAT ESTRELLA, J.D.L.A., MIAM CUEVAS, J.A., BANDALA, E.E., *et al.*, “Electrochemical re-alkalinization applied to carbonated concrete beams samples under the criteria of three standards”, *Revista ALCONPAT*, v. 12, n. 3, pp. 347–361, 2022. doi: <http://doi.org/10.21041/ra.v12i3.619>.
- [16] RÉUS, G.C., “Elevação da alcalinidade do concreto e restauração da camada de passivação do aço por meio da realcalinização química”, Tese de D.Sc, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.
- [17] CARVALHO, M., “Estudo da eficiência da realcalinização na repassivação de armaduras”, Tese de M.Sc., Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- [18] CARVALHO, M., MEIRA, G.R., FERREIRA, P.R.R., *et al.*, “Study of the effectiveness of realkalisation treatment on reinforcement repassivation by using simulated concrete pore solution”, *Construction & Building Materials*, v. 321, n. 126318, pp. 126318, 2022. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126318>.
- [19] UEDA, T., TAKAHASHI, H., NANASAWA, A., *et al.*, “Influence of degree of deterioration and electrolyte solution on repair effect of realkalization for reinforced concrete”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 19, n. 9, pp. 988–998, 2021. doi: <http://doi.org/10.3151/jact.19.988>.
- [20] TONG, Y., LIANG, Y., CHAO, M., “Mechanism investigations of realkalization for carbonated reinforced concrete based on real time raman spectroscopy analysis”, *Journal of Building Materials*, v. 20, n. 6, pp. 894–901, 2017.
- [21] FRARE, A., LANGARO, E., DOUZA, D.J., *et al.*, “Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil”, *Revista ALCONPAT*, v. 13, n. 1, pp. 1–27, 2023. doi: <http://doi.org/10.21041/ra.v13i1.628>.
- [22] LOPES, R.C., OLIVEIRA, A.M.D., CASCUDO, O., “Service life prediction models of concrete structures subjected to the initiation of reinforcing steel corrosion by chloride ions: contribution to the state of the art through systematic literature review-Part 1”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, pp. e202244821, 2022. doi: <http://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-44821>.
- [23] TRANFIELD, D., DENYER, D., SMART, P., “Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review”, *British Journal of Management*, v. 14, n. 3, pp. 207–222, 2003. doi: <http://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>.
- [24] GRANT, M.J., BOOTH, A., “A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies”, *Health Information and Libraries Journal*, v. 26, n. 2, pp. 91–108, 2009. <http://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>. PMID:19490148.
- [25] WOHLIN, C., “Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering”, In: *SE '14: Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, London, UK, 2014. .
- [26] VELIVASAKIS, E.E., HENRIKSEN, S.K., HAUER, R., “Chloride extraction and re-alkalization of reinforced concrete stops steel corrosion”, In: *Proceedings of the Materials Engineering Conference*, 804, p. 1127–1134, 1994.
- [27] COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO, *EN 14038-1 – Electrochemical realkalization and chloride extraction treatments for reinforced concrete. Part 1: Realkalization*, Local, European Standard, 2016.
- [28] COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO, *EN 1504-9 – Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evolution of conformity – Part 9: General principles for the use of products and systems*, Local, European Standard, 2008.
- [29] ROBERY, P., SHAW, J., “Materials for the repair and protection of concrete”, *Construction & Building Materials*, v. 11, n. 5–6, pp. 275–281, 1997. doi: [http://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00048-2](http://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00048-2).
- [30] MIETZ, I.J., “Electrochemical realkalisation for rehabilitation of reinforced concrete structures”, *Materials and Corrosion*, v. 46, n. 9, pp. 527–533, 1995. doi: <http://doi.org/10.1002/maco.19950460904>.
- [31] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, *ACI 222R-19: Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete against Corrosion*, Farmington Hills, MI, American Concrete Institute, 2019.
- [32] ANDRADE, C., CASTELLOTE, M., SARRÍA, J., *et al.*, “Evolution of pore solution chemistry, electro-osmosis and rebar corrosion rate induced by realkalisation”, *Materials and Structures*, v. 32, n. 6, pp. 427–436, 1999. doi: <http://doi.org/10.1007/BF02482714>.
- [33] CASTELLOTE, M., LLORENTE, I., ANDRADE, C., “Influence of the external solution in the electroosmotic flux induced by realkalisation”, *Materiales de Construcción*, v. 53, pp. 101–111, 2003. doi: <http://doi.org/10.3989/mc.2003.v53.i271-272.294>.

- [34] CASTELLOTE, M., LLORENTE, I., ANDRADE, C., *et al.*, “In-situ monitoring the realkalisation process by neutron diffraction: Electroosmotic flux and portlandite formation”, *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 5, pp. 791–800, 2006. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.014>.
- [35] JASNIOK, M., ZYBURA, A., “Modelling the carbonated concrete realkalization”, *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 15, n. 2, pp. 159–168, 2009. doi: <http://doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.159-168>.
- [36] RIBEIRO, P., “*Realcalinização Eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas inseridas no meio urbano – Influência de características da estrutura no comportamento do tratamento*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.
- [37] BANFILL, P., “Re-alkalisation of carbonated concrete – effect on concrete properties”, *Construction & Building Materials*, v. 11, n. 4, pp. 255–258, 1997. doi: [http://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00045-7](http://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00045-7).
- [38] BERTOLINI, L., CARSANA, M., RADAELLI, 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, pp. 376–385, 2008. doi: <http://doi.org/10.1016/j.culher.2008.01.006>.
- [39] GONZÁLEZ, F., FAJARDO, G., ARLIGUIE, G., *et al.*, “Electrochemical realkalisation of carbonated concrete: an alternative approach to prevention of reinforcing steel corrosion”, *International Journal of Electrochemical Science*, v. 6, n. 12, pp. 6332–6349, 2011. doi: [http://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)19684-2](http://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)19684-2).
- [40] FRANZONI, E., VARUM, H., NATALI, M.E., *et al.*, “Improvement of historic reinforced concrete/mortars by impregnation and electrochemical methods”, *Cement and Concrete Composites*, v. 49, pp. 50–58, 2014. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.013>.
- [41] AGUIRRE, A.M., GUTIÉRREZ, R.M.D., RESTUCCI, J.P., *et al.*, “Study of a repair technique in carbonated blended mortars: electrochemical re-alkalization”, *Dyna*, v. 83, n. 196, pp. 93–99, 2016. doi: <http://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.49249>.
- [42] ZHU, P., ZHANG, J., QU, W., “Long-term effects of electrochemical realkalization on carbonated concrete”, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, v. 14, n. 1, pp. 127–137, 2020. doi: <http://doi.org/10.1007/s11709-019-0583-x>.
- [43] BERTOLINI, L., BOLSONI, F., ELSENER, B., *et al.*, “La realcalinización y la extracción electroquímica de los cloruros en las construcciones de hormigón armado”, *Materiales de Construcción*, v. 46, n. 244, pp. 45–55, 1996. doi: <http://doi.org/10.3989/mc.1996.v46.i244.522>.
- [44] TONG, Y., BOUTEILLER, V., MARIE-VICTORIE, E., *et al.*, “Durability evaluation of a realkalisation treatment using impressed current”, In: *I1DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components* Istanbul, Turkey, 2008.
- [45] TEIXEIRA, F.A., “*Realcalinização do concreto carbonatado empregando solução rica em álcalis*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.
- [46] ARAÚJO, F.W.C., “*Contribuição à viabilização da técnica de realcalinização do concreto carbonatado através da absorção/difusão de soluções alcalinas*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.
- [47] MOREIRA, C., “*Realcalinização de estruturas de concreto carbonatado com utilização de gel saturado de solução alcalina*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.
- [48] SÁ, R., “*Influência da realcalinização por meio da absorção/difusão de soluções alcalinas na resistência à compressão do concreto, na aderência de tintas e vernizes e na repassivação da armadura*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.
- [49] RÉUS, G., JESUS, A., MEDEIROS, M., “Aplicação de solução comercial alcalina para realcalinização química de concretos carbonatados”, In: *Simpósio Paranaense de Patologia das Construções*, p. 117–128, 2017.
- [50] RÉUS, G., “*Realcalinização química como meio de recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- [51] TUUTTI, K., *Corrosion of steel in concrete*, Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [52] FERREIRA, P.R.R., MEIRA, G.R., BARBOSA, D.C., *et al.*, “Influência do grau de corrosão das armaduras na eficiência do método de realcalinização para tratamento de estruturas de concreto carbonatadas”, *Holos*, v. 7, pp. 69–80, 2017. doi: <http://doi.org/10.15628/holos.2017.5735>.

- [53] ARAÚJO, F., MELO NETO, A., HELENE, P., “Estudo da Repassivação das Armaduras em Concretos Carbonatados através da Realcalinização Química com Solução de Hidróxido de Potássio”, *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 2, n. 3, pp. 110–118, 2017. doi: <http://doi.org/10.25286/rep.v2i3.699>.
- [54] RACHADEL, A., “*Realcalinização eletroquímica de matrizes cimentícias carbonatadas: influência do tempo e da densidade de corrente elétrica*”, Tese de M.Sc., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.
- [55] POLLI, F.H., “*Efeito da realcalinização química e eletroquímica com soluções de KOH e Na₂CO₃ no desenvolvimento de reação álcali-agregado em concretos de cimento Portland*”, Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2022.
- [56] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 15577-5: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [57] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 15577-6: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [58] PEREIRA, F.M., NEVES, P.C.P.D., LENZ, D.M., *et al.*, “Avaliação da reatividade potencial de rochas utilizadas como agregados na construção civil no estado do Rio Grande do Sul”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 3, pp. e12175, 2018. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0509>.