

Compreendendo fundamentalmente a corrosão do aço induzida por carbonatação em concretos com menor impacto ambiental

C. Albert^{1*} , S. Mundra¹ , O. B. Isgor² , U. Angst¹ 

* Autor de Contato: calbert@ethz.ch

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.764>

Recebido: 01/06/2024 | Correções recebidas: 28/08/2024 | Aceito: 30/08/2024 | Publicado: 01/09/2024

RESUMO

A compreensão fundamental da cinética da corrosão induzida por carbonatação, considerando o papel da solução de poros do concreto, estrutura de poros e teor de umidade, é discutida neste artigo. Questões abertas e abordagens promissoras para esclarecê-las também são discutidas. Com base nesse conhecimento, a propagação da corrosão pode ser incluída adequadamente no projeto de vida útil de estruturas de concreto armado, conciliando os objetivos de estruturas sustentáveis e duráveis. Uma das principais soluções é empregar cimentos ecologicamente corretos com menor teor de clínquer, como aqueles que contêm materiais cimentícios suplementares. No entanto, os concretos produzidos com alguns desses cimentos são vulneráveis à carbonatação rápida. Embora as abordagens tradicionais se concentrem na prevenção da carbonatação do concreto e do início da corrosão, as evidências mostram que as taxas de corrosão do aço no concreto carbonatado não comprometem necessariamente a durabilidade.

Palavras-chave: corrosão por carbonatação; cimentos ambientalmente corretos; solução do poro; microestrutura; umidade.

Citar como: Albert, C., Mundra, S., Isgor, O. B., Angst, U. (2024), “Compreendendo fundamentalmente a corrosão do aço induzida por carbonatação em concretos com menor impacto ambiental”, Revista ALCONPAT, 14 (3), pp. 332 – 343, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.764>

¹ Durability of Engineering Materials, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

² School of Civil and Construction Engineering, Oregon State University, Oregon, USA.

Contribuição de cada autor

C. Albert e U. Angst escreveram o manuscrito original, e O. B. Isgor e S. Mundra revisaram o manuscrito.

Licença Creative Commons

Copyright (2024) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer disputa, incluindo as respostas dos autores, será publicada na segunda edição de 2025, desde que as informações sejam recebidas antes do fechamento da primeira edição de 2025.

Fundamentally understanding carbonation-induced corrosion of steel in environmentally friendly concretes

ABSTRACT

The fundamental understanding of the kinetics of carbonation-induced corrosion, considering the role of the concrete pore solution, pore structure, and moisture content, is discussed in this paper. Open questions and promising approaches to clarify them are also discussed. Based on this knowledge, corrosion propagation can be properly included in the service life design of reinforced concrete structures, reconciling the goals for both sustainable and durable structures. One of the primary solutions is employing environmentally friendly cements with lower clinker content, such as those containing supplementary cementitious materials. However, concretes produced with some of these cements are vulnerable to fast carbonation. While traditional approaches focus on preventing concrete carbonation and corrosion initiation, evidence shows that corrosion rates of steel in carbonated concrete do not necessarily compromise durability.

Keywords: carbonation-induced corrosion; environmentally friendly cements; pore solution; pore structure; moisture.

Entendiendo fundamentalmente la corrosión del acero inducida por carbonatación en hormigones con menor impacto ambiental

RESUMEN

En este documento se discute la comprensión fundamental de la cinética de la corrosión inducida por carbonatación, considerando el papel de la solución de poros del concreto, la estructura de los poros y el contenido de humedad. También se discuten las preguntas abiertas y los enfoques prometedores para aclararlos. Sobre la base de este conocimiento, la propagación de la corrosión puede incluirse adecuadamente en el diseño de la vida útil de las estructuras de hormigón armado, conciliando los objetivos de estructuras sostenibles y duraderas. Una de las principales soluciones es el empleo de cementos respetuosos con el medio ambiente con menor contenido de clínker, como los que contienen materiales cementantes complementarios. Sin embargo, los hormigones producidos con algunos de estos cementos son vulnerables a la carbonatación rápida. Si bien los enfoques tradicionales se centran en prevenir la carbonatación del concreto y el inicio de la corrosión, la evidencia muestra que las tasas de corrosión del acero en el concreto carbonatado no necesariamente comprometen la durabilidad.

Palabras clave: corrosión por carbonatación; cementos ecológicos; solución de poros; microestructura; humedad.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (Nations, no date), as emissões de gases de efeito estufa provenientes da produção de concreto precisam ser reduzidas. A indústria de cimento e concreto, bem como a comunidade científica, estão cientes disso e inúmeras abordagens foram propostas nos últimos anos, incluindo a redução do chamado "fator clínquer" através da crescente adoção de materiais cimentícios suplementares (MCS), incluindo cinzas volantes, escória, cinzas agrícolas ou argilas calcinadas. Embora o uso de MCS possa, de fato, reduzir significativamente o potencial de aquecimento global do concreto, é bem conhecido que esses sistemas tendem a carbonatar mais rapidamente devido ao seu menor buffer de pH, como resultado do teor de clínquer diluído e das reações pozolânicas dos MCS. Isso significa que a capacidade deste concreto em resistir a uma diminuição do pH da solução de poros é comprometida, e, assim, a sua alcalinidade é perdida em um tempo relativamente curto.

Essa perda de alcalinidade levanta preocupações sobre a durabilidade das estruturas de concreto, principalmente pelo risco de corrosão da armadura. Essa preocupação pode ser rastreada até a bem conhecida teoria relacionada à estabilidade termodinâmica do ferro (ou aço carbono), estipulando que o aço é passivo em meios alcalinos e, portanto, bem protegido contra a corrosão (Pourbaix, 1966). Consequentemente, a abordagem atual para garantir a durabilidade das estruturas, conforme detalhado em normas e livros, é evitar a carbonatação da camada de cobrimento do concreto, ou seja, manter a frente de carbonatação longe da armadura de aço.

No entanto, é importante ressaltar que a carbonatação por si só não leva necessariamente a taxas de corrosão elevadas, mesmo quando o aço perde sua passividade. Resultados recentes sugerem que depender exclusivamente da resistência do concreto à carbonatação para o projeto de durabilidade pode ser considerado muito conservador, pois uma avaliação de casos práticos revelou que a corrosão significativa da armadura ocorre em apenas uma minoria (10-20%) das estruturas com concreto carbonatado (Angst *et al.*, 2020). Danos como fissuração e deslocamento do concreto foram encontrados em situações em que o cobrimento de concreto é pequeno e a umidade é alta. Portanto, é aconselhável considerar tanto a fase de iniciação quanto de propagação da corrosão no projeto de durabilidade das estruturas. Em outras palavras, a abordagem puramente termodinâmica de ver o aço como passivo (alto pH) ou ativamente corroendo (pH reduzido, por exemplo, após a carbonatação) é bastante simplista.

Para considerar a propagação da corrosão, são necessárias considerações adicionais, particularmente com respeito à cinética da corrosão e, portanto, à taxa na qual se propaga o dano induzido pela corrosão da estrutura. Isso corresponde à taxa dinâmica na qual os íons de ferro são liberados durante a dissolução eletroquímica do ferro e à compreensão do seu destino em meios cimentícios. Após sua liberação, os íons de ferro podem oxidar, difundir e precipitar como produtos de corrosão insolúveis, o que pode, em último caso, levar ao dano do concreto. Este artigo chama a atenção para aspectos críticos que influenciam a etapa de propagação da corrosão do aço no concreto armado: a solução dos poros do concreto, a estrutura dos poros e o teor de umidade.

2. CINÉTICA DA CORROSÃO INDUZIDA POR CARBONATAÇÃO

A corrosão induzida pela carbonatação do concreto é descrita aqui como um processo influenciado por três aspectos principais: a solução dos poros do concreto, a estrutura dos poros do concreto e a umidade do concreto. Estes aspectos são ilustrados em um esquema da interface aço-concreto (SCI, do inglês steel-concrete interface) na Figura 1, com o aço exposto a fases cimentícias e poros, saturados ou não. Esta figura é baseada na compreensão da dissolução eletroquímica do metal em um meio poroso, de acordo com o conceito apresentado por (Stefanoni, Angst and Elsener, 2019). O papel de cada um desses aspectos é discutido nas seções seguintes.

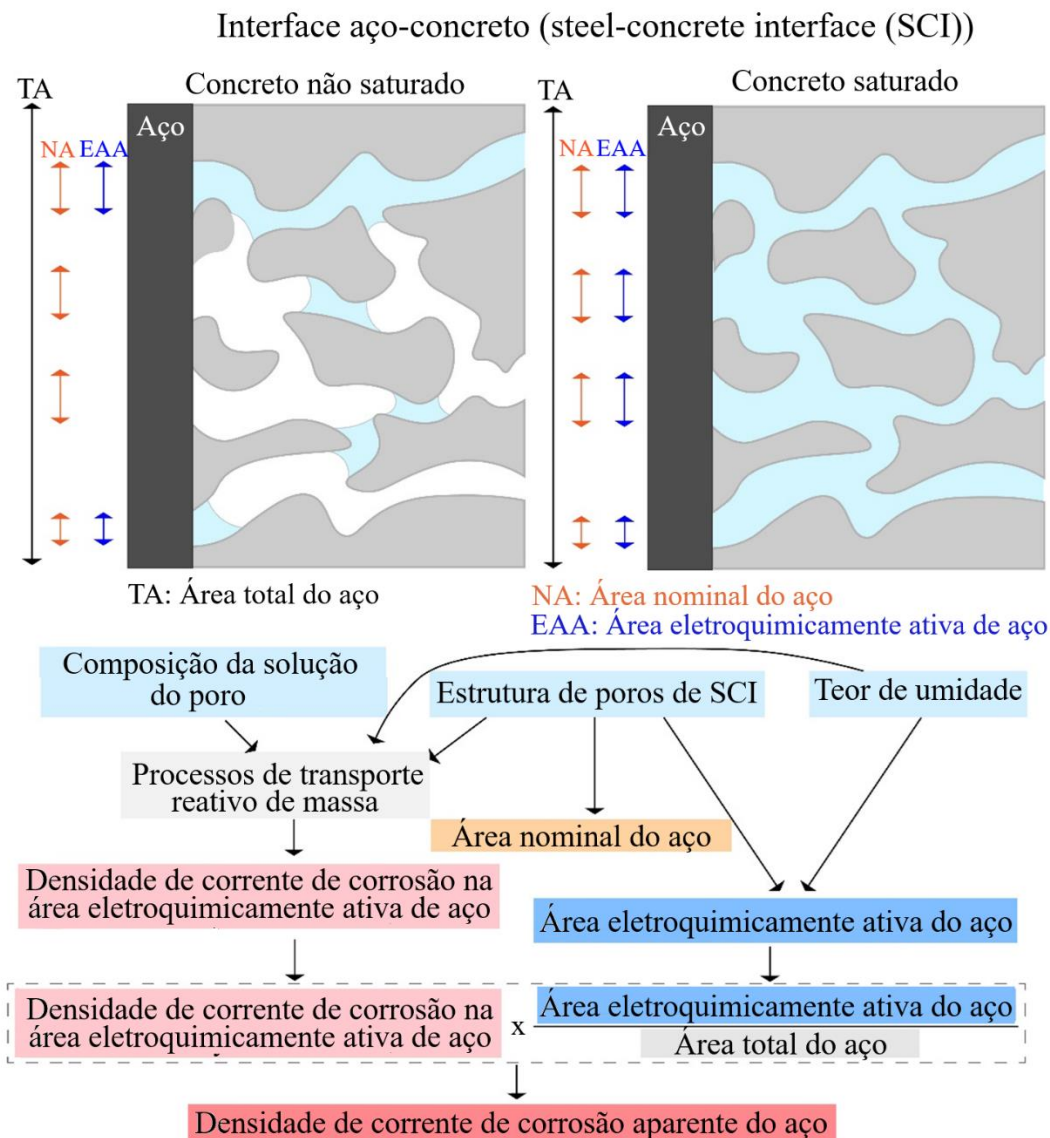


Figure 1. A interface aço-concreto e o papel da solução dos poros do concreto, da estrutura dos poros e da umidade na cinética da corrosão do aço em concreto carbonatado. Adaptado de (Stefanoni, Angst and Elsener, 2019).

2.1 O papel da solução de poros do concreto

Uma célula eletroquímica é formada essencialmente por (i) uma reação anódica, como a oxidação do ferro ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$) e (ii) uma reação catódica, que no caso do concreto armado é mais comumente a redução do oxigênio ($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$), as quais devem estar conectadas por um caminho metálico (e.g., armadura) e iônico (e.g., solução do poro). A composição da solução dos poros do concreto é crítica para definir o mecanismo de corrosão no sistema e a cinética das reações. Por exemplo, o ferro pode passivar em condições alcalinas (e.g., $\text{pH} > 12$), enquanto o filme passivo pode ser destruído localmente na presença de cloretos, levando à corrosão por pites do metal. No caso da carbonatação do concreto e da redução do pH da solução dos poros, o metal pode despassivar e corroer uniformemente, pois o filme passivo não é termodinamicamente estável em pHs circumneutros (Pourbaix, 1966). Nesse caso, a taxa de corrosão depende da composição da solução dos poros.

Primeiramente, o oxigênio dissolvido na solução dos poros geralmente não é o fator limitante para a cinética da reação de corrosão (Stefanoni, Angst and Elsener, 2020). Isso ocorre porque a

corrosão induzida por carbonatação é mais crítica para estruturas expostas a ciclos de molhagem e secagem, favorecendo alternadamente a carbonatação (e também a entrada de oxigênio) em ambientes secos; ou a corrosão do aço em concretos com umidade elevada (M. Stefanoni, Angst and Elsener, 2018).

Quanto aos íons presentes na solução dos poros carbonatada, o CO₂ atmosférico se dissolve na solução dos poros do concreto, formando íons bicarbonato ou carbonato (De Weerd *et al.*, 2019). Os íons carbonato predominam em soluções com pH acima de 10, nos estágios iniciais da carbonatação, enquanto os íons bicarbonato predominam em pHs mais baixos, associados aos estágios avançados da carbonatação. Papéis opostos têm sido reportados para estes íons dependendo de suas respectivas concentrações na solução de poros (Davies and Burstein, 1980; Huet *et al.*, 2005, 2010; Gadala and Alfantazi, 2014; Martinelli-Orlando, Shi and Angst, 2020; Gao *et al.*, 2022). Íons carbonato podem aumentar a taxa de corrosão ao formar complexos com íons de ferro e, assim, induzir uma maior dissolução do metal (Martinelli-Orlando, Shi and Angst, 2020). Alternativamente, íons carbonato podem, sob certas condições, formar siderita (FeCO₃) na superfície do metal e potencialmente diminuir a cinética da corrosão (Gadala and Alfantazi, 2014; Gao *et al.*, 2022). Experimentos ainda não publicados com aço exposto a soluções com buffer a pH 8 mostram que os íons bicarbonato não alteram significativamente as taxas de corrosão do aço. Na verdade, essas taxas são relativamente baixas, inferiores a 0,5 µA/cm².

Durante a carbonatação, o cálcio dos produtos de hidratação do cimento é consumido para formar carbonato de cálcio, modificando assim as fases presentes no sistema (von Greve-Dierfeld *et al.*, 2020). Este processo também libera íons cloreto e sulfato previamente contidos nos hidratos de cimento, como os sais de Friedel e a etringita (De Weerd *et al.*, 2019). Mesmo em baixas concentrações na solução dos poros, como 10 mmol/L, esses íons podem aumentar a taxa de corrosão do aço em 2 ordens de magnitude (Albert *et al.*, 2023). Trabalhos não publicados sobre aço imerso em soluções com buffer a pH 8 também indicam que os íons bicarbonato podem inicialmente aumentar a resistência à corrosão do aço, particularmente na presença de cloretos. Possivelmente, uma camada de hidróxidos pouco protetores pode se formar na superfície do aço e protegê-lo do ataque dos cloretos nos estágios iniciais (Gao *et al.*, 2022). No entanto, uma vez que essa camada é destruída localmente, as taxas de corrosão podem ser ainda maiores do que na ausência de íons bicarbonato (Mao, Liu and Revie, 1994). Aprimorar a compreensão em nível fundamental sobre o efeito desses íons em condições de baixo pH é crucial para elucidar a cinética da corrosão do aço em concreto carbonatado.

Sugerimos que experimentos eletroquímicos em configurações de bancada, por exemplo, utilizando um eletrodo de disco rotativo, são adequados para estudar especificamente o efeito da composição da solução dos poros em condições controladas, em particular aquelas relacionadas à composição do eletrólito na superfície do metal. Por exemplo, a Figura 2 ilustra o efeito dos íons bicarbonato controlados pelo transporte de massa na dissolução anódica do ferro. Isso é evidente pelo efeito da velocidade de rotação nos resultados de voltametria cíclica do aço imerso em uma solução de pH 8 contendo 10 mmol/L de NaHCO₃. Maiores velocidades de rotação reduzem a espessura da camada de difusão na superfície do metal, aumentando assim a disponibilidade de espécies iônicas da solução para o metal e, portanto, aumentando os picos de densidade de corrente nos voltamogramas da Figura 2. Esses experimentos permitem o estudo dos efeitos da composição química da solução dos poros e da disponibilidade de espécies químicas na interface com o metal para a cinética de corrosão do aço sob condições bem definidas.

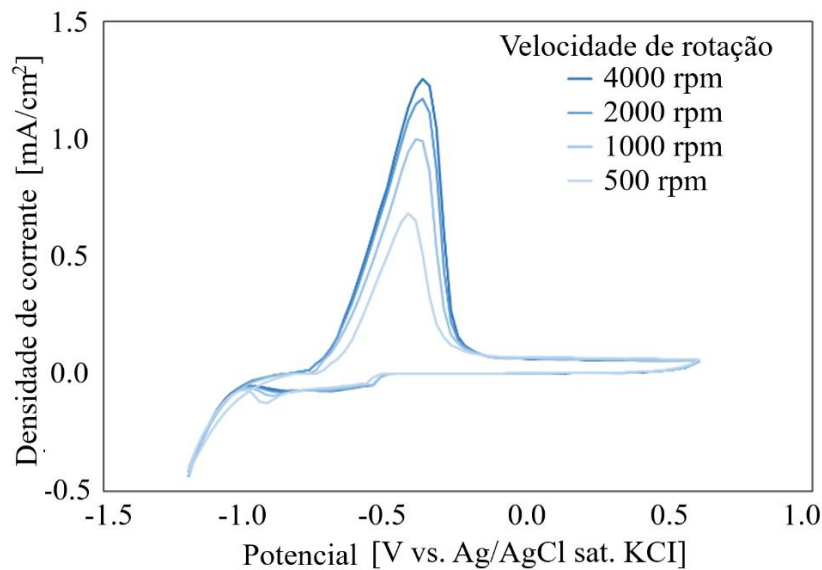


Figura 2. Voltamogramas cíclicos do aço imerso em solução de pH 8 com buffer, 50 mMol Hepes + 10 mMol NaHCO₃, e injeção de gás N₂, obtidos em um experimento com um eletrodo de disco rotativo com uma série de velocidades de rotação.

O próximo passo é relacionar esse conhecimento fundamental – o efeito dos íons presentes na superfície do metal na cinética da corrosão– a um contexto prático. Mais especificamente, a composição da solução dos poros de concretos carbonatados produzidos com MCS deve ser sistematicamente determinada. Os dados disponíveis na literatura são escassos e amplamente dispersos, particularmente para concretos com MCS pozolânicos, como sumarizado por (Albert, Isgor and Angst, 2022) e mostrado na Figura 3 com o histograma da faixa de pHs relatados para a solução dos poros de concretos carbonatados. A coleta desses dados permanece um desafio, uma vez que amostras carbonatadas são tipicamente mantidas secas (50-65% de umidade relativa) para acelerar a entrada de CO₂ no concreto, o que, por outro lado, limita a quantidade de solução dos poros que pode ser extraída pelo método tradicional de retirada da solução dos poros por pressão aplicada.

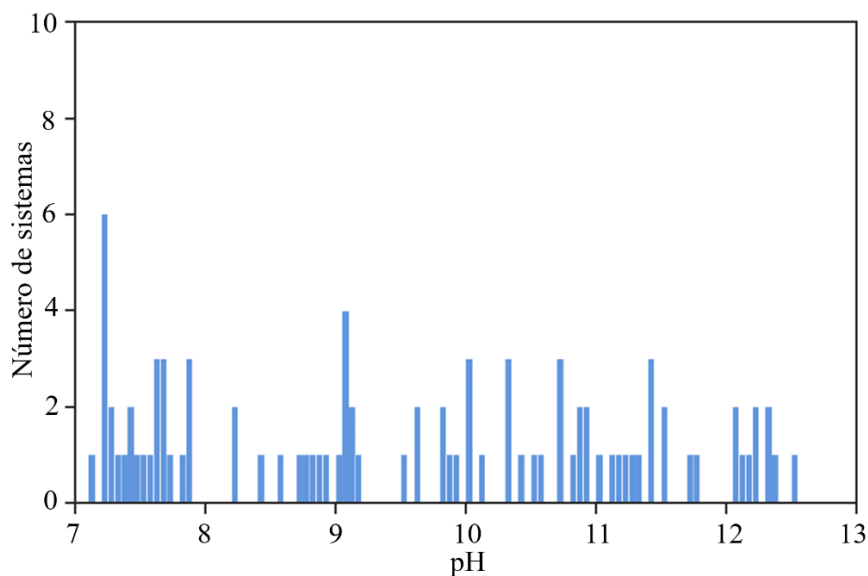


Figura 3. Histograma de pHs da solução dos poros reportados na literatura para concretos com diferentes graus de carbonatação, coletados de 7 estudos (Albert, Isgor and Angst, 2022).

No entanto, propomos explorar abordagens alternativas para aprimorar o estado da arte da composição da solução dos poros em concreto carbonatado. Isso pode incluir métodos de lixiviação ou expressão da solução dos poros após a ressaturação das amostras carbonatadas. Ainda assim, estabelecer um banco de dados confiável das composições da solução dos poros de concretos carbonatados contendo MCS continua sendo um importante desafio de pesquisa, que sugerimos ser priorizado pela comunidade científica.

2.2 O papel da estrutura de poros do concreto

O segundo fator que contribui para a complexidade da corrosão do aço em concreto carbonatado é a estrutura dos poros da matriz cimentícia. No processo de iniciação da corrosão, a estrutura dos poros da camada de cobertura do concreto afeta a taxa de ingresso de CO_2 e outros agentes agressivos. Por outro lado, durante a propagação da corrosão, a estrutura dos poros na interface aço-concreto (SCI) é o fator mais importante. Em escala microscópica, a SCI é composta por fases cimentícias sólidas, poros preenchidos com ar (O_2) e poros parcialmente ou completamente saturados com solução dos poros, conforme esquematizado na Figura 1. A área máxima de aço que pode corroer ativamente corresponde à região exposta à solução dos poros, uma vez que as fases cimentícias ou poros secos não oferecem um meio eficiente para o transporte de íons e o estabelecimento de uma célula eletroquímica. Assim, a estrutura dos poros na SCI define as áreas de aço disponíveis para corroer. Além disso, a estrutura dos poros na região interfacial domina os processos de transporte reativo de massa dos íons de ferro e outras espécies aquosas, processos que estão intrinsecamente vinculados à taxa de dissolução eletroquímica do metal. Este novo framework para a compreensão da dissolução de metais em meios porosos é explicado em mais detalhes em outras publicações (Matteo Stefanoni, Angst and Elsener, 2018; Stefanoni, Angst and Elsener, 2019).

Para a corrosão do aço em concreto carbonatado, isso significa que concretos mais porosos também terão uma fração maior de aço em contato com poros, que eventualmente podem ser preenchidos com eletrólito e conter uma célula eletroquímica. É bem conhecido que fatores como uma menor relação água/cimento e tempos de cura mais longos contribuem para a diminuição da porosidade do concreto (Neville and Brooks, 2010; Mehta and Monteiro, 2014). Progresso também foi feito em abordar o efeito dos MCS na microestrutura do concreto (Lothenbach, Scrivener and Hooton, 2011; Berodier and Scrivener, 2015). No entanto, a compreensão da microestrutura de concretos carbonatados produzidos com cimentos contendo MCS ainda está em progresso (Shah and Bishnoi, 2018; von Greve-Dierfeld *et al.*, 2020), sendo que o foco principal geralmente é a estrutura dos poros geral e não na interface com o aço. A estrutura dos poros na SCI não é a mesma que no concreto, devido a vários motivos, como os efeitos de parede que desempenham um papel na distribuição dos produtos de hidratação do cimento e levam a um aumento da porosidade na SCI (Horne, Richardson and Brydson, 2007; Angst *et al.*, 2017). Portanto, enfatizamos que são necessários mais esforços de pesquisa para caracterizar, em micro ou nanoescala, a estrutura dos poros da SCI em concretos carbonatados produzidos com MCS. Algumas abordagens promissoras podem incluir a nanotomografia MEV-FIB (Ruffray *et al.*, 2023) e a tomografia de raios X (Wong *et al.*, 2022), e acreditamos que o progresso nessas tecnologias deve ser incorporado para obter as informações necessárias sobre as características estruturais da SCI relevantes para a corrosão do aço em concreto carbonatado. Um exemplo da caracterização da SCI por nanotomografia MEV-FIB é mostrado na Figura 4, com o metal (esquerda) junto às fases cimentícias (cinza) e poros (preto) (Ruffray *et al.*, 2023).



Figura 4. Nanotomografia MEV-FIB da estrutura de poros na interface aço-concreto (Ruffray *et al.*, 2023).

Além disso, a distribuição do tamanho dos poros do concreto influencia as propriedades de retenção de umidade do material. Quando a umidade penetra no concreto, eletrólito fica presente nos poros em contato com o aço, aumentando a área eletroquimicamente ativa do aço, como mostrado na Figura 1. Isso é conhecido como o efeito de área (Matteo Stefanoni, Angst and Elsener, 2018; Stefanoni, Angst and Elsener, 2019). A estrutura dos poros do concreto está entrelaçada com o teor de umidade nos poros, em função da umidade relativa, e essa relação é descrita pelas isotermas de sorção. O efeito da umidade será discutido com mais detalhes na próxima seção.

2.3 O papel da umidade

Sabe-se que o aumento do teor de umidade do concreto leva a taxas de corrosão mais altas das armaduras de aço (M. Stefanoni, Angst and Elsener, 2018; Angst *et al.*, 2020). Caracterizar o teor de umidade na SCI é crucial para avaliar a área eletroquimicamente ativa do aço no concreto. Para alcançar esse objetivo, é necessário primeiro melhorar a compreensão da estrutura de poros heterogênea na SCI. Além disso, estudos em condições de umidade em equilíbrio são essenciais para fornecer a base fundamental para a corrosão do aço no concreto e informações sobre as taxas instantâneas de corrosão do aço. Como a corrosão induzida por carbonatação é crítica para estruturas expostas a ciclos de molhagem/secagem, a investigação do transporte de umidade no concreto é um passo adicional para entender a transição entre diferentes estados de umidade.

Para responder a essas questões, métodos avançados de síncrotron, como a imagem multimodal combinando tomografia de raios X e nêutrons, podem fornecer informações complementares sobre a estrutura dos poros e a distribuição de água na SCI em escala micrométrica (Wong *et al.*, 2022). Enquanto os raios X são sensíveis às fases cimentícias, os nêutrons são sensíveis à umidade, fornecendo informações complementares e permitindo estimar a presença de umidade dentro dos poros. Poros localizados na SCI podem conter uma célula eletroquímica, cuja evolução pode ser acompanhada pela presença de água e estabelecimento de uma área eletroquimicamente ativa do aço. Acompanhar a precipitação de produtos de corrosão nesses vazios é altamente interessante para a pesquisa de propagação da corrosão. No entanto, a resolução dos métodos de tomografia atuais não fornece informações sobre os poros capilares menores, em escala nanométrica. Isso levanta questões sobre a conectividade dos poros capilares e poros de ar, influenciando o transporte de umidade na estrutura dos poros. Por exemplo, isso pode levar a poros de ar totalmente saturados ou parcialmente saturados com ar aprisionado.

A caracterização detalhada em 3D da estrutura dos poros, incluindo os poros capilares, pode ser alcançada por nanotomografia FIB-MEV, com resolução espacial atingindo dezenas de nanômetros (Ruffray *et al.*, 2023). No entanto, apenas a estrutura dos poros pode ser monitorada neste caso, uma vez que as medições são conduzidas a vácuo e o feixe de íons focalizado remove camadas da amostra em cada medição. O tratamento dessa sequência de imagens permite que a estrutura dos

poros na SCI seja reconstruída e visualizada em 3D. Além disso, a estrutura dos poros pode ser reproduzida digitalmente (Schmid *et al.*, 2022) e utilizada em simulações de transporte de umidade na SCI (Malenica, Zhang and Angst, 2023) com dados reais.

Além disso, a aplicação simultânea de técnicas de imagem sensíveis à umidade, como obtidas por tomografia com nêutrons, e técnicas eletroquímicas pode fornecer informações significativas sobre processos conectados e não estacionários. É o caso do ingresso de umidade no concreto e da resposta eletroquímica do aço. Zhang et al. (Zhang *et al.*, 2022) observaram que, assim que a frente de água alcançou o nível do aço no concreto, o potencial de corrosão do aço caiu significativamente e a taxa de corrosão aumentou em 2 ordens de magnitude. Isso destaca a importância de estudos científicos que abordem o comportamento dinâmico e não estacionário do aço no concreto durante eventos de molhagem e secagem.

2.4 Precipitação de produtos de corrosão

Compreender a fase avançada de propagação da corrosão é altamente valioso, particularmente no que diz respeito à precipitação de produtos de corrosão e ao potencial dano estrutural que possam causar. Pesquisas têm se concentrado principalmente no estudo da precipitação de hidróxidos de ferro a partir de fontes supersaturadas de íons férricos (Fe(III)) e seus subsequentes processos de transformação de fase em diferentes pHs (Schwertmann and Murad, 1983; Schwertmann, Stanjek and Becher, 2004; Furcas *et al.*, 2023). A validação in-situ dessas reações para a corrosão natural do ferro é uma tarefa altamente desafiadora, pois os processos cinéticos de dissolução, oxidação do ferro (Pham and Waite, 2008; Mundra *et al.*, 2023), difusão, precipitação e transformação de fase ocorrem em múltiplas escalas da estrutura de poros no entorno do aço. Várias tentativas foram feitas para analisar a formação e evolução dos produtos de corrosão na SCI, por meio de testes destrutivos, mas os problemas com a metodologia desses estudos foram amplamente destacados (Zhang *et al.*, 2020), como a oxidação dos hidróxidos de ferro quando expostos ao ar. Assim, para entender a evolução dos hidróxidos de ferro precipitados a partir das reações de corrosão, a investigação in-situ da corrosão do ferro é crítica. Nesse sentido, questões em aberto dizem respeito ao tipo e distribuição dos produtos de corrosão ao longo da estrutura dos poros do concreto, mais especificamente, ao tipo de hidr(óxidos) ferrosos ou férricos formados, seus respectivos volumes, sua precipitação próxima a SCI ou sua mobilidade através da estrutura dos poros do concreto, minimizando a pressão exercida sobre a camada de concreto de cobrimento. Tal trabalho está atualmente em andamento pelos autores (Albert *et al.*, 2024).

3. CONCLUSÃO

Conhecimentos novos e fundamentais sobre a corrosão do aço e processos associados em concreto carbonatado são necessários para garantir um projeto de vida útil confiável para novos tipos de cimento com menor impacto ambiental. A investigação sistemática da corrosão do aço em concreto carbonatado, em função da composição da solução de poros, da estrutura dos poros e da umidade, pode ser combinada para melhorar a compreensão mecanística dos processos de corrosão. Essas informações são necessárias para refinar modelos de propagação da corrosão e, portanto, a capacidade de prever a vida útil das estruturas.

Para atingir esses objetivos, vemos oportunidades em adotar uma gama de técnicas experimentais, combinando abordagens tradicionais e inovadoras. Por exemplo, experimentos eletroquímicos controlados, como o uso de eletrodos de disco rotativo, são promissores para elucidar o efeito da solução de poros do concreto na corrosão do aço. Além disso, a investigação da estrutura dos poros na interface aço-concreto e suas condições de umidade é crítica para definir as áreas eletroquimicamente ativas do aço. Os avanços nas técnicas de imagem, como a tomografia multimodal com nêutrons e raios X, a nanotomografia MEV-FIB, especialmente quando combinados com medições eletroquímicas, oferecem um potencial significativo para caracterizar

Compreendendo fundamentalmente a corrosão do aço induzida por carbonatação em concretos com menor impacto ambiental

os processos que ocorrem na interface aço-concreto. Além disso, os produtos de corrosão formados na interface aço-concreto e sua transformação ao longo do tempo podem ser caracterizados com várias técnicas. Esse conhecimento é necessário para modelar os estágios avançados de propagação da corrosão e suas consequências no aparecimento de fissuras e deslocamento do concreto.

Com base em novos conhecimentos fundamentais, o paradigma de evitar a carbonatação do concreto pode – e precisa – ser alterado para um novo paradigma focado em evitar a corrosão e os danos relacionados à corrosão. Por exemplo, em vez de considerar o concreto de cobertura como uma defesa contra a carbonatação atingir o nível do aço, essa camada pode ser vista como uma proteção contra a entrada de água (Angst, 2023). Assim, manter o concreto em um estado de umidade reduzida pode levar a baixas taxas de corrosão do aço, mesmo em concreto carbonatado.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem Ola Berg Edseth pelos dados experimentais reproduzidos na Figura 2, e Thilo Schmid pela imagem da estrutura de poros da interface aço-concreto reproduzida na Figura 4.

5. REFERÊNCIAS

- Albert, C., Mundra, S., Burkan Isgor, O., Angst, U. (2023), *Corrosion Kinetics of Steel in Carbonated Pore Solutions Containing Chlorides and Sulphates*. In: Jędrzejewska, A., Kanavaris, F., Azenha, M., Benboudjema, F., Schlicke, D. (eds) International RILEM Conference on Synergising Expertise towards Sustainability and Robustness of Cement-based Materials and Concrete Structures. SynerCrete 2023. RILEM Bookseries, vol 44. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33187-9_97
- Albert, C., Isgor, B. and Angst, U. (2022), “Literature-based data on pore solution compositions of cementitious systems”. ETH repository. Available at: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000543461>
- Albert, C. C., Mundra, S., Sanchez, D. F., Furcas, F. E., Rajyaguru, A. D., Isgor, O. B., Grolimund, D., Angst, U. M. (2024), *Microscale chemical imaging to characterize and quantify corrosion processes at the metal-electrolyte interface*. Materials Science, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02327>
- Angst, U.; Moro, F.; Geiker, M.; Kessler, S.; Beushausen, H.; Andrade, C.; Lahdensivu, J.; Köliö, A.; Imamoto, K.-ichi; von Greve-Dierfeld, S.; Serdar, M. (2020), “Corrosion of steel in carbonated concrete: Mechanisms, practical experience, and research priorities – A critical review by RILEM TC 281-CCC”, RILEM Technical Letters, 5, pp. 85–100. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.127>
- Angst, U. M., Geiker, M. R., Michel, A., Gehlen, C., Wong, H., Isgor, O. B., Elsener, B., Hansson, C. M., François, R., Hornbostel, K., Polder, R., Alonso, M. C., Sanchez, M., Correia, M. J., Criado, M., Sagüés, A., Buenfeld, N. (2017), ‘The steel–concrete interface’, Materials and Structures, 50(143), pp. 1–24. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1010-1>
- Ueli, M. A. (2023), *Steel corrosion in concrete – Achilles' heel for sustainable concrete?*, Cement and Concrete Research, Volume 172, 107239, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107239>
- Berodier, E., Scrivener, K. (2015), *Evolution of pore structure in blended systems*, Cement and Concrete Research, Volume 73, Pages 25-35, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.025>.
- Davies, D. H., Burstein, G. T. (1980), “Effects of Bicarbonate on the Corrosion and Passivation of Iron.”, Corrosion (The Journal of Science & Engineering), 36 (8), pp. 416–422. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-36.8.416>.

- Furcas, F. E., Lothenbach, B., Mundra, S., Borca, C. N., Albert, C. C., Isgor, O. B., Huthwelker, T., Angst, U. M. (2023), *Transformation of 2-Line Ferrihydrite to Goethite at Alkaline pH*. Environmental science & technology, 57(42), 16097–16108. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05260>
- Gadala, I. M., Alfantazi, A. (2014), ‘*Electrochemical behavior of API-X100 pipeline steel in NS4, near-neutral, and mildly alkaline pH simulated soil solutions*’, Corrosion Science, 82, pp. 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.12.020>
- Gao, M., Wang, H., Song, Y., Han, E.-H. (2022), *Corrosion behavior on carbon steel in a simulated soil solution under the interaction effect of chloride and bicarbonate ions*, Journal of Materials Research and Technology, Volume 21, Pages 3014-3024, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.133>.
- von Greve-Dierfeld, S., Lothenbach, B., Vollpracht, A. et al. (2020), Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. Materials and Structures, 53, 136. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>
- Horne, A. T., Richardson, I. G., Brydson, R. M. D. (2007), *Quantitative analysis of the microstructure of interfaces in steel reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 12, Pages 1613-1623, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.026>
- Huet, B., L’Hostis, V. Miserque, F., Idrissi, H. (2005), *Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution*, Electrochimica Acta, Volume 51, Issue 1, Pages 172-180, ISSN 0013-4686, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.04.014>.
- Huet, B., L’Hostis, V., Tricheux, L., Idrissi, H. (2010), ‘*Influence of alkali, silicate, and sulfate content of carbonated concrete pore solution on mild steel corrosion behavior*’, Materials and Corrosion, 61(2), pp. 111–124. Available at: <https://doi.org/10.1002/maco.200905244>.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D. (2011), *Supplementary cementitious materials*, Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 12, Pages 1244-1256, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.
- Malenica, L., Zhang, Z. and Angst, U. (2023), ‘*Direct numerical modelling of multiphase flow through reinforced porous media*’, InterPore2023: Book of Abstracts. Amsterdam: InterPore, pp. 194–195.
- Mao, X., Liu, X. and Revie, R.W. (1994), ‘*Pitting corrosion of pipeline steel in dilute bicarbonate solution with chloride ions*’, Corrosion, 50(9), pp. 651–657. <https://doi.org/10.5006/1.3293540>.
- Martinelli-Orlando, F., Shi, W. and Angst, U. (2020), ‘*Corrosion Behavior of Carbon Steel in Alkaline, Deaerated Solutions: Influence of Carbonate Ions*’, Journal of The Electrochemical Society, 167(6), p. 061503. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab7d44>.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014), “*Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*”, Fourth Edition. ISBN: 9780071797870, Publication Date & Copyright: 2014 McGraw-Hill Education
- Mundra, S., Tits, J., Wieland, E., Angst, U. M. (2023), *Aerobic and anaerobic oxidation of ferrous ions in near-neutral solutions*, Chemosphere, Volume 335, 138955, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138955>.
- Nations, U. (no date), *Sustainable development goals*. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-change>.
- Neville, A. M., Brooks, J. J. (2010), *Concrete Technology*. 2nd Edition, Pearson Education Ltd., London.
- Pham, A. N., Waite, T. D. (2008), *Oxygenation of Fe(II) in natural waters revisited: Kinetic modeling approaches, rate constant estimation and the importance of various reaction pathways*, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 72, Issue 15, Pages 3616-3630, ISSN 0016-7037, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.05.032>.
- Pourbaix, M. (1966), *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*, NACE International

Cebelcor.

Ruffray, N., Angst, U. M., Schmid, T., Zhang, Z., Isgor, O. B. (2023), ‘*Three-dimensional characterization of the steel-concrete interface by FIB-SEM nanotomography*’. Condensed Matter, Materials Science, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.04322>

Schmid, T., Zhang, Z., Ruffray, N., Griffa, M., Isgor, O. B., Angst, U. (2022), ‘*Toward a digital twin of the steel-concrete interface for numerical corrosion studies*’, in 2022 Book of Extended Abstracts. 6th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR 2022), Cape Town: s.n., pp. 68–69.

Schwertmann, U., Murad, E. (1983), ‘*Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite.*’, Clays & Clay Minerals, 31(4), pp. 277–284. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1983.0310405>

Schwertmann, U., Stanjek, H., Becher, H.-H. (2004), ‘*Long-term in vitro transformation of 2-line ferrihydrite to goethite/hematite at 4, 10, 15 and 25°C*’, Clay Minerals, 39(4), pp. 433–438. <https://doi.org/10.1180/0009855043940145>

Shah, V., Bishnoi, S. (2018), ‘*Analysis of Pore Structure Characteristics of Carbonated Low-Clinker Cements*’, Transport in Porous Media, 124(3), pp. 861–881. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1101-7>

Stefanoni, M., Angst, U., Elsener, B. (2018), ‘*Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review*’, Cement and Concrete Research, 103(June), pp. 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.007>

Stefanoni, M., Angst, U., Elsener, B. (2020), ‘*The mechanism controlling corrosion of steel in carbonated cementitious materials in wetting and drying exposure*’, Cement and Concrete Composites, 113(June), p. 103717. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103717>

Stefanoni, M., Angst, U. M., Elsener, B. (2018), ‘*Electrochemistry and capillary condensation theory reveal the mechanism of corrosion in dense porous media*’, Scientific Reports, 8(1), pp. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25794-x>.

Stefanoni, M., Angst, U. M., Elsener, B. (2019), ‘*Kinetics of electrochemical dissolution of metals in porous media*’, Nature Materials, 18 (9), pp. 942–947, <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0439-8>.

De Weerd, K., Plusquellec, G., Belda Revert, A., Geiker, M.R., Lothenbach, B. (2019), ‘*Effect of carbonation on the pore solution of mortar*’, Cement and Concrete Research, Volume 118, Pages 38-56, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.004>.

Wong, H. S., Angst, U. M., Geiker, M. R., Isgor, O. B., Elsener, B., Michel, A., Alonso, M. C., Correia, M., Pacheco, J., Gulikers, J., Zhao, Y., Criado, M., Raupach, M., Sørensen, H., François, R., Mundra, S., Rasol, M., Polder, R. (2022), ‘*Methods for characterising the steel–concrete interface to enhance understanding of reinforcement corrosion: a critical review by RILEM TC 262-SCF*’, Materials and Structures, 55(4). <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01961-5>.

Zhang, Z., Shakoorioskooie, M., Griffa, M., Lura, P., Angst, U. (2020), ‘*A laboratory investigation of cutting damage to the steel-concrete interface*’, Cement and Concrete Research, Volume 138, 106229, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106229>.

Zhang, Z., Trtik, P., Ren, F., Schmid, T., Dreimol, C. H., Angst, U. (2022), ‘*Dynamic effect of water penetration on steel corrosion in carbonated mortar: A neutron imaging, electrochemical, and modeling study*’, CEMENT, Volume 9, 100043, ISSN 2666-5492, <https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100043>.