

Utilização do concreto autocicatrizante e sua influência na corrosão das armaduras

Use of self-healing concrete and its influence on reinforcement corrosion

Uso de hormigón autorreparable y su influencia en la corrosión de las armaduras

Recebido: 16/11/2022 | Revisado: 29/11/2022 | Aceitado: 01/12/2022 | Publicado: 10/12/2022

Bruna Caroline Schmidt

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6266-430X>
Universidade Feevale, Brasil
E-mail: brunaeschmidt@hotmail.com

Letícia Andreoli Dias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1157-8839>
Universidade Feevale, Brasil
E-mail: leticia.dias.nh@hotmail.com

Alice Helena Meinhart

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-3352>
Universidade Feevale, Brasil
E-mail: alicehmei@gmail.com

Sandra Raquel Kunst

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8060-3981>
Projeto de Fixação de Recursos Humanos do CNPq - Nível A (RHAE), Brasil
E-mail: tessaro.sandra@gmail.com

Cláudia Trindade Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4472-5359>
Universidade Feevale, Brasil
E-mail: ctofeevale@gmail.com

Daiana Cristina Metz Arnold

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0048-3028>
Universidade Feevale, Brasil
E-mail: daim@feevale.br

Resumo

O concreto é um material poroso que possui baixa resistência à tração, o que o torna suscetível a fissuração, possibilitando infiltração de água e agentes agressivos, tornando a armadura, se existente, vulnerável ao processo corrosivo. Assim, torna-se necessária a busca por soluções que reduzam a permeabilidade do material, e a utilização de concreto com propriedades autocicatrizantes apresenta-se como alternativa para atenuar os efeitos da fissuração. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é avaliar a influência da corrosão das armaduras com a utilização de concreto autocicatrizante. Para tanto, analisou-se a eficiência de um concreto com aditivo impermeabilizante por cristalização integral, com capacidade de autocicatrização de microfissuras de até 0,4 mm, comparando corpos de prova cilíndricos e prismáticos, com e sem aditivo, em ensaios de resistência à compressão, para avaliar possíveis alterações nas propriedades mecânicas do concreto, além do ensaio de corrosão acelerada para avaliar a influência do aditivo na mistura frente ao fator corrosão. Aplicou-se ciclos de imersão parcial, em solução de NaCl (3,5%), e secagem, em todos os corpos de prova e, após finalizados os ciclos, realizou-se ensaios para avaliação de corrosão. Por fim, constatou-se que a incorporação de aditivo não influenciou significativamente a resistência à compressão do concreto, além de não influenciar, de forma considerável, a prevenção de corrosão das armaduras durante o período analisado. Desta forma, não pode-se concluir que a utilização do concreto autocicatrizante analisado possa ser uma alternativa para problemas de durabilidade.

Palavras-chave: Concreto; Autocicatrizante; Aditivo; Corrosão de armaduras.

Abstract

Concrete is a porous material that has low tensile strength, which makes it susceptible to cracking, allowing infiltration of water and aggressive agents, making the reinforcement, if any, vulnerable to the corrosive process. Thus, it becomes necessary to search for solutions that reduce the permeability of the material, and the use of concrete with self-healing properties is presented as an alternative to attenuate the effects of cracking. In this sense, the objective of this work is to evaluate the influence of reinforcement corrosion with the use of self-healing concrete. Therefore, the efficiency of a concrete with waterproofing additive by integral crystallization, with the ability to self-heal microcracks of up to 0.4 mm, was analyzed, comparing cylindrical and prismatic specimens, with and without additive, in compressive strength tests. , to evaluate possible changes in the mechanical properties of concrete, in addition to the accelerated corrosion test to evaluate the influence of the additive in the mixture against the corrosion factor. Cycles of partial immersion in

NaCl solution (3.5%) and drying were applied to all specimens and, after completing the cycles, tests were carried out to evaluate corrosion. Finally, it was found that the incorporation of the additive did not significantly influence the compressive strength of the concrete, in addition to not significantly influencing the prevention of corrosion of the reinforcement during the analyzed period. Thus, it cannot be concluded that the use of self-healing concrete analyzed can be an alternative for durability problems.

Keywords: Concrete; Self-healing; Additive; Armor corrosion.

Resumen

El hormigón es un material poroso que tiene baja resistencia a la tracción, lo que lo hace susceptible de fisurarse, permitiendo la infiltración de agua y agentes agresivos, haciendo que el refuerzo, si lo hubiere, sea vulnerable al proceso corrosivo. Así, se hace necesaria la búsqueda de soluciones que reduzcan la permeabilidad del material, y el uso de hormigones con propiedades autorreparables se presenta como una alternativa para atenuar los efectos de fisuración. En este sentido, el objetivo de este trabajo es evaluar la influencia de la corrosión de las armaduras con el uso de hormigón autorreparable. Por lo tanto, se analizó la eficiencia de un concreto con aditivo impermeabilizante por cristalización integral, con capacidad de autocuración de microfisuras de hasta 0.4 mm, comparando probetas cilíndricas y prismáticas, con y sin aditivo, en ensayos de resistencia a la compresión, para evaluar posibles cambios en las propiedades mecánicas del hormigón, además del ensayo de corrosión acelerada para evaluar la influencia del aditivo en la mezcla frente al factor de corrosión. A todas las probetas se les aplicaron ciclos de inmersión parcial en solución de NaCl (3,5%) y secado y, una vez finalizados los ciclos, se realizaron ensayos para evaluar la corrosión. Finalmente, se encontró que la incorporación del aditivo no influyó significativamente en la resistencia a compresión del hormigón, además de no influir significativamente en la prevención de la corrosión del refuerzo durante el periodo analizado. Por lo tanto, no se puede concluir que el uso de los hormigones autorreparables analizados pueda ser una alternativa para los problemas de durabilidad.

Palabras clave: Concreto; Autosanación; Aditivo; Corrosión de armaduras.

1. Introdução

A corrosão de armaduras se caracteriza como uma manifestação patológica comumente encontrada em estruturas de concreto armado, que impacta de forma direta na durabilidade e desempenho do elemento construtivo devido a deterioração ininterrupta do aço (Gentil, 2012; Santos, 2015). A corrosão em estruturas de concreto armado decorre, principalmente, de dois fenômenos: carbonatação do concreto e penetração de íons cloreto. O primeiro, ocorre devido ao avanço de CO₂ da superfície para o interior do concreto. Já o segundo, ocorre em estruturas localizadas em ambientes marinhos ou expostas aos sais de degelo, assim como em concretos que contenham adições ou agregados contaminados com sais (Baroghel-Bouny et al., 2014; Helene et al., 2018). Os danos causados por este processo manifestam-se através de manchas superficiais, expansão, fissuração e destacamento do concreto, e também redução de área de seção de aço e perda de aderência na interface aço/concreto, interferindo na durabilidade da estrutura (Baroghel-Bouny et al., 2014; Mehta et al., 2014; Helene, 2018). Neste contexto, é necessário buscar soluções que possam tornar as estruturas mais duráveis, para proporcionar maior segurança à edificação e mitigar o surgimento de manifestações patológicas e a periodicidade da realização de manutenções, já que a necessidade de reparos constantes implica na utilização de matéria-prima, recursos naturais e energia, assim como na geração de resíduos, em reformas e demolições (Cardoso et al., 2017; Cardoso et al., 2019; Dominicini et al., 2017; Rocha, 2015).

As estruturas de concreto armado frequentemente apresentam fissuras de flexão, transversais à armadura principal, devido aos esforços na região tracionada da seção solicitada, estando o risco e a evolução de corrosão nas regiões de fissuras condicionados às propriedades do cobrimento (Cunha et al., 2001). O concreto de cobrimento tem por finalidade a proteção da armadura, através de barreira física ao ingresso de agentes externos e, principalmente, por proteção química (Helene, 1986; Ribeiro, 2018; Alves et al., 2022; Afandi et al., 2022, Portela et al., 2020). Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade de uma estrutura depende das características da espessura e da qualidade do concreto de cobrimento. Felix et al. (2018) afirmam que a existência de um cobrimento adequado, de acordo com a agressividade ambiental a que a estrutura está exposta, aumenta a sua vida útil e o tempo para que seja necessária a realização dos primeiros reparos.

Como alternativa para aumentar a durabilidade de estruturas de concreto armado, tem-se o concreto autocicatrizante

(Takagi et al., 2018). De acordo com Takagi (2013), a utilização do material, que possui a capacidade de reparar suas próprias fissuras, pode ser altamente benéfica. Moreira (2016) afirma que a garantia da proteção da estrutura e, conseqüentemente, de sua durabilidade, se deve ao controle da abertura de fissuras. De acordo com Van Tittelboom et al. (2013) a ocorrência da autocicatrização, deve haver um mecanismo que acione a ação de cura. Para que ocorra a autocicatrização das fissuras do concreto, o agente cicatrizante deve apresentar viscosidade não muito alta, para que o agente possa fluir até a fissura, nem mesmo muito baixa, pois o agente pode ser absorvido pela matriz. Yodmalai et al. (2010) utilizaram aditivo impermeabilizante por cristalização integral como mecanismo de ação. Os autores afirmam que o produto possui potencial para aumentar a durabilidade de estruturas, pois é composto por sílica além de catalisadores cristalinos, que reagem com hidróxido de cálcio presente no concreto, formando produtos cristalinos e preenchendo poros e fissuras.

Desta forma, o presente artigo apresenta uma análise do comportamento das armaduras, quanto ao processo corrosivo, em estruturas que empregam concreto com propriedades autocicatrizantes, obtido a partir da introdução de aditivo cristalino ao concreto, ainda no estado fresco. Além de avaliar o efeito da adição do impermeabilizante, na resistência à compressão do concreto, auxiliando no desenvolvimento de métodos que possam prover maior segurança às estruturas de concreto armado, avaliando se o aditivo pode ser empregado como alternativa eficiente na prevenção de corrosão das armaduras.

2. Metodologia

Materiais

Para realização do experimento, utilizou-se cimento Portland do tipo CP IV32-RS. A escolha do material se deu devido à sua disponibilidade na região sul do Brasil e sua frequente utilização em obras. O aditivo impermeabilizante por cristalização integral utilizado possui capacidade de selar microfissuras de até 0,4 mm e deve ser adicionado ao concreto no momento da dosagem e mistura. Fornecido na forma de pó, o aditivo caracterizado na Tabela 1 consiste em uma mistura de cimento Portland, sílica e substâncias químicas ativas. Foi utilizada a proporção de 1% em relação à massa do cimento.

Tabela 1 - Caracterização do aditivo impermeabilizante por cristalização integral.

Componente	Valor
SiO ₂ (%)	20,30
Al ₂ O ₃ (%)	1,70
Fe ₂ O ₃ (%)	4,30
CaO (%)	30,90
MgO (%)	19,40
SO ₃ (%)	1,00
Na ₂ O (%)	5,00
K ₂ O (%)	0,15
Cor	Cinza
Massa específica aparente (kg/m ³)	1020
Massa específica absoluta (kg/m ³)	2900

Fonte: Autores.

Foram adicionadas fibras sintéticas de polipropileno ao concreto, na proporção de 0,45 kg/m³ de concreto, a fim de restringir a abertura das fissuras. As fibras sintéticas de polipropileno adicionadas possuem pequenas dimensões, o que faz com que se distribuam de forma mais dispersa no concreto, tendo maior eficiência no controle da microfissuração. De acordo com o fabricante, a adição aumenta a resistência à abrasão, inibe o surgimento de fissuras por retração plástica e aumenta a resistência

a tenacidade do concreto. A água utilizada foi fornecida pela Universidade Feevale, proveniente de poço artesiano, com características de potabilidade adequada para consumo humano.

O agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa, A dimensão máxima verificada na amostra foi de 6,3 mm, o módulo de finura de 3,01 e a massa específica de 2,61 g/cm³. Já o agregado graúdo utilizado para produção do concreto foi agregado basáltico, com enquadramento na zona granulométrica 9,5/25 mm, a dimensão máxima de 19 mm, com módulo de finura de 6,83 e massa específica de 2,83 g/cm³.

Para moldagem dos corpos de prova de concreto armado, foi utilizado aço carbono CA-50, com diâmetro nominal de 10 mm.

Métodos de ensaio

Produziu-se o concreto considerando a fim de atender as especificações para as classes de agressividade ambiental II e III, conforme NBR 6118 (ABNT, 2014). A agressividade ambiental foi definida considerando edificações urbanas em regiões litorâneas, com risco de deterioração da estrutura sob ação de íons cloretos.

Para tanto, foi definido a relações água/cimento em 0,5 e a classe de concreto em 30 MPa. Com isto, as classe de agressividades ambientais II e III foram abrangidas.

Para realização dos ensaios foram definidos duas misturas de concreto, sendo uma sem aditivo e outra com aditivo cristalizante, sendo ambas com o mesmo traço. A Tabela 2 apresenta o consumo de materiais por metro cúbico de concreto, assim como, o traço unitário, adotado a partir de referências bibliográficas. A quantidade de água foi ajustada a fim de obter o mesmo abatimento de tronco de cone, para as duas misturas. Não foi utilizado aditivo regulador do espalhamento, a fim de que não houvesse influência nas propriedades do aditivo cristalizante. O abatimento de tronco de cone foi determinado a partir da NBR 8953 (ABNT, 2015) e definido a Classe S100, indicado para elementos estruturais com lançamento convencional, definiu-se o abatimento em 110 mm, para ambas as misturas.

Tabela 2 - Consumo de materiais por m³ de concreto.

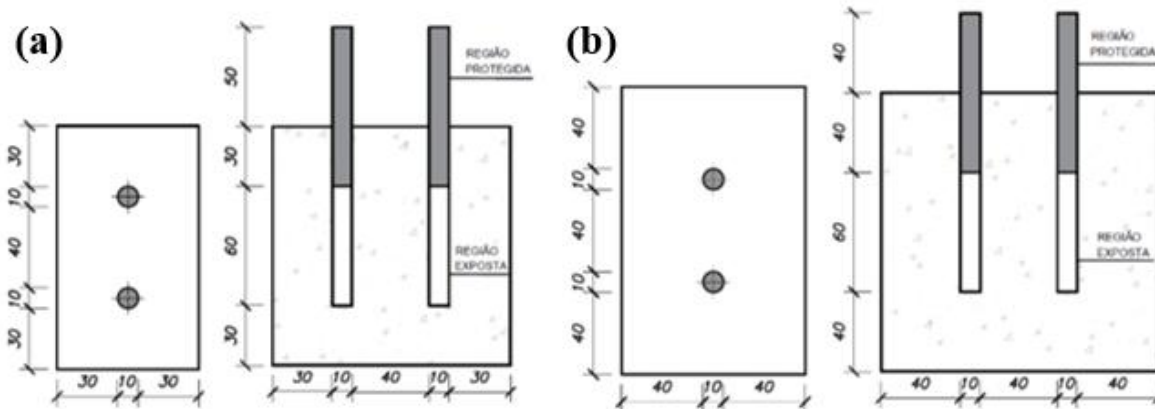
Materiais	Consumo (kg/m³)
CP IV-32 RS	380
Agregado miúdo	799
Agregado graúdo	1023
Relação a/c	0,5
Fibra de polipropileno	0,45
Aditivo cristalizante	1%

Fonte: Autores.

Corpos de prova (CPs)

Para verificação da resistência à compressão, foram moldados dois corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, para cada mistura E corpos de prova prismáticos para ensaio de corrosão, com dimensões de 70x120x120 mm (Figura 1-a) e 90x140x140 mm (Figura 1-b). Sendo cada corpo de prova com duas barras de aço carbono, com o cobrimento nominais de acordo com a classe de agressividade ambiental, respectivamente 30 e 40 mm. O detalhamento dos corpos de prova prismáticos é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Detalhamento dos corpos de prova prismáticos, cobrimentos: (a) 30 mm (b) 40 mm (unidade em mm).



Fonte: Autores.

Foram moldados 16 corpos de prova prismáticos, sendo 8 exemplares para cada cobertura de 3 cm. Para cada um dos cobrimentos adotados, foram confeccionados 4 corpos de prova contendo aditivo cristalizante e 4 corpos de prova sem aditivo.

Preparação das armaduras

As barras aço carbono foram cortadas com comprimento de 140 mm, as pontas das barras foram chanfradas com a utilização de um moto esmeril de bancada e, em seguida, passaram por um procedimento de limpeza com escova de aço, a fim de garantir a mesma condição inicial para as superfícies de todas as armaduras, antes do início dos ensaios de corrosão acelerada. Após limpas, nas barras foram conectados fios condutores às extremidades (Figura 2b), para determinação dos valores eletroquímicos. Posteriormente, a área exposta das barras ao processo corrosivo foi delimitada através da colocação de fitas isolantes, nas extremidades das barras, a fim de dificultar o contato dos agentes agressivos.

Figura 2 - Barras de aço: (a) antes da limpeza; (b) após preparação.



Fonte: Autores.

Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova prismáticos foram moldados em fôrmas de madeira, nas quais foram inseridas as barras de aço, conforme Figura 3.

Figura 3 - Formas para moldagem de corpos de prova prismáticos.



Fonte: Autores.

Concluída a moldagem (Figura 4), os corpos de prova foram armazenados em local protegido da ação de intempéries. Após 24 horas, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida, com umidade de aproximadamente 96% e temperatura de (23 ± 2) °C, até a idade de 28 dias.

A determinação da resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos foi realizada na idade de 28 dias, em uma prensa de compressão, da marca EMIC, com capacidade de carregamento de 2000 KN, a uma velocidade constante de 0,5 MPa/s, conforme prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Figura 4 - Moldagem dos corpos de prova finalizada.

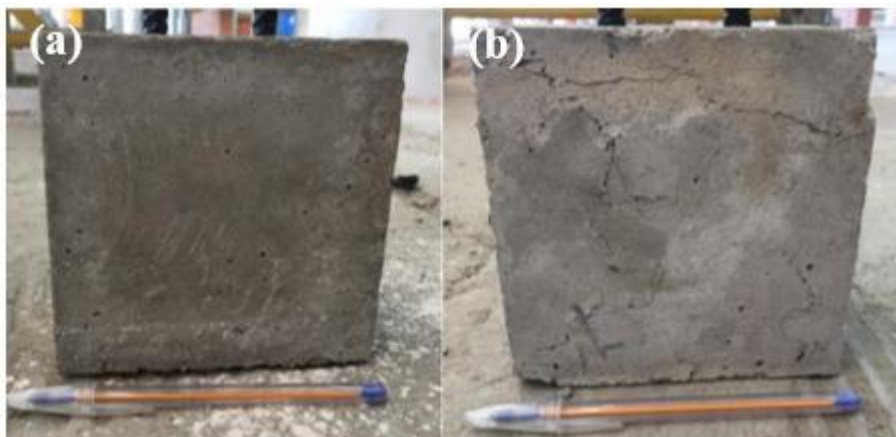


Fonte: Autores.

Fissuração dos corpos de prova

Para avaliação da autocatrização do concreto, a partir da verificação de corrosão nas armaduras, parte dos corpos de prova prismáticos foram fissuradas, após o período de 28 dias de cura. Para tanto, primeiramente, amostras prismáticas, idênticas às que seriam fissuradas, foram submetidas à aplicação de carregamento, realizada com a utilização de prensa de compressão, a fim de verificar a carga de ruptura. Posteriormente, parte dos corpos de prova prismáticos moldados foram submetidos à aplicação com uma carga correspondente a 90% da carga de ruptura dos corpos de prova cilíndricos. A Figura 5 apresenta os corpos de prova não fissurados e fissurados.

Figura 5 - Corpos de prova prismáticos: (a) não fissurados; (b) fissurados.



Fonte: Autores.

Foram fissurados 4 corpos de prova prismáticos de cada mistura, sendo dois com cobrimento de 30 mm e dois com cobrimento de 40 mm, os demais permaneceram isentos de fissuras. Desta forma, foram mantidos dois corpos de prova irmãos, para cada uma das características adotadas no estudo. A Tabela 3 reúne as características conforme denominação adotada para os corpos de prova.

Tabela 3 - Denominação dos corpos de prova.

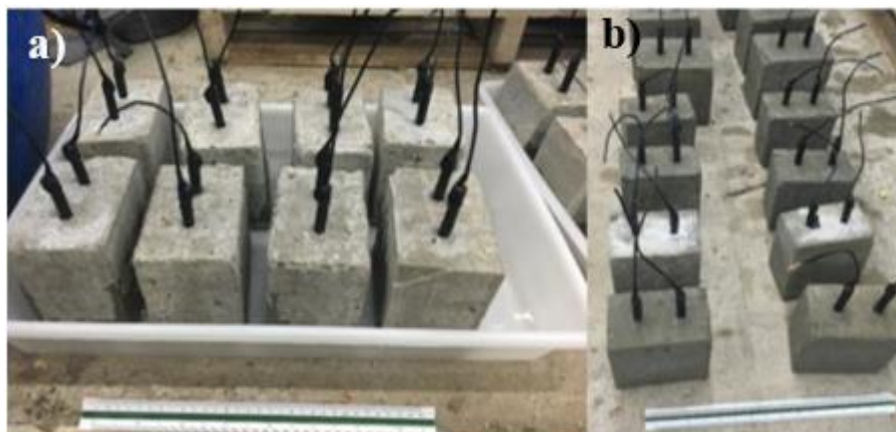
Amostra	Aditivo	Fissuras	Cobrimento
REF_4	Sem aditivo	Não Fissuradas	4 cm
REF_3	Sem aditivo	Não Fissuradas	3 cm
REF_4-F	Sem aditivo	Fissuradas	4 cm
REF_3-F	Sem aditivo	Fissuradas	3 cm
A_4	Com Aditivo	Não Fissuradas	4 cm
A_3	Com Aditivo	Não Fissuradas	3 cm
A_4-F	Com Aditivo	Fissuradas	4 cm
A3-_F	Com Aditivo	Fissuradas	3 cm

Fonte: Autores.

Ensaio de corrosão acelerada

Foram realizados 4 ciclos, cada um com duração de 7 dias, divididos em semiciclos de 2 e 5 dias. Durante 2 dias os corpos de prova foram parcialmente submersos em recipiente contendo solução de 3,5% de cloreto de sódio (NaCl), concentração adotada por ser semelhante à água do mar (Figura 6-a). Nos 5 dias restantes, os corpos de prova foram submetidos ao semiciclo de secagem, nos quais permaneceram expostos à temperatura ambiente (Figura 6-b). Para este estudo, a duração de cada ciclo e semiciclo, foi definida com base no método utilizado por Monteiro et al. (2015). Adotou-se 4 ciclos, com duração total de 28 dias, pois é o período necessário para o processo de autocatrização do concreto contendo aditivo cristalino, conforme relatado na literatura.

Figura 6 - Ensaio de corrosão acelerada: (a) semiciclo de molhagem (b) semiciclo de secagem.

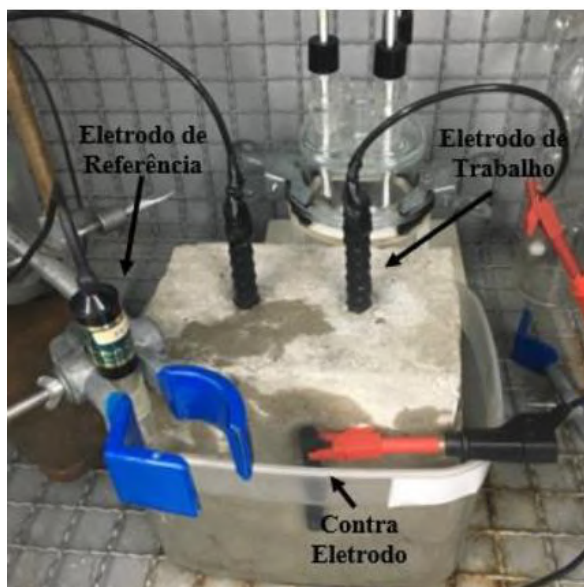


Fonte: Autores.

Técnicas eletroquímicas para avaliação da corrosão das armaduras

Após término do ensaio de corrosão acelerada, através de técnicas eletroquímicas, foram realizados ensaios para avaliação das armaduras em relação ao processo corrosivo. Para tanto, executou-se ensaios de Potencial de Circuito Aberto (OCP), Curva de Polarização Potenciodinâmica e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE). Para realização dos ensaios utilizou-se um potenciostato (Autolab, PGSTAT302N) e montou-se uma célula com três eletrodos: Eletrodo de Calomelano Saturado (ECS), como eletrodo de referência, a barra de aço, como eletrodo de trabalho, e uma barra de grafite, como contra eletrodo, conforme apresentado na Figura 7. As amostras foram parcialmente imersas, em solução de NaCl.

Figura 7 - Célula eletroquímica.



Fonte: Autores.

O OCP foi realizado para avaliar o potencial de corrosão das barras inseridas nos corpos de prova, a fim de verificar a influência do concreto de cobertura na probabilidade de ocorrência de corrosão das armaduras. A medida do potencial de corrosão consiste na determinação da diferença de potencial elétrico entre a armadura e o eletrodo de referência. Para obter a

curva de Polarização Potenciodinâmica o ensaio consistiu na aplicação de sobrepotenciais em relação ao potencial de corrosão, a fim de exercer uma polarização no metal. Para tanto, aplicou-se um intervalo de varredura de 0,9 V abaixo do potencial de circuito aberto e de 0,2 V acima. Utilizou-se o potenciostato e o software Nova 1.11, para leitura dos dados. Posteriormente, as curvas de polarização foram obtidas através da utilização do software OriginPro8.

Para melhor análise dos resultados, realizou-se a extrapolação das retas de Tafel, a fim de obter-se os potenciais de corrosão (E_{corr}), densidade de corrente (I_{corr}) e resistência de polarização (R_p). No ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica, aplicou-se um sinal senoidal de 5 mV em torno do potencial de corrosão e varredura de 100 kHz a 10 MHz. Para verificação do comportamento das amostras, durante período de exposição ao agente agressivo, estas permaneceram durante 96 horas parcialmente imersas em solução de 3,5% de NaCl, sendo realizado monitoramento a cada 24 horas. Neste ensaio, utilizou-se também o potenciostato e o software Nova 1.1.

Ao realizar a análise estatística, após completado programa experimental, para os resultados obtidos no ensaio de potencial de circuito aberto e resultados de potencial de corrosão, densidade de corrente e resistência de polarização, obtidos a partir das extrapolações das retas de Tafel, realizou-se Análise da Variância (ANOVA). A avaliação consistiu na verificação da influência de cada uma das variáveis nos resultados obtidos. Sendo as variáveis: uso de aditivo impermeabilizante por cristalização integral (com aditivo e sem aditivo), aplicação de carregamento (fissurados e não fissurados) e cobertura das armaduras (3 ou 4 cm). Para realização da análise estatística, utilizou-se o software Minitab19.

Microscopia Óptica

Para avaliar o comportamento dos corpos de prova quanto à corrosão das armaduras, realizou-se verificação através de microscopia óptica. Para isto, pequenas amostras de concreto foram retiradas de regiões próximas às armaduras onde, através de visualização microscópica, foram realizadas observações quanto à estrutura do concreto, analisando a existência de poros ou fissuras e ligação entre os componentes do material.

3. Resultados e Discussão

Resistência à compressão

Aos 28 dias, determinou-se a resistência à compressão média dos CPs com e sem aditivo, obtendo os valores de 30 MPa e 32,80 MPa, respectivamente. Comparando os valores obtidos, com os estipulados no item 2.2.1, as amostras com e sem aditivo atenderam ao requisito de resistência à compressão estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), para Classe de Agressividade Ambiental II e Classe de Agressividade Ambiental III. Contudo, observou-se pequeno decréscimo na resistência à compressão com a incorporação do aditivo, uma redução de 8,5%. A partir da realização de *teste t*, verificou-se se esta redução apresentada, pelas amostras com a incorporação de aditivo, foi significativa. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4, na qual constam os graus de liberdade (GL), valor-T, valor-p e Significância (S).

Tabela 4 - Teste T para o ensaio de resistência à compressão.

Fator	Resistência à compressão			
	GL	Valor-T	Valor-p	S
Aditivo	1	2,46	0,246	Não significativo

Fonte: Autores.

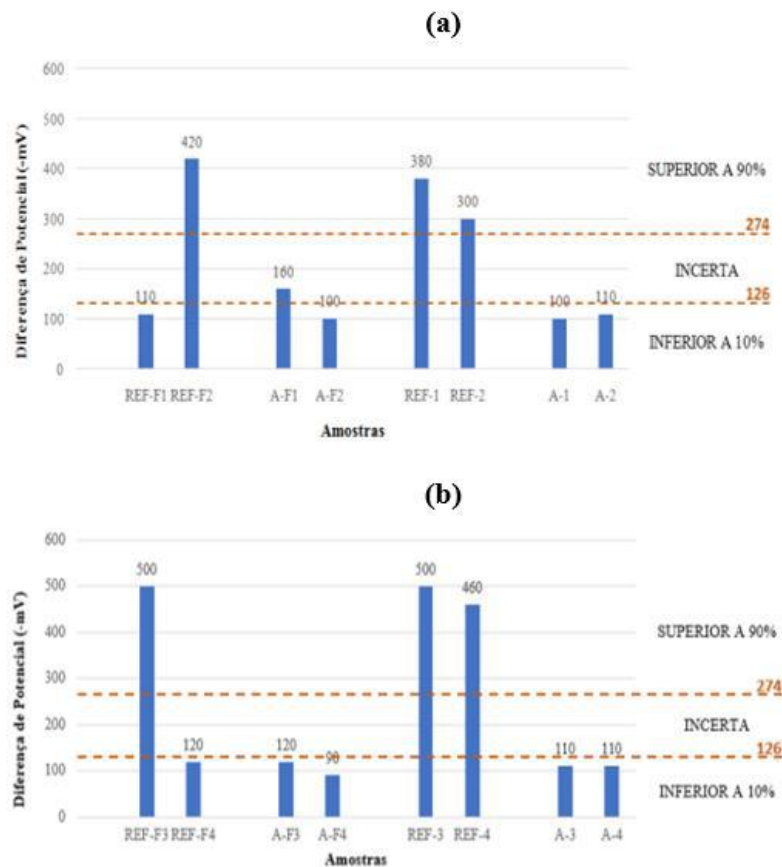
A partir dos resultados, verificou-se que a incorporação de aditivo ao concreto não teve influência na resistência à compressão. Bianchin (2018) observou em ensaio aos 28 dias de idade, para mesma relação água/cimento, uma resistência à

compressão de 24,33 MPa para amostras sem aditivo e de 26,30 MPa em amostras com aditivo. Vê-se um pequeno aumento da resistência à compressão na amostra contendo aditivo, no entanto, as duas amostras obtiveram resistência incompatível com o que presume a NBR 6118, detalhado na Tabela 4. Helene et al. (2018) afirmaram que a adição não prejudica a resistência à compressão através de seus estudos com amostras de diferentes idades e relações a/c. Para Castro et al. (2011), a reatividade de componentes minerais varia consideravelmente com a água, de acordo com a quantidade da adição, modificando as características do desenvolvimento da resistência do concreto. Desta forma, entende-se que o comportamento observado ocorre devido a variação provocada pela adição, fazendo com que o aumento da resistência ocorra em idades avançadas, em comparação a amostras sem adição.

Potencial de circuito aberto (OCP)

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de potencial de circuito aberto. De acordo com as prescrições da ASTM C876, a probabilidade de ocorrência de corrosão foi classificada como inferior a 10%, incerta ou superior a 90%, tendo o calomelano saturado como eletrodo de referência.

Figura 8 - Potencial de corrosão: amostras com (a) 4 cm de cobrimento; (b) 3 cm de cobrimento.



Fonte: Autores.

Como pode-se ver na Figura 8, os corpos de prova não fissuradas apresentaram probabilidade de ocorrência de corrosão inferior à 10%, com exceção da amostra REF-1, que apresentou probabilidade de ocorrência incerta. Dentre as amostras fissuradas, apenas a REF-F1 e a REF-F4 apresentaram probabilidade de ocorrência de corrosão inferior a 10%, o restante das

amostras apresentou probabilidade de ocorrência de corrosão superior a 90%. A amostra REF-F4 apresentou o potencial menos eletronegativos e as amostras REF-F3 e AF-3 apresentaram os potenciais mais eletronegativos.

Para amostras com cobertura de 40 mm, as fissuradas, sem aditivo, apresentaram diferença de potencial média de -265 mV, as amostras fissuradas, com aditivo, apresentaram um potencial médio mais eletronegativo, de -340 mV. Para as amostras não fissuradas, as diferenças de potencial média observadas foram de -130 mV para aquelas que não continham aditivo e de -105 mV para aquelas que continham aditivo. Para amostras com 3 cm de cobertura, obteve-se uma diferença de potencial média de -310 mV para amostras fissuradas sem adição e de -480 mV para amostras com adição. As amostras não fissuradas apresentaram valores médios próximos, de -105 mV para amostras sem aditivo e de -110 mV para amostras com aditivo.

Comparando as diferenças de potencial médias das amostras com e sem adição, observou-se que apenas as amostras não fissuradas com aditivo, com cobertura de 40 mm, apresentaram uma redução em relação as amostras sem aditivo. No entanto, verificando os resultados individualmente, observa-se que, para amostras com as mesmas características, tendo como variável a adição, a pior situação ocorreu sempre em amostras sem aditivo, exceto para amostras com cobertura de 3 cm, fissuradas, em que a diferença de potencial foi a mesma. Para verificar quais variáveis tiveram influência significativa no potencial de corrosão das armaduras, a Tabela 5 apresenta os resultados obtidos na análise, na qual consta os graus de liberdade (GL), soma de quadrados (SQ), as médias quadradas (QM), o valor F, o Valor-P e a Significância (S).

Tabela 5 - ANOVA Potencial de Circuito Aberto.

Potencial de Circuito Aberto						
Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p	S
Fissuras	1	0,223	0,223	14,11	0,006	S
Aditivo	1	0,013	0,013	0,8	0,397	NS
Cobramento (cm)	1	0,007	0,007	0,43	0,53	NS
Fissuras*Aditivo	1	0,018	0,018	1,11	0,323	NS
Fissuras*Cobramento (cm)	1	0,011	0,011	0,66	0,439	NS
Aditivo*Cobramento (cm)	1	0,004	0,004	0,25	0,633	NS
Fissuras*Aditivo*Cobramento (cm)	1	0,001	0,001	0,07	0,803	NS
Erro	8	0,127	0,016			
Total	15	0,402				

Fonte: Autores.

Verificou-se, através da Tabela 5, que não houve influência significativa da introdução de aditivo ao concreto no potencial de corrosão das armaduras. Observa-se que, neste ensaio, apenas a existência de fissuras influenciou significativamente nos resultados obtidos, e que, nem mesmo a interação entre os diferentes fatores analisados, foi significativa. Trevisol (2014) verificou que a introdução de diferentes inibidores de corrosão ao concreto, em diferentes concentrações, não apresentou influência significativa no potencial de corrosão. Entretanto, após 28 dias submetidas à corrosão acelerada, todas as amostras apresentaram probabilidade de ocorrência de corrosão superior à 95%, desempenho inferior ao verificado nas amostras não fissuradas, observadas no presente estudo.

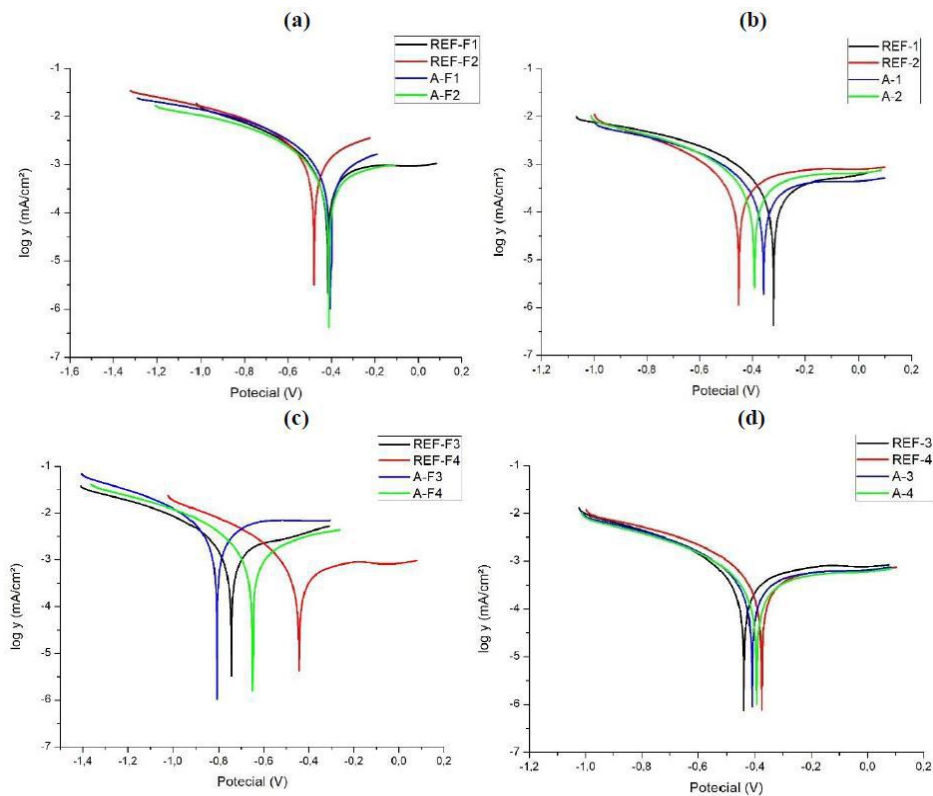
Não foi possível concluir, através deste ensaio, se o aditivo teve influência na probabilidade de ocorrência de corrosão das armaduras, pois observou-se grande variabilidade entre os resultados obtidos para as amostras fissuradas sem adição. O ocorrido pode justificar-se devido a forma como ocorreram as fissuras nas amostras, proporcionando o avanço dos íons cloreto com maior facilidade em parte delas. Para os corpos de prova não fissurados, os dois cobrimentos em teste mostraram-se

suficientes para manter a probabilidade de corrosão baixa, não havendo influência do aditivo. Já nas amostras fissuradas, verifica-se que o tempo para cicatrização não foi suficiente. Sisomphon et al. (2012) observaram que o tempo necessário para cicatrização era de 28 dias, no entanto a cura foi realizada com as amostras imersas, diferente do presente estudo, em que buscou-se simular uma situação agressiva, a qual as estruturas estão comumente expostas. Desta forma, assim como nas amostras sem aditivos, as armaduras ficam susceptíveis ao processo corrosivo, durante o processo de cicatrização. No entanto, para obter-se informações confiáveis sobre a situação da corrosão das armaduras, é necessária a combinação de diversos métodos de avaliação.

Curvas de Polarização Potenciodinâmica

Os resultados das curvas de polarização anódica (acima do potencial de corrosão) e catódica (abaixo do potencial de corrosão) apresentam-se na Figura 9.

Figura 9 - Curvas de polarização potenciodinâmica: (a) Amostras fissuradas com 4 cm de cobrimento; (b) Amostras não fissuradas com 4 cm de cobrimento; (c) Amostras fissuradas com 3 cm de cobrimento; (d) Amostras fissuradas com 3 cm de cobrimento.



Fonte: Autores.

Analisando o cobrimento de 4 cm, as amostras fissuradas apresentaram comportamentos semelhantes, no entanto, a amostra REF-F2 apresentou um potencial mais eletronegativo e as amostras contendo aditivo apresentaram valores de densidade de corrente inferiores às amostras sem aditivo, sugerindo a possível formação de uma camada de óxido na superfície do aço. Na Figura 9-b, percebeu-se uma variação maior dos potenciais de corrosão, em relação às amostras fissuradas, porém, também se observa um comportamento semelhante para os diferentes corpos de prova. Entretanto, verificou-se que a amostra sem adição, REF-1, apresentou o menor potencial, enquanto a outra amostra sem adição, REF-2, apresentou o maior potencial de corrosão. Observa-se também, que as densidades de corrente mais baixas foram apresentadas por estas duas amostras.

Analisando o cobrimento de 3 cm, as amostras fissuradas conforme apresentadas na Figura 9-c, foram as que apresentaram maior variação de comportamento. De acordo com as curvas, para concretos contendo aditivo, foram obtidas as menores densidades de corrente. No entanto, o potencial menos eletronegativo foi verificado em uma amostra sem adição. Para amostras sem fissuras, observa-se, a partir das curvas de polarização indicadas na Figura 9-d, desempenhos similares, quanto à corrosão, em concretos com aditivo e sem aditivo.

Em todas as amostras percebeu-se, após o potencial de corrosão, uma zona de ativação, com posterior passivação, que sugere a formação de uma camada superficial fina de óxido protetor. Verificou-se, principalmente em amostras não fissuradas, o rompimento do filme passivo pela ocorrência de pites, em potenciais mais eletronegativos. Para melhor interpretação dos resultados, realizou-se a extrapolação das curvas de *Tafel*. Os potenciais de corrosão (E_{corr}), densidade de corrente (I_{corr}) e resistência de polarização (R_p) obtidos para corpos de prova com cobrimento 4 cm estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados da extrapolação das retas de *Tafel* para amostras com 4 cm de cobrimento.

Amostra	E_{corr} (mV)	E_{corr} Médio (mV)	I_{corr} (μ A/cm ²)	I_{corr} Médio (μ A/cm ²)	Resistência de Polarização (k Ω /cm ²)	Resistência de Polarização Média (k Ω /cm ²)
REF-F1	-424,35		2,812		0,298	
REF-F2	-483,60	-453,98	2,716	2,764	0,144	0,221
A-F1	-406,74		1,698		0,242	
A-F2	-416,99	-411,87	2,002	1,850	0,350	0,296
REF-1	-325,04		1,609		0,593	
REF-2	-455,69	-390,37	1,695	1,652	0,466	0,530
A-1	-358,72		0,923		0,634	
A-2	-396,15	-377,44	1,688	1,306	0,517	0,5759

Fonte: Autores.

Como visto na Tabela 6, a amostra REF-F2 apresentou o potencial mais eletronegativo, além de apresentar a menor resistência de polarização, e a amostra REF-F1 apresentou a maior densidade de corrente, indicando que as amostras fissuradas, sem aditivo, tiveram o pior desempenho. Dentre as amostras, a REF-1 teve o potencial de corrosão menos eletronegativo, a A-1 teve a densidade de corrente mais baixa e a resistência de polarização mais alta, o que indica a influência das fissuras na corrosão das armaduras.

Verifica-se que as amostras fissuradas, com aditivo, apresentaram potenciais de corrosão médios, menos eletronegativos, quando comparados às amostras sem adição. O mesmo comportamento foi verificado para amostras não fissuradas, indicando uma melhora de comportamento, ocasionada pelo aditivo. Observa-se também, uma redução nos valores médios de densidade de corrente e aumento da resistência de polarização em concretos autocicatrizantes, quando comparados às amostras de referência, com as mesmas características, evidenciando a formação de uma película mais resistente, na superfície do aço.

Os resultados obtidos a partir da extrapolação das curvas de *Tafel*, para concretos com cobrimentos de 3 cm, estão apresentados na Tabela 7, onde verifica-se que a amostra A-F3 apresentou o pior desempenho em todos os parâmetros. O melhor desempenho, em relação ao potencial de corrosão, foi apresentado pela amostra REF-4. A amostra REF-3 apresentou o melhor comportamento em relação à densidade de corrente e a A-4, o melhor comportamento em relação à resistência de polarização.

Tabela 7 - Dados da extrapolação das retas de *Tafel* para amostras com 3 cm de cobrimento.

Amostra	E_{corr} (mV)	E_{corr} Médio (mV)	I_{corr} (μ A/cm ²)	I_{corr} Médio (μ A/cm ²)	Resistência de Polarização (k Ω /cm ²)	Resistência de Polarização Média (k Ω /cm ²)
REF-F3	-745,27	-594,66	5,965	3,753	0,116	0,216
REF-F4	-444,05		1,541		0,317	
A-F3	-808,30	-729,23	8,744	6,518	0,054	0,099
A-F4	-650,16		4,292		0,143	
REF-3	-441,62	-410,70	0,764	1,151	0,451	0,458
REF-4	-379,78		1,539		0,464	
A-3	-408,11	-403,20	1,595	1,542	0,511	0,549
A-4	-398,29		1,489		0,588	

Fonte: Autores.

Diante do exposto, observa-se que houve grande variação entre os resultados obtidos para amostras iguais, com fissuras. Para estas amostras, nota-se que a introdução de aditivo ao concreto ocasionou uma redução no desempenho. Em amostras não fissuradas, percebe-se uma pequena redução no potencial de corrosão médio e um aumento da resistência de polarização média em corpos de prova com aditivo. No entanto, houve um aumento na densidade de corrente, em relação à corpos de prova sem a adição. A análise estatística segue na Tabela 8.

Tabela 8 - ANOVA extrapolação das retas de *Tafel*.

Curvas de Polarização Potenciodinâmica						
Potencial de Corrosão						
Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p	S
Fissuras	1	92425	92425	10,43	0,012	S
Aditivo	1	1297	1297	0,15	0,712	NS
Cobrimento (cm)	1	63542	63542	7,17	0,028	S
Fissuras*Aditivo	1	3186	3186	0,36	0,565	NS
Fissuras*Cobrimento (cm)	1	42426	42426	4,79	0,06	NS
Aditivo*Cobrimento (cm)	1	8291	8291	0,94	0,362	NS
Fissuras*Aditivo*Cobrimento (cm)	1	7332	7332	0,83	0,39	NS
Erro	8	70874	8859			
Total	15	289373				
Densidade de Corrente						
Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p	S
Fissuras	1	7574,7	7574,7	8,38	0,02	S
Aditivo	1	319,2	319,2	0,35	0,569	NS
Cobrimento (cm)	1	2583,4	2583,4	2,86	0,129	NS
Fissuras*Aditivo	1	289,9	289,9	0,32	0,587	NS
Fissuras*Cobrimento (cm)	1	3114,1	3114,1	3,45	0,101	NS
Aditivo*Cobrimento (cm)	1	1732,3	1732,3	1,92	0,204	NS
Fissuras*Aditivo*Cobrimento (cm)	1	769	769	0,85	0,383	NS
Erro	8	7230	903,8			
Total	15	23612,7				
Resistência de Polarização						
Fatores	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p	S
Fissuras	1	145,667	145,667	54,77	0	S
Aditivo	1	0,803	0,803	0,3	0,598	NS
Cobrimento (cm)	1	8,036	8,036	3,02	0,12	NS
Fissuras*Aditivo	1	2,894	2,894	1,09	0,327	NS
Fissuras*Cobrimento (cm)	1	0,958	0,958	0,36	0,565	NS
Aditivo*Cobrimento (cm)	1	1,936	1,936	0,73	0,418	NS
Fissuras*Aditivo*Cobrimento (cm)	1	5,026	5,026	1,89	0,207	NS
Erro	8	21,277	2,66			
Total	15	186,597				

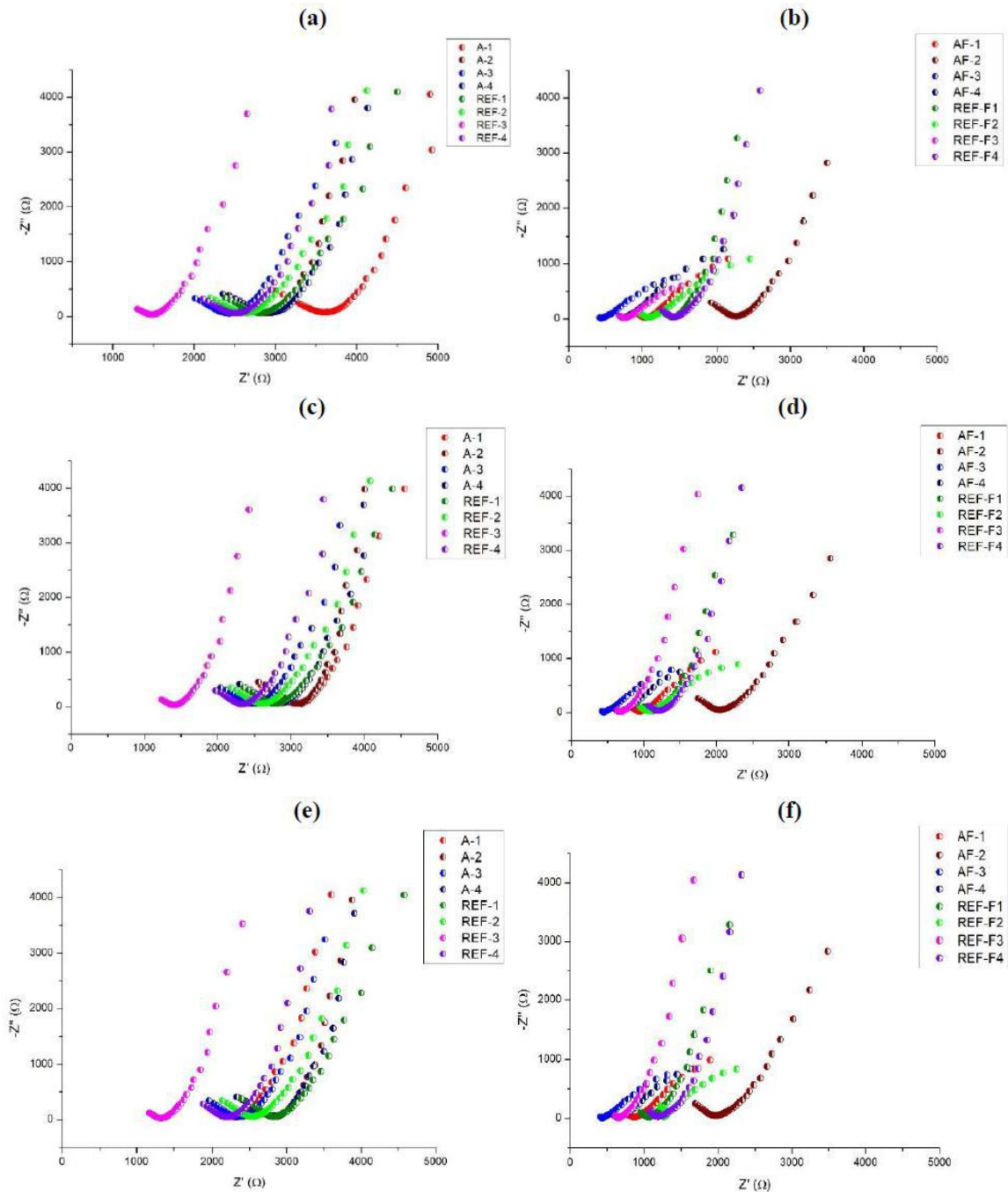
Fonte: Autores.

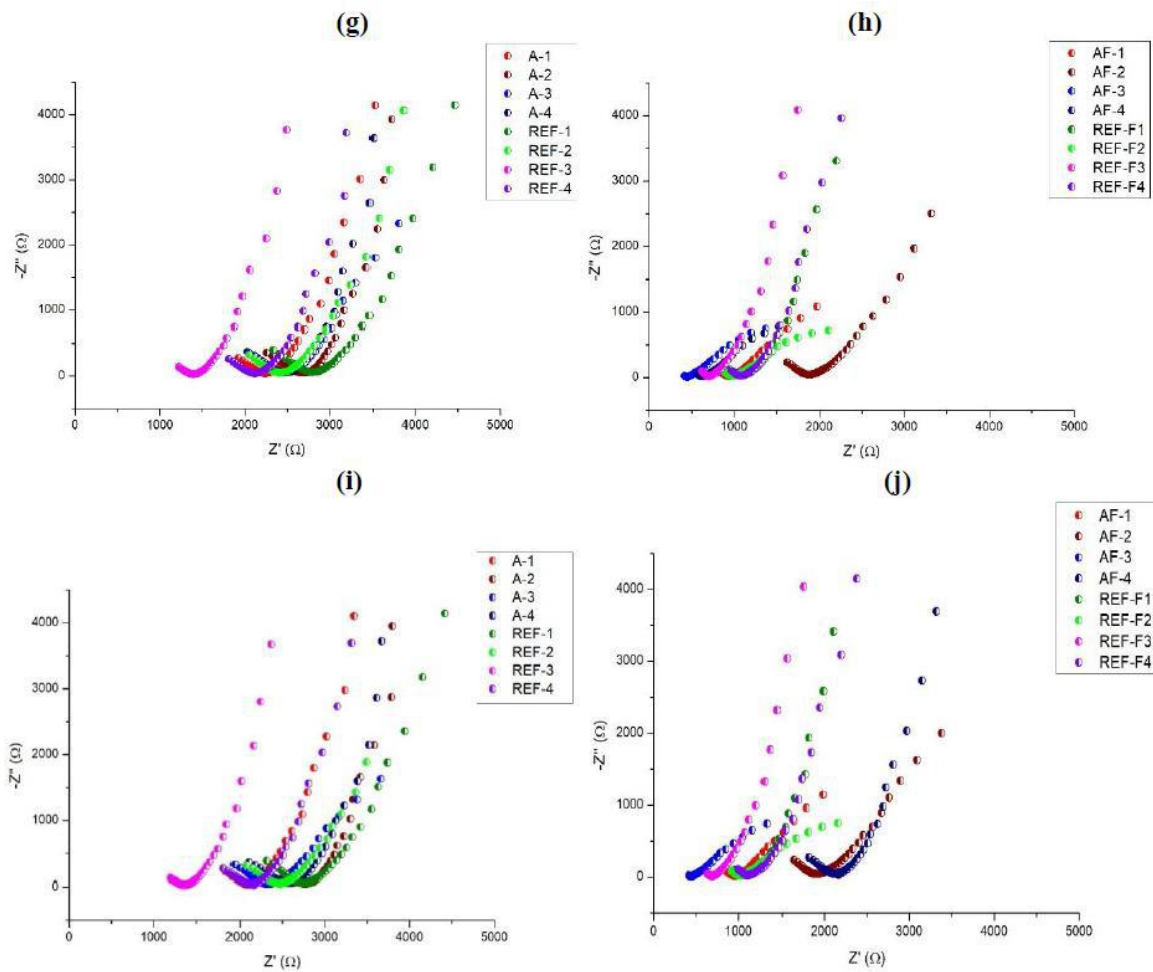
A partir dos dados expostos na Tabela 8, percebe-se que a existência de fissuras influenciou de forma significativa todas as análises realizadas, enquanto a espessura do revestimento influenciou significativamente apenas o potencial de corrosão. O aditivo não influenciou os resultados obtidos em nenhum dos ensaios, assim como, as interações entre os diferentes fatores também não influenciaram. Também verificou-se que a adição proporcionou um melhor desempenho ao concreto, em amostras com revestimento de 4 cm, além de reduzir a permeabilidade dos corpos de prova, o que dificultou a infiltração do cloreto de sódio, melhorando o comportamento do aço quanto à corrosão das armaduras. No entanto, a partir das amostras de revestimento 3 cm, não foi possível obter conclusões devido à grande variação nos resultados, principalmente em amostras fissuradas. Este comportamento justifica-se pela variação na forma de ocorrência de fissuras, conforme observado também no ensaio de potencial de circuito aberto.

Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A Figura 10 apresenta os diagramas de *Nyquist*, obtidos para os ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica, realizados em amostras após a imersão parcial das amostras em solução de NaCl, com concentração de 3,5%. Expresso por um plano real complexo, o diagrama tem no eixo das abscissas a parte real (termos resistivos) e no eixo das ordenadas a parte imaginária (termos capacitivos ou indutivos).

Figura 10 - Diagramas de *Nyquist*: (a) Amostras não fissuradas (1 h) (b) Amostras fissuradas (1 h); (c) Amostras não fissuradas (24 h); (d) Amostras fissuradas (24 h); (e) Amostras não fissuradas (48 h) (f) Amostras fissuradas (48 h); (g) Amostras não fissuradas (72 h) (h) Amostras fissuradas (72 h); (i) Amostras não fissuradas (96 h) (j) Amostras fissuradas (96 h);





Fonte: Autores.

A partir da Figura 10-a, observa-se que as amostras não fissuradas, parcialmente imersas em solução de NaCl, apresentaram um comportamento passivo na primeira hora. É possível verificar que a componente real, que corresponde à resistência do sistema ao processo corrosivo, é maior para amostra A-1, seguida das amostras REF-1, A-4, REF-2, A-2 e A-3, e apresentando os menores valores para as amostras REF-4 e REF-3, respectivamente.

Após 24 horas de imersão parcial (Figura 10-c), ocorre redução da impedância de todas as amostras, exceto A-2, que apresenta pequeno aumento. Nesta situação, as amostras REF-2 e A-2 passam a ter um comportamento um pouco melhor do que o apresentado pela amostra A-4. Na Figura 10-e, percebe-se melhor desempenho apresentado pela amostra REF-1 em relação à componente real, no entanto, verifica-se redução na componente imaginária. O restante dos corpos de prova analisados, apresentou redução da impedância. A Figura 10-g ressaltava aumento da componente real para as amostras REF-3 e A-3, no entanto, a A-3 apresenta redução da componente imaginária e tendência à formação de semicírculo, que caracteriza a ocorrência de processo corrosivo. Ao realizar-se o monitoramento 96 horas após a imersão parcial (Figura 10-i), verificou-se que, a componente real foi maior para a amostra REF-1, posteriormente, para as amostras A-2, A-4, A-3, REF-2, A-1, REF-4, tendo REF-3 apresentado o pior comportamento. No entanto, na amostra A-3 percebe-se maior tendência à formação de um semicírculo.

Para as amostras fissuradas, verifica-se através da Figura 10-b, tendência a formação de semicírculos, caracterizando o estado ativo, já na primeira hora de imersão. O semicírculo que está se formando para a amostra REF-F3 foi o mais fechado, sendo que, de acordo com Ribeiro e Cunha (2018), quanto maior o seu diâmetro, maior a resistência e menor a taxa de corrosão.

Em relação à componente real, verifica-se melhor comportamento para a amostra AF-2, seguida da REF-F4, REF-F2, REF-F1, AF-1, AF-4, REF-F3 e AF-3, respectivamente. Através da Figura 10-d, observa-se que a amostra REF-F3 apresentou uma grande melhora de comportamento, quando comparada à 1 hora de imersão, o que significa aumento de resistência e redução da taxa de corrosão. Neste caso, nota-se a formação de semicírculos de menores diâmetros para as amostras AF-3 e AF-4. Assim como a amostra REF-F3 apresentou aumento para a componente real, verifica-se também um pequeno aumento para a A-2. Após 48 horas (Figura 10-f), houve redução da componente real para todas as amostras, não sendo possível verificar grandes alterações no comportamento.

A Figura 10-h, que mostra o efeito no CP após 72 horas de imersão, identifica pequeno aumento dos diâmetros dos semicírculos e das componentes reais das amostras A-F1, A-F3, REF-F1 e REF-F3, que caracteriza uma melhora de comportamento. No entanto, verifica-se que para as outras amostras, houve reduções para os dois parâmetros observados. Após 96 horas (Figura 10-j), verifica-se tendência a formação de um semicírculo para a amostra AF-F2. Entretanto, é possível observar melhora de comportamento para a amostra AF-4. Dentre as amostras, apenas a AF-3 e a REF-F1 apresentaram redução da componente real, em relação às 72 horas de imersão, e apenas a A-F2, a A-F3 e a REF-F3 apresentaram redução da componente imaginária. Desta forma, verificou-se melhor comportamento a partir da componente real para as amostras A-F2, A-F4, REF-F4, REF-F2, REF-F1, A-F1, REF-F3 e A-F3, respectivamente. Em relação à formação de semicírculos, verifica-se a tendência de formação nas amostras AF-3, REF-F2, AF-1 e AF-2.

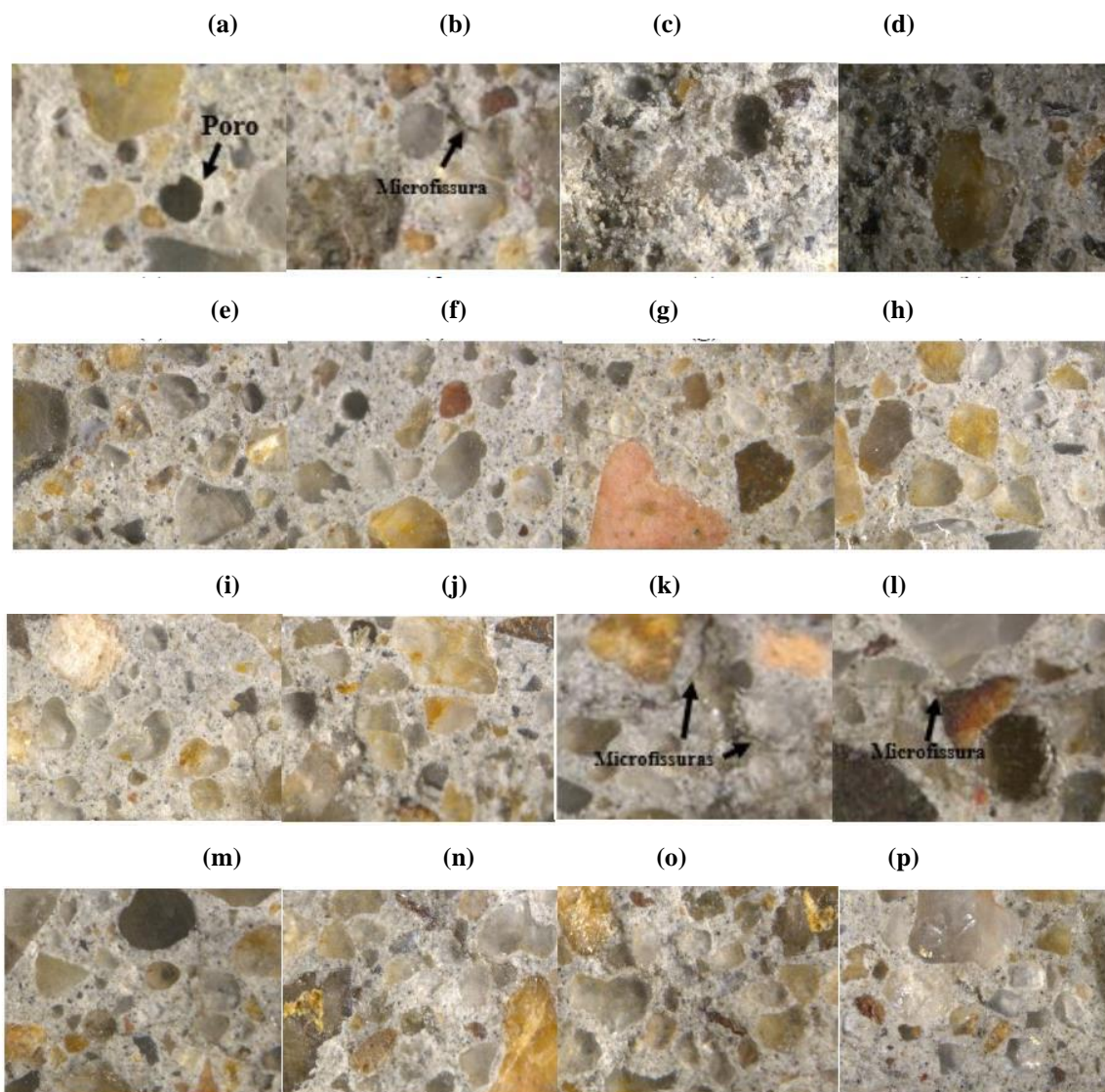
Para Ribeiro e Cunha (2018), uma das dificuldades da impedância está relacionada à interpretação dos diagramas de *Nyquist* para armaduras passivas, pois os semicírculos são pobremente desenvolvidos. Este comportamento foi verificado no presente estudo, em corpos de prova não fissurados, nos quais percebe-se que as diferentes amostras apresentaram comportamento passivo, apenas com diferenças na resistência do sistema, quanto ao processo corrosivo. Entretanto, nota-se que houve grande variação de comportamento entre as amostras com mesmas características.

Em amostras fissuradas, o comportamento apresentado já na primeira hora de imersão, se deve à maior infiltração de cloreto de sódio, ocorrida durante a realização dos ciclos de imersão parcial e secagem. Entretanto, é possível constatar melhoramento de desempenho ao longo dos dias, para alguns dos corpos de prova, ocorrida devido a provável formação de filme passivo, reduzindo a taxa de corrosão. Porém, não é possível concluir que houve influência do aditivo nos resultados obtidos, tanto para amostras com fissuras, quanto para sem fissuras. Constata-se que os diferentes desempenhos obtidos provavelmente estejam relacionados à existência de interconexão entre os poros ou entre as fissuras, até a região da armadura. No entanto, seria necessária a realização de ensaios específicos para confirmação da hipótese.

Análise de Microscopia Óptica

A Figura 11 apresenta imagens, observadas através de microscopia óptica dos corpos de prova com magnificação de 50x. A partir da Figura 11-a, verifica-se que houve boa aderência entre a pasta de cimento e os agregados da amostra REF-F1, entretanto, nota-se diversos microporos e um poro maior. O observado justifica o bom desempenho da amostra nos ensaios de potencial de circuito aberto, polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica, quando comparado às amostras fissuradas, pois a estrutura apresentada pelo concreto, dificulta a infiltração de agentes agressivos. Na Figura 11-b, constata-se também boa aderência entre os componentes da amostra REF-F2 e verifica-se a existência de microporos, no entanto, é possível observar uma microfissura, que justifica um pior comportamento, em relação à amostra REF-F1. Nas Figuras 11-c e 11-d, observa-se visualmente grandes índices de vazios nas amostras AF-1 e AF-2, não sendo possível constatar a ocorrência de cristalização. No entanto, nas amostras de concreto verificadas, não foi possível observar a existência de fissuras. Desta forma, o comportamento observado nos ensaios, justifica-se pela porosidade.

Figura 11 - Microscopia óptica: (a) REF-F1; (b) REF-F2 (c) A-F1; (d) A-F2; (e) REF-1; (f) REF-2
(g) A-1; (h) A-2; (i) REF-F3; (j) REF-F4; (k) A-F3; (l) A-F4; (m) REF-3; (n) REF-4; (o) A-3; (p) A-4.



Fonte: Autores.

As amostras REF-1 e REF-2 (Figura 11-e e Figura 11-f) apresentaram boa ligação entre os componentes, constando apenas microporos. Sendo o mesmo comportamento verificado para as amostras A-1 e A-2 (Figura 11-g e 11-h), o que justifica o bom desempenho obtido.

A partir da verificação das amostras REF-F3 e REF-F4 (Figura 11-i e 10-j), nota-se que a amostra REF-F4 apresentou melhor desempenho devido a distribuição granulométrica mais contínua, em relação à REF-F3, fazendo com que o concreto apresente menor porosidade. A amostra AF-3 foi a que apresentou o pior desempenho dentre todas as amostras estudadas, este comportamento é justificado pela Figura 11-k, na qual verifica-se a ocorrência de diversas microfissuras, em amostra retirada de região próxima à armadura. Apesar de constatar-se melhora de desempenho na amostra AF-4, após 96 horas de imersão parcial, o comportamento verificado nos demais ensaios, também justifica-se pela existência de microfissura (Figura 11-l). Entretanto, observa-se que a ocorrência de fissuras nas duas amostras, de mesmas características, não se deu da mesma forma, por isso, verifica-se um melhor desempenho na AF-4.

Através de análise microscópica das amostras não fissuradas com cobrimento de 3 cm, sem aditivo, REF-3 e REF-4 (Figura 11-m e 11-n), e com aditivo, A-3 e A4 (Figura 11-o e 11-p), verificam-se estruturas semelhantes, com pequenos poros e ligação entre os elementos do concreto.

4. Conclusão

Em resposta ao objetivo que buscava avaliar a influência do aditivo impermeabilizante por cristalização integral na resistência à compressão do concreto, conclui-se que este não afeta a resistência do material, ademais, também não observou-se influência significativa da utilização de concreto autocicatrizante na prevenção de corrosão das armaduras. Contudo, entendeu-se que o fator cobrimento influenciou o potencial de corrosão, obtido a partir das curvas de polarização potenciodinâmica.

A não existência de fissuras nas amostras, foi suficiente para manter a armadura passiva, no período de estudo analisado, o que reafirma a necessidade de prevenção destas, para aumento de durabilidade de estruturas de concreto armado. Já a existência de fissuras foi significativa em todas as análises realizadas. Verificou-se também grande variação nos resultados obtidos, para amostras fissuradas com mesmas características. Constatou-se que esta diferença se deve à variação observada na maneira de ocorrência das fissuras, sendo que, de acordo com a região em que ocorreram e da profundidade que atingiram, facilitaram a infiltração de cloreto de sódio.

Através de análise microscópica, não foi possível perceber a formação de cristais no interior do concreto. Desta forma, verificou-se que a exposição das amostras ao agente agressivo, durante 4 ciclos de imersão e secagem, não foi suficiente para cicatrização do concreto, no entanto, foi suficiente para iniciar o processo corrosivo em alguns dos corpos de prova. Ainda, é importante salientar que o processo corrosivo simulado através do ensaio, ocorre de forma mais lenta nas estruturas de concreto armado, em ambiente agressivo. Em síntese, constata-se como principal influência na ocorrência de corrosão, a porosidade e a forma de ocorrência de fissuras.

Diferentes autores observaram a cicatrização do concreto em ensaios em que o material estava em contato direto com a água, entretanto, este estudo propôs a introdução do aditivo como alternativa para o aumento de durabilidade de estruturas de concreto armado, e para tanto, as amostras foram expostas ao agente agressivo, a fim de simular o ambiente ao qual as estruturas estão expostas. Desta forma, torna-se necessária a realização de estudos que verifiquem o tempo necessário para cicatrização do concreto, exposto ao agente agressivo.

Pretende-se futuramente analisar o estudo de novos concretos autocicatrizantes de modo que tenha influência mais significativa na resistência a compressão do concreto bem como na resistência à corrosão. Analisar o concreto obtido por microscopia eletrônica de varredura (MEV) a fim de se observar a formação de cristais no interior do concreto.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), entidade do governo brasileiro focada na formação de recursos humanos. Os autores também agradecem ao apoio financeiro de agências brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

Referências

- Afandi, M. E., Yehia, S., Landolsi, T., et al. (2022). Concrete-to-concrete bond Strength: A review. *Construction and Building Materials* 363(11), p. 129820.
- Alves, A. P. M., Melo, M. L. M. N., Gonçalves, P. C., et al. (2022). Análise da substituição da areia por resíduo de vidro no concreto autoadensável nas Propriedades Mecânicas e na Reatividade da Reação Álcali-agregado. *Research, Society and Development* 11(15), p. e366111537382.

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 5738 (2015) Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 5739 (2018) Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 6118 (2014). Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 8953 (2015) Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro.
- Baroghel-Bouny, V., Capra, B., & Laurens, S. A. (2014). Durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Ed. J. P. Ollivier e A. Vichot. Ed. Tradução: O. Cascudo e H. Carasek. São Paulo: IBRACON, p. 255 – 326.
- Bianchin, F. H. (2018). Avaliação da autocatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades. *Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Cardoso, A. S., Delmiro, T. D., Mendes, A., & Monteiro, E. C. B. (2017). Análise da Influência da Adição de Sílica Ativa como Substituição Parcial do Cimento em Argamassas Contra Ação de CO₂ e Íons Cloreto. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, Recife, 2 (3), p. 167 - 175.
- Cardoso, B. H., Canazaro, C. C., & Mancio, M. (2019). Durabilidade e sustentabilidade das estruturas: desafios e oportunidades. *Anais do 7º Forum Internacional de Resíduos Sólidos*.
- Cunha, A. C. Q., & Helene, P. R. L. (2001). Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação. *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*. ISSN 0103-9830 BT/PCC/283. São Paulo.
- Castro, A. L., Libório, J. B. L., & Pandolfelli, V. C. (2011). A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. *Cerâmica* 57, p. 10 - 21.
- Dominicini, W. K., & Calmon, J. L. (2017). Modelagem computacional para predição do período de iniciação da corrosão em estruturas de concreto armado. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 10(6), p. 1205 - 1244.
- Felix, E. F., Balabuch, T. J. R., Posterli, M. C., Possan, E., & Carrazedo, R. (2018). Análise da vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme por meio de um modelo com RNA acoplado ao MEF. *Revista Alconpat* 8(1), p. 1-15.
- Gentil, V. *Corrosão*. (6ª. ed.): LTC, 2012.
- Helene, P. (2018). Introdução. *Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: teoria, controle, técnicas de análise e intervenção*. Organização Daniel Vêras Ribeiro. (1ª. ed.): Elsevier.
- Helene, P., Guignone, G., Vieira, G., Roncetti, L., & Moroni, F. (2018). Avaliação da penetração de cloretos e da vida útil de concretos autocatrizantes ativados por aditivo cristalino. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 11(3), p. 544–563.
- Helene, P. R. L. (1986). *Corrosão em armaduras para concreto armado*. Pini.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. IBRACON.
- Monteiro, E. C. B., & Pereira, V. C. O. (2015). Study of the Protective Capacity of Cements Regarding Corrosion of Reinforcements under Joint Action of CO₂ and Chloride Ions. *Journal of Civil Engineering and Architecture* 9. p 1017-1024.
- Moreira, M. M. (2016). *Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland – Contribuição aos processos de autocatrização*. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- Ribeiro, D. V. (2018). Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos. In: SALES, Almir et al. *Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: teoria, controle, técnicas de análise e intervenção*. Elsevier.
- Ribeiro, D. V., & Cunha, M. P. T. (2018). Uso de técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado. In: SALES, Almir et al. *Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: teoria, controle, técnicas de análise e intervenção*. Elsevier.
- Rocha, I. (2015). Corrosão em estruturas de concreto armado. *Revista Especialize On-line IPOG*. 1 (10).
- Portela, J. D., Gandia, R. M., Araújo, B. L. O., et al. (2020). Physical, mechanical and thermal behavior of concrete block stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. *Research, Society and Development* 9(11), p. e2939119838.
- Santos, A. V. dos. (2015). Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação. *Revista Especialize On-line IPOG* 1(10), p. 1 – 21.
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., & Koenders, E. A. B. (2012). Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cement & Concrete Composites* 34 (4), p. 566 - 574.
- Takagi, E. M. (2013). Concretos autocatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino. *Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica*, São José dos Campos, 2013.
- Takagi, E. M., Lima, M. G., Helene, P., & Medeiros, R. A. Jr. (2018). Concreto autocatrizantes 'engenheirado' com cimento de escória de alto forno ativado por aditivo cristalino. *Revista Estrutura*, p. 39 – 45.

Takagi, E. M., Lima, M. G., & Helene, P. (2018). Concretos autocatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto fornoativados por catalisador cristalino. *Concreto e Construções* 41(73), p. 75 – 79.

Trevisol, C. A. M. (2014). *Análise do efeito de inibidores de corrosão em compósito cimentício reforçado com aço empregando ensaios eletroquímicos*. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials - A review. *Materials* 6, p. 2182 - 2217.

Yodmalai, D., Sahamitmongko, R., Tangtermsirikul, S., & Lawtrakul, L. (2010). Water Sorptivity , Water Permeability, Autogenous Shrinkage, and Compressive Strength of Concrete with Crystalline Materials. *Proceedings of 15th national convention on civil engineering*, Ubonrachatani, Thailand.