

Sensor de corrosão para monitoramento de estruturas de concreto armado: Testes em corpos de prova de concreto armado

A. Calvo Valdés¹ , M. H. F. Medeiros*¹ , G. Macioski¹ 

* Autor de Contato: medeiros.ufpr@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.529>

Recepção: 19/01/2021 | Aceitação: 03/08/2021 | Publicação: 01/09/2021

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar a eficácia de um sensor galvânico de múltiplos eletrodos na detecção da probabilidade de corrosão em prismas armados de concreto submetidos a ciclos de secagem e molhagem em uma solução de NaCl. Se analisaram as leituras de potencial de corrosão (E_{corr}) obtidas por meio de um eletrodo de referência de cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO₄) com as leituras de corrente galvânica (I_{gal}) e potencial galvânico (E_{par}). O sensor desenvolvido apresentou sensibilidade para detectar a frente de cloretos e prever a possibilidade de corrosão das armaduras. As grandezas E_{corr} , E_{par} e I_{gal} apresentaram comportamentos distintos como parâmetro de monitoramento da corrosão.

Palavras-chave: corrosão; potencial; sensor galvânico; corrente galvânica.

Citar como: Calvo Valdés, A., Medeiros, M. H. F., Macioski, G. (2021), "*Sensor de corrosão para monitoramento de estruturas de concreto armado: Testes em corpos de prova de concreto armado*", Revista ALCONPAT, 11 (3), pp. 64 – 87, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.529>

¹ Universidade Federal do Paraná, Rua XV de Novembro, 1299 - Centro, Curitiba - PR, 80060-000, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, os autores Analiet Calvo Valdés e Marcelo H. F. Medeiros contribuíram com a atividade de consulta bibliográfica, redação do texto e desenvolvimento do programa experimental, para um total de 33,3% cada. O autor Gustavo Macioski com a atividade de revisão bibliográfica e consulta, completando os 33,3% restantes.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) 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 discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Corrosion sensor for monitoring reinforced concrete structures: Tests on reinforced concrete specimens

ABSTRACT

The aim of the research was to evaluate the effectiveness of a galvanic multi-electrode sensor to detect the probability of corrosion in reinforced concrete prisms subjected to drying and wetting cycles in a NaCl solution. The corrosion potential (E_{corr}) readings obtained using a copper sulfate copper electrode (Cu/CuSO₄) were analyzed along with the galvanic current (I_{gal}) and galvanic potential (E_{par}) readings. The sensor developed showed sensitivity to detect the chloride front and to predict the possibility of corrosion of the reinforcement. The parameters E_{corr} , E_{par} and I_{gal} presented distinct behaviors in terms of its use as parameters for corrosion monitoring.

Keywords: corrosion; potential; galvanic sensor; galvanic current.

Sensor de corrosión para monitorear estructuras de hormigón armado: Ensayos en especímenes de hormigón armado

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar la efectividad de un sensor galvánico multi-electrodo en la detección de la probabilidad de corrosión en prismas de hormigón armado sometidos a ciclos húmedos y secos en una solución de NaCl. Se analizaron lecturas de potencial de corrosión (E_{corr}), obtenidas utilizando un electrodo de cobre de sulfato de cobre (Cu/CuSO₄), lecturas de corriente galvánica (I_{gal}) y potencial galvánico (E_{par}). El sensor desarrollado mostró sensibilidad para detectar el frente de cloruro y predecir la posibilidad de corrosión de la armadura. Las variables E_{corr} , E_{par} e I_{gal} presentaron comportamientos diferentes como parámetros para monitorear la corrosión.

Palabras clave: corrosión; potencial; sensor galvánico; corriente galvánica.

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

A degradação de estruturas de concreto devido à corrosão afeta a construção civil em todo o mundo, com repercussões em função do volume de casos registrados, da precocidade com que ocorrem, bem como do montante de recursos envolvidos na sua avaliação e reparo (Meira, 2017).

O custo anual da corrosão em todo o mundo supera o 3% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial, aproximadamente USD\$ 2,2 trilhões (Hays, 2020). Em função do momento em que é realizada a intervenção, os custos são potencializados (Meira, 2017), podendo chegar a superar o custo original da construção (Dong et al., 2011).

A corrosão reduz a força de escoamento do aço, enfraquece as propriedades de ligação entre o reforço e o concreto e afeta o desempenho sísmico e capacidade de carga estática de estruturas de concreto armado. A oxidação do ferro (com Fe_2O_3 como o componente principal) é produzida pela corrosão da barra de aço que causa expansão de volume e tensão de tração no concreto, e subsequentemente leva o concreto a deformações e fissuras (Zhao et al., 2017).

A corrosão da barra de aço no interior do concreto ocorre, essencialmente, por dois motivos: primeiro, devido à redução da alcalinidade do concreto ocasionada pela carbonatação, e segundo, pela presença de cloretos, que mesmo com o pH elevado, despassivam a armadura pontualmente (França, 2011).

A investigação das estruturas afetadas geralmente envolve uma avaliação da durabilidade das mesmas (Wu et al., 2017). A durabilidade é resultado da interação das estruturas de concreto com o ambiente, e é influenciada pelas condições de uso, de operação e pelos processos de manutenção. Para se avaliar o desempenho das construções são utilizadas inspeções visuais associadas a ensaios de campo e laboratório (Mota, 2011).

As inspeções visuais sistemáticas certamente reduzem o nível de incerteza com relação ao estado da estrutura, mas esta técnica apresenta importantes limitações já que se baseia em observações superficiais da estrutura durante pequenos espaços de tempo (Inaudi, 2009) podendo-se incorrer em perigosos erros e uso ineficiente de recursos para manutenção das estruturas.

Através dos sensores, é possível obter dados de forma regular, garantir a simultaneidade de leituras em diversos pontos e, conseqüentemente, compatibilizar diversas medidas (Santos, 2014). Os sensores conseguem fornecer informações em tempo real (Zhao et al., 2017) que alimentam modelos matemáticos de previsão de vida útil (Araújo et al., 2013), de modo a estimar dois estágios fundamentais do fenômeno da corrosão: a fase de iniciação e a fase de propagação da corrosão, conforme o modelo fenomenológico proposto por Tuutti (1982) (Figueiredo e Meira, 2013).

Dessa forma, é possível realizar prognósticos das estruturas monitoradas, e diminuir os custos associados a obras de recuperação ou substituição. No Brasil, por exemplo, de acordo com um estudo do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), até o ano 2025 pouco mais de 89 milhões de reais devem ser destinados para a manutenção de 15 pontes que atendem a 12 estados da Federação. Parte desta verba será investida em sistemas de monitoramento, uma vez que o uso de sensores pode proporcionar maior durabilidade e sustentabilidade ao conjunto total de obras da infraestrutura pública (M. Torres-Luque et al., 2014).

Nos EUA, de acordo com a *Federal Highway Administration (FHWA)*, em concordância com um reporte da *American Society of Civil Engineers (ASCE)* do ano 2013, devem ser investidos 20.5 bilhões de dólares ao ano até o 2028 na manutenção da infraestrutura pública. Na Europa, o custo estimado anual com manutenção em pontes de concreto armado é em torno de 1 bilhão de euros (Zoghi, 2013).

Diante disso, os sensores eletroquímicos industrializados têm atraído atenção (Zhao et al., 2017), dentre eles, pode-se citar: eletrodos embutidos, sondas de corrente de macro corrosão, sensores de polarização linear, sensores de resistência elétrica, sensores de potencial de corrosão e sensores galvânicos (Dong et al., 2011; Chen et al., 2017).

No contexto da indução da corrosão por cloretos, um sensor galvânico é provavelmente a melhor opção para monitoramento (Klassen e Roberge, 2008). A sua instalação na estrutura fornece medidas de intensidade de corrente galvânica e potencial de corrosão que permitem monitorar a profundidade da frente de penetração de cloretos (Mccarter e Vennesland, 2004; Andrade et al., 2008; Araújo et al., 2013). Os sensores galvânicos são formados por dois metais com potenciais elétricos diferentes (ânodo e cátodo) (Andrade et al., 2008), espacialmente separados (Angst e Buchler, 2015).

A macrocélula galvânica criada pelos metais resultará em um fluxo de corrente (I_{gal}) entre o metal que atua como ânodo e o metal que age como cátodo no par. Este fluxo pode ser medido sem a aplicação de corrente externa, sendo esta a principal vantagem deste tipo de sensor, pois isto garante a simplicidade do sensor e dos sistemas de medição, diminuindo os custos associados. O fluxo de corrente dentro da macrocélula pode ser medido por meio de um Amperímetro de resistência zero. Pela lei de Ohm, esse fluxo de corrente entre as regiões mencionadas está limitado pela resistência do eletrólito, a resistência de polarização anódica (R_A) e a resistência de polarização catódica (R_C) (Andrade et al., 2008; Baltazar et al., 2007). Por tanto, a corrente induzida pelo acoplamento do ânodo e do cátodo, é proporcional à dissolução do ferro no ânodo da macrocélula (Mccarter e Vennesland, 2004).

A I_{gal} não deve ser confundida com a densidade de corrente de corrosão (I_{corr}), que pode ser obtida por meio da equação de Stern-Geary, a partir do valor da resistência de polarização (R_p) (Martínez e Andrade, 2009) ou por meio da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) que ainda é uma técnica muito utilizada em laboratório (McCarter e Vennesland, 2004) devido à sobreposição de arcos provenientes de fenômenos simultâneos e a ruídos da medida, associados, evidentemente, à heterogeneidade do concreto das estruturas em serviço (Ribeiro et al., 2015).

A estimativa direta dos valores reais de R_p a partir da relação entre a variação do potencial e a mudança induzida na corrente ($\Delta E/\Delta I$), geralmente não é viável em grandes estruturas de concreto. Porque o sinal elétrico aplicado tende a desaparecer na medida que aumenta distância entre o contra-eletródo (CE), necessário para registrar o parâmetro, e o eletródo de trabalho (WE). Para contornar esta problemática, pode-se usar anéis de confinamento em determinada área da superfície do WE (Feliú et al., 1990). Porém, resulta inviável confeccionar um sensor para ser embebido no concreto que além de permitir a leitura da R_p confine uma área específica da armadura (Martínez e Andrade, 2009).

Um sensor para ser embebido no concreto visando medir R_p e I_{corr} , deve incluir na sua composição um eletródo de referência (REF), um contra eletródo (CE), e também é necessário um eletródo de trabalho (WE) para evadir o efeito da distância crítica (L_{crit}) entre o CE e a armadura principal no caso que a mesma esteja em estado passivo. Além dos parâmetros de corrosão eletroquímica, deve ser considerado um termopar para medir a temperatura e medidores de resistividade para considerar o efeito da variação da temperatura e teor de umidade no concreto. Sendo assim, os custos associados a materiais e sistemas de leituras aumentariam.

O sensor galvânico é um dos sensores de corrosão mais comercializados no mercado internacional. Mesmo assim, um sensor pode custar em volta dos 400 dólares, o que encarece e dificulta seu uso nas obras públicas, além do número de fornecedores ser limitado (Araújo et al., 2013).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o funcionamento de um sensor galvânico de múltiplos eletrodos, confeccionado com materiais brasileiros de baixo custo. Para isto os sensores desenvolvidos foram embebidos em prismas de concreto armado que foram expostos a uma solução aquosa com adição de NaCl (3,5% em massa) em ciclos alternados de imersão parcial e secagem. Procurou-se simular as condições de serviço de uma zona variação de maré, dentro de uma atmosfera marinha. O trabalho visa ainda avaliar como a disposição do sensor, a classe de resistência do concreto e o efeito de ciclos de molhagem e secagem, podem afetar as leituras realizadas.

O sensor galvânico confeccionado usa como referência o sensor *CorroWatch Multisensor*, mas em lugar de usar como cátodo titânio ativado que é dez vezes mais caro do que o aço convencional (ISE, 2020), optou-se por utilizar o cobre. Desta forma, o trabalho trata de uma investigação relacionada com a solução de problemas relativos ao controle de qualidade, patologia e recuperação de construções, enfoque que é tema recorrente na revista Alconpat (Real et al., 2015; Hernández et al., 2016; Macioski et al., 2016; Pérez et al., 2018).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Corpos de prova de concreto

O programa experimental consistiu na análise do comportamento de sensores galvânicos instalados em corpos de prova de concreto armado prismáticos, com dimensões: (150 x 150 x 100) mm e duas barras de aço CA-50 de diâmetro de 6,3 mm (1/4") colocadas paralelamente uma em relação à outra. A Figura 1 ilustra a configuração do corpo de prova. Para cada concreto foram produzidos 4 corpos de prova, totalizando 8 amostras.

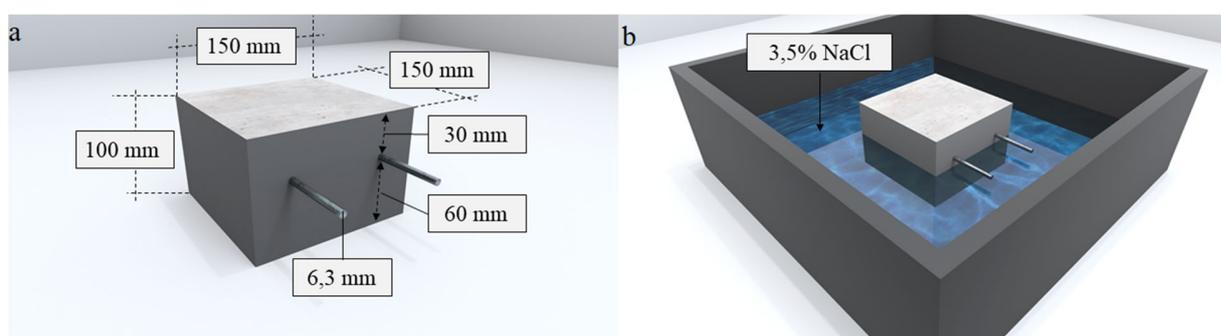


Figura 1. (a) Configuração do corpo de prova prismático de concreto armado. (b) Corpo de prova imerso parcialmente.

Nos corpos de prova, o cobrimento das barras principais foi definido usando como referência a NBR 6118:2015. Considerando que as estruturas ou alguns dos seus elementos podem estar expostos a condições ambientais muito fortes (Classe IV). Para a Classe IV a norma indica um cobrimento mínimo (c_{min}) de 50 mm, assumindo que os corpos de prova sejam representativos de uma viga ou pilar. Neste contexto, o cobrimento da armadura principal com relação à superfície do corpo de prova, exposta à solução de NaCl, foi de 60 mm. Nas faces laterais dos corpos de prova e na superfície exposta ao ar, as barras têm o cobrimento de 30 mm, conforme mostrado na Figura 1(a).

Neste experimento foram empregados dois concretos convencionalmente usados nas usinas de concreto da região de Curitiba, conforme a Tabela 1. O ensaio de resistência à compressão nos concretos (cilindros de Ø10 x 20 cm) ocorreu em conformidade à NBR 5739 (2018). A média, para este ensaio, foi obtida a partir de três rupturas à compressão para cada série de ensaio. A resistência à compressão média (f_{cm}) do concreto com (a/c) de 0,75 foi de 20,62 MPa, e a f_{cm} do concreto com (a/c) de 0,45 foi de 39,36 MPa. O ensaio foi desenvolvido com os corpos na condição saturados com superfície seca.

Tabela 1. Proporções de mistura usadas para a moldagem dos corpos de prova.

Concreto	Cimento [kg/m ³]	Areia [kg/m ³]	Brita [kg/m ³]	a/c [kg/kg]
15 MPa	242,11	970,86	997,50	0,75
30 MPa	410,04	758,58	1053,82	0,45

O traço 15 simula um concreto estrutural de construções antigas. Deve-se destacar que estruturas construídas a algumas décadas permitiam resistências características (f_{ck}) abaixo de 20 MPa. Além disso, normas como a ACI 318-14, recomendam f_{ck} mínimo de 17 MPa para estruturas de concreto armado expostas a umidade e fonte externa de cloretos (Classe C2). A norma brasileira NBR 6118:1980 só estabelecia que o concreto deveria apresentar uma resistência característica f_{ck} superior a 9 MPa, e compatível com a adotada no projeto, assim como atender aos critérios de controle da qualidade previstos na ABNT NBR 12655. Porém, a norma NBR 6118:1980 não incluía critérios de durabilidade para a execução de concreto estrutural de acordo com o nível de agressividade do ambiente ao qual o concreto estaria exposto.

O traço 30 é correspondente à Classe III (atmosfera marinha ou industrial) de acordo com a NBR 12655:2006 e versão atualizada da NBR 6118:2014, semelhante ao concreto recomendado pela ACI 318-14 ($f_{ck} = 30$ MPa – $a/c = 0,40$) para as mesmas condições de exposição. Para execução dos corpos de prova de concreto armado, o cimento utilizado foi o CP-II-F-32, que apresenta até 25% de material carbonáceo (NBR 16697:2018). O agregado miúdo foi uma areia fina e como agregado graúdo foi usado uma brita 1. A caracterização física dos agregados e as normas consideradas para isto, é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização física dos agregados.

Agregado	Dimensão máxima característica	Módulo de finura	Teor de finos	Massa específica
Graúdo (Brita 1)	19,00 mm	1,83	0,39%	2,66 g/cm ³
Miúdo (Areia fina)	0,600 mm	2,40	9,06%	2,50 g/cm ³
Normativa	ABNT NM 248:2003			ABNT NBR NM 52:2003 ABNT NBR NM 53:2003

A consistência do concreto foi mensurada com o método do abatimento do tronco de cone (*slump test*), conforme recomendações da norma brasileira NBR 7223: 1992. Para ambos concretos, adotou-se uma fluidez na faixa de 80 ± 10 mm, de forma a manter uma consistência plástica para a moldagem de todos os corpos de prova, que não necessitaram uso de aditivos. Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura por imersão em água saturada com cal conforme indica a norma NBR 5738:2003 durante o período de 91 dias.

Optou-se por um período de cura superior ao recomendado pela norma NBR 5738:2003 (de 28 dias) para simular um concreto de uma estrutura real que venha a sofrer a necessidade de ensaios de campo após determinada quantidade de anos de serviço. Portanto, não foram realizadas leituras eletroquímicas durante o endurecimento do concreto ou durante o período de cura do concreto. Sendo o objetivo simular o interior de uma estrutura real para avaliação do desempenho do sensor, não foi considerado um período de estabilização do concreto fora da câmara de cura. Considerações semelhantes foram realizadas no trabalho de Rocha (2012) e por Dotto (2006).

Finalmente, após o processo de cura de 91 dias, os corpos de prova foram colocados na estufa a 50 °C durante 5 dias para secagem. Em seguida as superfícies laterais dos corpos de prova foram isoladas da exposição a cloretos com uma tinta epóxi com a intenção de fazer com que a frente de contaminação só avance pela face com o cobrimento de 60 mm. Para induzir a corrosão do aço embutido no concreto foi usado um processo acelerado de envelhecimento que envolve a absorção

e difusão dos íons cloretos na matriz cimentícia. O envelhecimento acelerado seguiu um sistema de imersão parcial alternado em ciclos. Os ciclos foram compostos de secagem em estufa a 50 °C por 5 dias e imersão parcial dos corpos de prova na água com 3,5% de NaCl em massa por 2 dias, conforme mostra a Figura 1(b). Esta abordagem foi adotada com base em outros trabalhos que utilizaram o mesmo sistema de imersão alternada (Freire, 2005; Dotto, 2006; Silva, 2010; Rocha, 2012; Silva, 2017).

Além disso, o sistema adotado e a concentração do sal tentam reproduzir condições de serviço semelhantes a uma zona variação de maré, dentro de uma atmosfera marinha. Nessa região, existe o contato com água contaminada com cloretos, com ciclos de molhagem e secagem. O que caracteriza uma condição de exposição crítica em termos de corrosão de armaduras. O mecanismo principal de degradação presente nessas condições é a corrosão das armaduras pela ação dos íons cloreto (Lima e Morelli, 2004), que é o ataque considerado para avaliar o desempenho dos sensores nesta pesquisa.

2.2 Configuração do sensor

A macro célula galvânica considerada no estudo é formada por cobre e aço carbono. Foram usadas barras de aço-carbono de 60 mm de comprimento e diâmetro 6,3 mm (1/4") (ânodo) a diferentes alturas e instalados sobre uma placa de cobre (cátodo) de 50 por 50 mm e 4 mm de espessura. Todos os metais foram polidos com escova com fios de aço. Em seguida, foram enxaguados com água destilada, imersos em álcool e secos ao ar. A área da placa de cobre que atua como cátodo (Ac) no sensor galvânico projetado no trabalho foi configurada de maneira que fosse igual à somatória da área superficial dos ânodos (Aa) que compõem a macro célula galvânica para uma relação $Ac/Aa = 0,97$. A Figura 2 mostra um desenho do sensor galvânico utilizado no estudo.

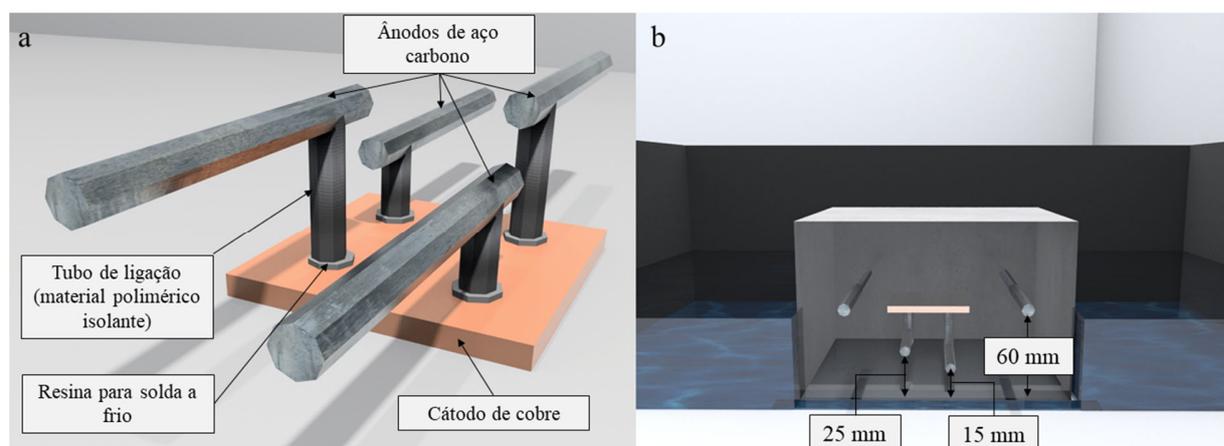


Figura 2. a) Sensor galvânico utilizado no estudo. b) Sensor galvânico instalado no interior do corpo de prova. Fonte: Autor.

Dois dos ânodos do sensor ficaram a uma profundidade de 15 mm e os dois restantes a uma profundidade de 25 mm, com relação à superfície do corpo de prova, exposta à solução de NaCl. Sendo essas as profundidades nas quais o sensor deve produzir a informação de despassivação da armadura pelo ingresso de cloretos, como indica a Figura 2(b). A Figura 3 mostra a moldagem dos corpos de prova prismáticos e instalação do sensor.

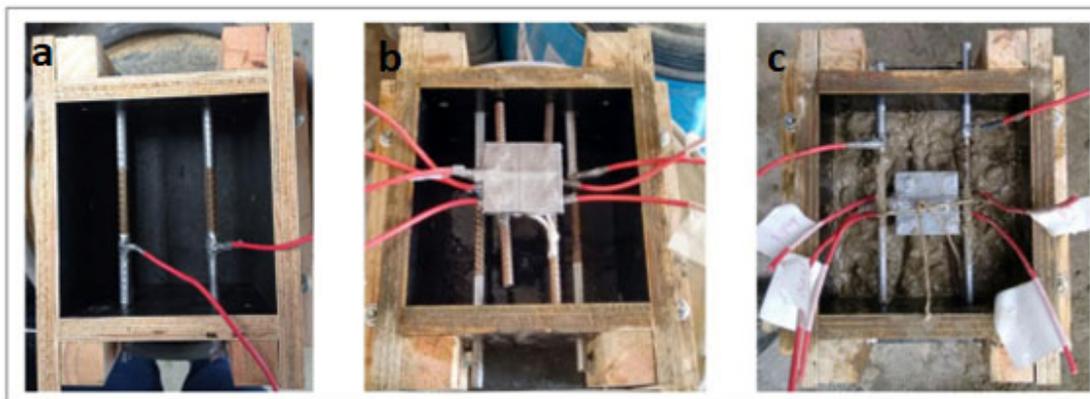


Figura 3. a) Instalação das barras principais. b) Formas lubrificadas com óleo e com o sensor posicionado. c) Moldagem com o sensor embebido. Fonte: Autor.

Para encaixar as barras de aço carbono na placa de cobre, foram realizados 4 furos de 8,0 mm de diâmetro ($> 6,3$ mm), conforme mostra a Figura 4. As barras de aço carbono foram fixas na placa de cobre com resina para solda a frio, de modo a evitar um par galvânico indesejado que comprometesse o adequado funcionamento do sensor além de expor o aparelho a degradação prematura. Para o circuito elétrico externo que conecta os eletrodos e permite o escoamento de elétrons se utilizou cabo de cobre isolado com filme de PVC e seção transversal de $2,5 \text{ mm}^2$, que foi soldado aos metais envolvidos. Os pontos de soldadura foram protegidos com material polimérico isolante.

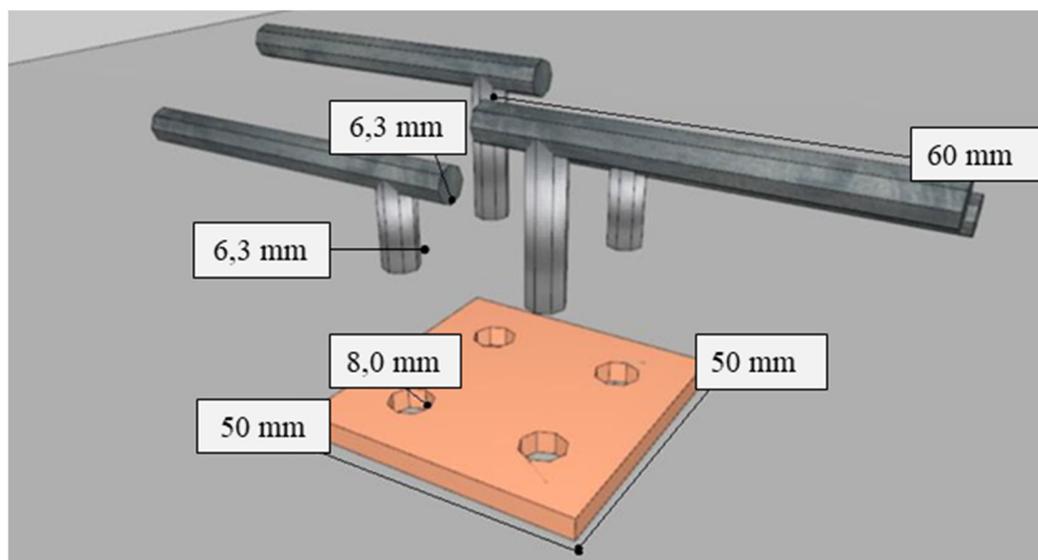


Figura 4. Esquema da montagem do sensor.

A escolha dos metais (eletrodos) para a construção do sensor galvânico esteve em função do potencial de equilíbrio irreversível (E_{eq}) predeterminado. Os potenciais de equilíbrio irreversíveis são os potenciais de eletrodo que se modificaram sob a influência da polarização ou fatores externos. São determinados experimentalmente e são comumente chamados de potenciais de corrosão (Gentil, 1996). Para determina-los, usa-se um eletrodo de referência, por exemplo, um eletrodo padrão de hidrogênio. O E_{eq} indica a tendência do eletrodo de sofrer redução ou oxidação em um meio determinado. Quanto maior o potencial de corrosão do eletrodo em uma tabela de potenciais, maior a tendência do eletrodo a sofrer oxidação, isto é, se comportar como ânodo

(Gentil, 1996; Pawlick et al., 1998; Souza, 2014).

O potencial de equilíbrio irreversível do ferro, imerso em um eletrólito simulando a água do mar com referência a um eletrodo de hidrogênio está no intervalo de (-0,34 a 0,50) V. Entretanto, o potencial de corrosão do cobre está no intervalo de (-0,02 a 0,05) V (Akimov, 1957). No estudo não foi realizado o procedimento experimental correspondente para determinar o valor do potencial irreversível do cátodo e do ânodo separadamente.

Finalmente, com o intuito de tornar mais prático o sensor, proteger os cabos de cobre e consequentemente melhorar o registro das leituras eletroquímicas, foram colocaram conectores elétricos tipo pino em todas as pontas, conforme a Figura 5(b).

2.3 Ensaios de caracterização e técnicas eletroquímicas

A cada ciclo de exposição, as leituras eletroquímicas foram conduzidas no segundo dia de imersão parcial na água com 3.5% de NaCl. Com o intuito de determinar o potencial dos pares do sensor ao longo de processo de envelhecimento, usou-se o aquisitor de dados LabVIEW 8.5, que registrou a diferença de potencial de polarização (E_{par}), conforme mostra a Figura 5.

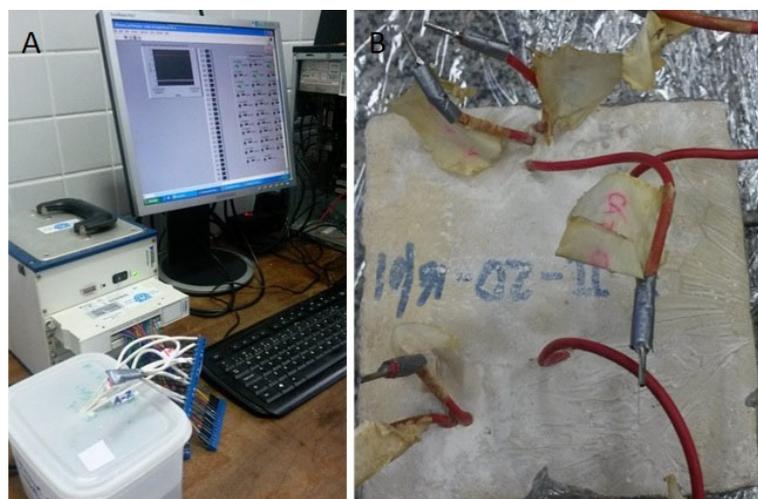


Figura 5. a) Aquisitor LabVIEW 8.5 realizando a leitura de E_{par} . b) Corpo de prova com conectores elétricos tipo pino. Fonte: Calvo, (2018).

Teoricamente, o potencial de um par galvânico (E_{par}) é resultado da combinação dos potenciais dos metais envolvidos. Se trata de um processo espontâneo provocado pela natureza diferente dos eletrodos que conduz à polarização de ambos os metais para um potencial combinado (E_{par}) (Gentil, 1996; Pawlick et al., 1998). Ou seja, se obtém a partir da diferença entre o potencial positivo correspondente ao cátodo ($E_{cátodo}$) e o potencial negativo ($E_{ânodo}$) correspondente ao ânodo conforme mostra a Equação (1) (Pawlick et al., 1998) no meio no qual estão inseridos.

$$E_{par} = E_{célula} = E_{cátodo} - E_{ânodo} \quad (1)$$

Na prática $E_{cátodo}$ é o potencial de polarização do cátodo e $E_{ânodo}$ é o potencial de polarização do ânodo. O potencial de polarização é resultado do deslocamento (η) do potencial de equilíbrio irreversível do metal (E_{eq}) pela formação do par galvânico. Assim, a Equação 1 pode ser redigida na forma da Equação (2).

$$E_{par} = (E_{eq} + \eta)_{cátodo} - (E_{eq} + \eta)_{ânodo} \quad (2)$$

Como nenhuma corrente externa é aplicada à macrocélula galvânica, o potencial de polarização dos eletrodos (ânodo e cátodo) é sempre no intervalo do potencial natural dos metais no interior do concreto (Mccarter e Vennesland, 2004). Portanto, o valor de E_{par} oscilará em função das condições do meio (Pawlick et al., 1998). Sendo assim, o valor de E_{par} deve ser obtido empiricamente (Sousa, 2014), e no seu valor estão embutidos os valores de E_{eq} e η , dispensando a determinação desses fatores separadamente.

Assim, o aquisitor de dados gerou uma leitura individual correspondente a cada um dos pares ânodo-cátodo do sensor projetado. Cada par é reconhecido pelo aquisitor como um canal de leitura individual. Foi analisado se a leitura de diferença de potencial se mantém estável ao longo do tempo, e o tipo de reação que indicava: galvânica ($E_{par} > 0$) ou eletrolítica ($E_{par} < 0$).

Para o registro da corrente galvânica (I_{gal}) foi usada a técnica eletroquímica que usa um Amperímetro de resistência nula (ZRA - *Zero Resistance Ammeter*), acoplado a um potenciostato SP-200 e aquisição via software EC-Lab. Esta técnica consiste na medição de corrente galvânica em um par formado por metais diferentes, um com um comportamento anódico e outro com comportamento catódico.

A técnica também é usada para desempenhar alguns tipos de medições de ruído eletroquímico e consiste em estabilizar a voltagem entre o eletrodo de trabalho e o contra-eletrodo, e medir a corrente e o potencial versus o eletrodo de referência (EC-LAB., 2011). Neste caso, os eletrodos de trabalho são as barras de aço carbono do sensor galvânico. Como contra-eletrodo se usou uma malha de aço inox e o eletrodo de referência foi a placa de cobre do sensor.

Com o intuito de auxiliar na validação do comportamento do sensor, as leituras de corrente galvânica e potencial do par foram correlacionadas com as leituras de potencial de circuito aberto (E_{corr}). Devido à sua simplicidade, a medição do potencial de corrosão, E_{corr} , é o método mais utilizado nas determinações de campo (Martínez e Andrade, 2009). A partir dessas medições, mapas de potencial são desenhados revelando as zonas que são mais propensas a sofrer corrosão no estado ativo (ASTM C876-15).

Em cada ânodo foi efetuada uma leitura, totalizando 6 leituras por corpo de prova: quatro nos ânodos do sensor e duas nas barras de reforço. Nas leituras de diferença de potencial foi usado um eletrodo de referência de Cu/CuSO₄. Para análise dos resultados de maneira a estimar a probabilidade de corrosão em determinada estrutura, foram considerados os limites encontrados na norma ASTM C876-15.

Contudo, ainda não existe normativa que estabeleça uma faixa fixa de valores de I_{gal} e E_{par} para caracterizar o estado ativo do aço no concreto. Assim sendo, não é o valor absoluto da corrente que deve ser considerado, mas sim a variação de seus valores ao longo do tempo (Raupach e Schiessl, 2001; Araújo et al., 2013).

Finalmente, foi realizado o teste qualitativo pelo método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata (AgNO₃) para determinação da profundidade da frente de penetração de cloretos que ingressam no concreto por absorção e difusão, ainda que não quantifique os teores de cloretos livres (Real et al., 2015; França, 2011, Pontes et al., 2020). O ensaio consiste em aspergir uma solução aquosa de AgNO₃ 0,1 M às fatias recém fraturadas de concreto. Quando a solução de nitrato de prata é aspergida na superfície do concreto, ocorre uma reação fotoquímica. Onde há presença de cloretos livres, ocorre a formação de um precipitado branco de cloreto de prata. Na região sem cloretos ou com cloretos combinados, há formação de um precipitado marrom, o óxido de prata (Medeiros, 2008; Marcondes, 2012).

Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram partidos ao meio, no sentido do fluxo de cloretos instantes antes do ensaio para evitar que ocorresse carbonatação. De forma paralela, também foi feito um teste com aspersão de fenolftaleína (1% em álcool etílico) em uma das fatias dos corpos de prova para evitar falsos positivos. Já que na presença de carbonatos também há formação de um precipitado branco (Jucá, 2002).

Após a aspersão da solução aquosa de nitrato de prata foram realizadas dez medidas da profundidade de penetração de cloretos, a cada 10 mm, seguindo as recomendações da NT BUILD 492 (2000). Evitando-se, assim, erros grosseiros na leitura da profundidade alcançada pelos cloretos. Antes de aspergir o nitrato de prata e a fenolftaleína, cada fatia foi escovada para eliminar o pó da superfície.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Potencial de corrosão

A Figura 6 mostra os resultados de Potencial de circuito aberto (E_{corr}) nos corpos de prova com concreto de 15 MPa. A Figura 7 apresenta os dados correspondentes aos corpos de prova com concretos de 30 MPa. Em ambas figuras se observa a média das leituras obtidas nos ânodos do sensor galvânico instalado no interior dos corpos de prova, com espessura de revestimento de 1,5 cm, e 2,5 cm, respectivamente. Também estão representadas nestas figuras as médias correspondentes às barras principais com espessura de revestimento de 6 cm.

No fim do primeiro ciclo de molhagem se observaram valores negativos de E_{corr} (< -350 mV), nos ânodos instalados a 1,5 cm e 2,5 cm, em ambos concretos. Diversas pesquisas observaram valores mais negativos (indicando corrosão ativa) no início dos ensaios de corrosão (Gurdián et al., 2014; Rocha et al., 2014; Capraro et al., 2016; Jiang et al., 2017; Medeiros et al., 2017; Godinho et al., 2018; Godinho et al., 2019; e Capraro et al., 2021). Este comportamento está relacionado ao processo de formação do filme passivador sobre a armadura que envolve a oxidação da superfície do metal e, por este motivo, gera leituras eletronegativas no início do ensaio (Poursaeed, 2016; Meira, 2017; Ribeiro et al., 2018).

Assim, o E_{corr} muda gradualmente transitando de valores mais negativos para valores mais positivos, até estabilizar e indicar a formação do filme passivador (Sun et al., 2017), na ausência de agentes agressivos no interior do concreto. Capraro et al. (2021), por exemplo, observaram altos valores negativos (-600 mV / -700 mV) do início do monitoramento até 800 dias em todas as séries expostas a ciclos de molhagem e secagem em câmara seca ($55 \pm 5\%$ U.R. e 23 ± 2 °C). De forma semelhante, Godinho et al. (2018), observaram leituras na faixa de -486 mV a -550 mV até os 100 dias.

Com o intuito de incentivar a formação do filme passivo nas barras de aço antes da moldagem Ghods et al. (2010), Nahali et al. (2014), Williamson e Isgor, (2016) e Godinho et al. (2019), sugerem a imersão das barras de aço carbono em soluções sintéticas que simulem o interior do concreto, antes da moldagem.

Neste trabalho, o monitoramento dos ânodos instalados a 1,5 cm e 2,5 cm não apresentou um nível de estabilização, mas uma tendência a se tornar mais eletronegativo na medida que o teor de cloretos no interior do concreto aumentou.

No que diz respeito à durabilidade do concreto, a ABNT NBR 6118 (2014) estipula valores mínimos de revestimento (C_{min}) sobre a armadura de acordo à agressividade do ambiente no qual a estrutura esteja inserida. Neste caso, para os ânodos do sensor galvânico (1,5 e 2,5 cm), esses valores não foram respeitados intencionalmente. Somando a isto a interconectividade entre os poros existentes e as microfissuras na pasta, a eficiência da proteção física que o revestimento confere é diminuída.

Ainda segundo Leek (1991) e Ribeiro et al. (2014), mesmo com a reserva alcalina produto do teor de $Ca(OH)_2$ no concreto e a película de passivação, a presença de cloretos no interior do concreto pode desencadear a dissolução do filme passivo e dar início ao processo corrosivo. Segundo os autores Huafu et al. (2015) e Jin et al. (2017), na medida que cresce o grau de contaminação por cloretos, mais negativo tende a ficar o valor de E_{corr} .

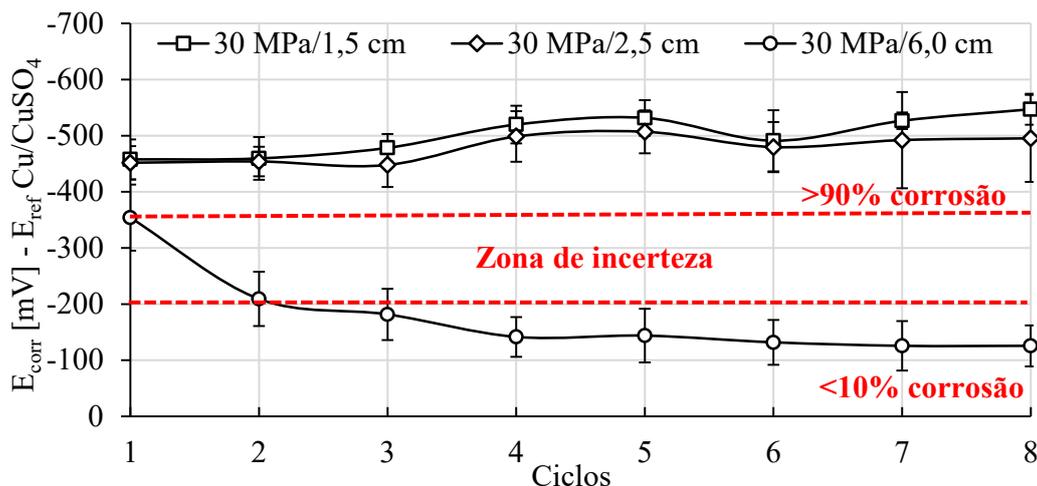


Figura 6. Potencial de corrosão para o traço 15 MPa. Fonte: Autor.

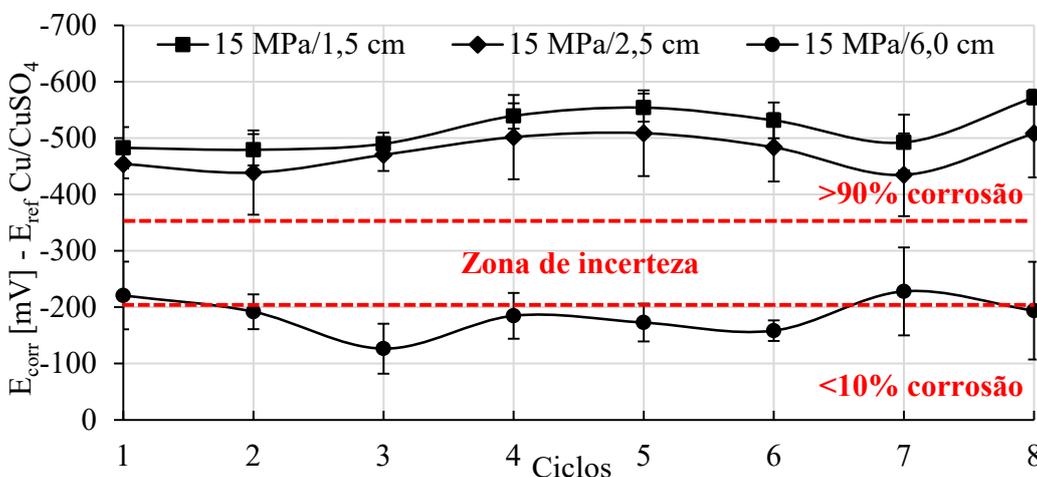


Figura 7. Potencial de corrosão para o traço 30 MPa. Fonte: Autor.

Por outro lado, nas barras principais com 6 cm de cobrimento a probabilidade de corrosão ficou menor do que 10 % ou no intervalo de (-200 a -350 mV), em ambos concretos. Um comportamento semelhante foi observado pelos autores Romano et al. (2013), que estudaram o desempenho de um sensor com eletrodos em profundidades diferentes com relação à superfície exposta do corpo de prova, a saber: 1,5 e 3 cm. No estudo, o eletrodo colocado a menor profundidade indicou despassivação antes do que o eletrodo com 3 cm de cobrimento. Além disso, as barras de reforço do corpo de prova com cobrimento de 4 cm despassivaram 100 dias depois do eletrodo do sensor colocado em menor profundidade.

Teoricamente, valores mais eletronegativos de E_{corr} indicam um nível crítico de íons cloreto no entorno dos ânodos do sensor. Se os ânodos são instalados a diferentes profundidades, os ânodos mais perto da superfície externa, através da qual acontece a penetração dos íons, deverão apresentar valores mais eletronegativos mais rapidamente do que aqueles ânodos localizados a maior profundidade (Romano et al., 2013).

Finalmente, a análise de variância ANOVA e o subsequente teste de Tukey com 95% de confiança, indicaram que a resistência do concreto não influenciou nos resultados obtidos durante o teste de potencial de corrosão. Por tanto, o comportamento dessa grandeza nos corpos de prova de ambos traços foi o mesmo.

3.2 Potencial do par

As Figuras 8 e 9 mostram os valores médios de potencial do par para os seis ânodos do sistema (sensor de corrosão + barra de aço). Para o concreto de 15MPa, quando o valor de potencial do par ficou negativo, a probabilidade de corrosão do ânodo foi menor que 10 % ou encontrava-se na zona de incerteza de acordo com as leituras de potencial de circuito aberto.

Com base nos resultados observados neste trabalho, 20 mV/min. é o valor de potencial do par (E_{par}) para o arranjo e metais utilizados (aço carbono-cobre), que caracteriza o par galvânico de testado. Em paralelo, o patamar de 200 mV/min. aparenta indicar a mudança para o estado ativo (indicado com uma linha tracejada nas Figuras 8 e 9).

Assim, quando o potencial do par se encontra no intervalo de 20 a 200 mV/min., como no caso dos ânodos com cobertura de 1,5 cm e 2,5 cm nos primeiros ciclos, a corrosão se encontra no estado ativo. A partir do 4º ciclo o potencial do par ficou maior do que 200 mV/min., e os ânodos estavam definitivamente no estado ativo, independentemente do revestimento. Já que valores positivos de E_{par} indicam que o processo de oxidação, predomina sobre o processo de redução e o ânodo sofre corrosão (polarização anódica). Quanto maior a diferença de potencial no par galvânico, mais intensa tende a ser a polarização anódica (Pawlick et al., 1998, Sousa, 2014; Fernandes e Martendal, 2015) e mais intensa é a reação de corrosão no par.

Para o concreto de 30MPa (Figura 9), um comportamento semelhante foi observado para os seis ânodos a 1,5, 2,5 e 6,0 cm de profundidade. A resistência do concreto não influenciou nos resultados obtidos durante o teste de potencial do par, conforme análise estatística (ANOVA e Tukey a 95% de confiança). Destaca-se, ainda, que o erro das médias das leituras E_{par} são pequenas quando comparadas com o E_{corr} (Figs 6 e 7). Assim, é possível comprovar uma maior estabilidade nas leituras realizadas com o sensor galvânico.

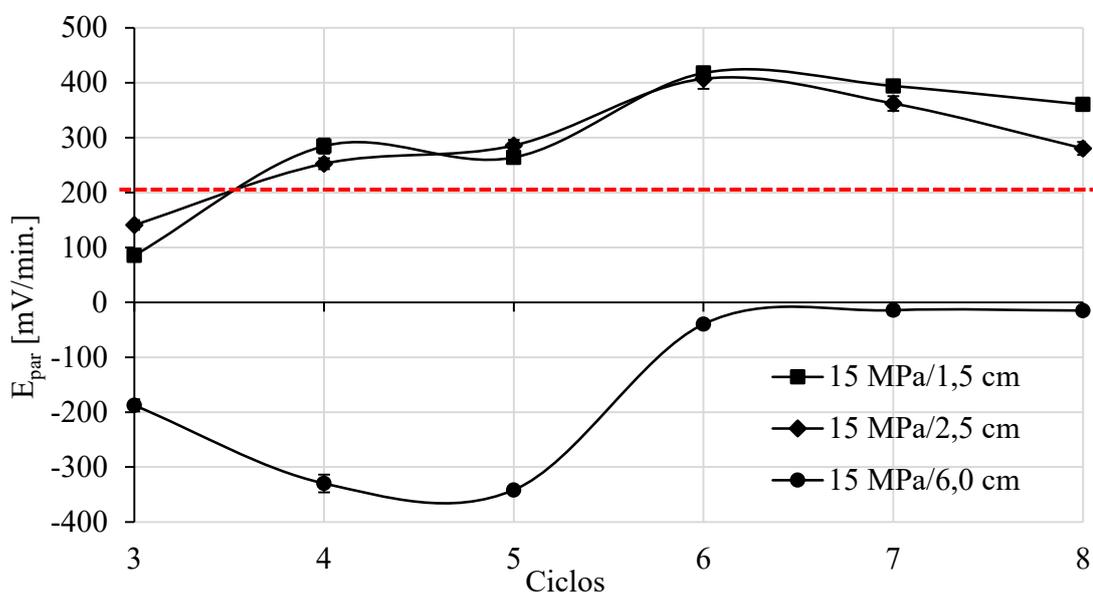


Figura 8. Potencial do par para o traço 15 MPa. Fonte: Autor.

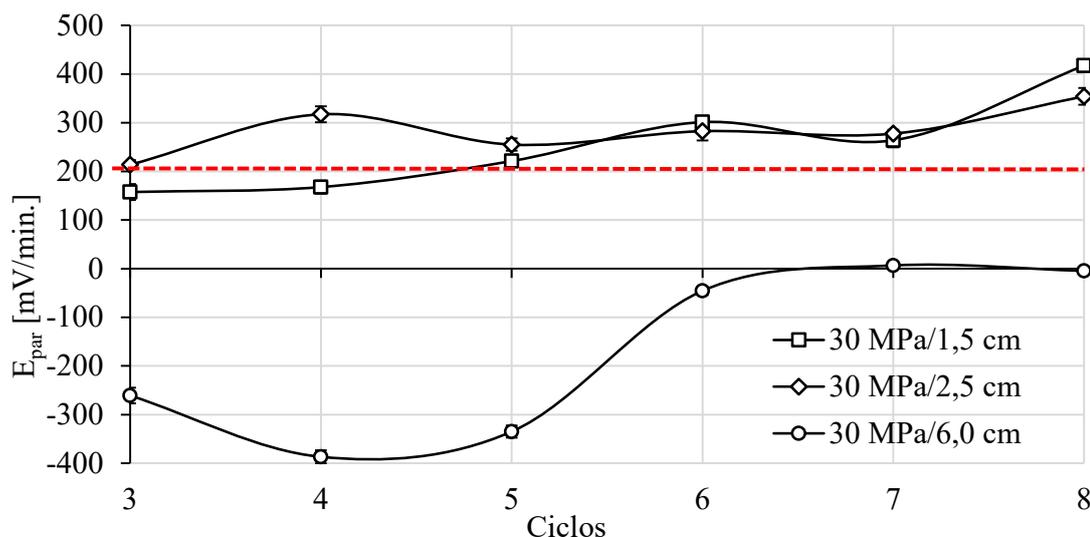


Figura 9. Potencial do par para o traço 30 MPa. Fonte: Autor.

Angst e Buchler (2015) expõem algumas dificuldades intrínsecas ao monitoramento do potencial misto de uma macro-célula galvânica (E_{par}): (i) as reações anódicas e catódicas ocorrem geralmente no mesmo elemento estrutural, (ii) ou não é possível colocar eletrodos de referência perto do ânodo e do cátodo (iii) ou a condutividade do eletrólito é muito alta e, portanto, a diferença de potencial muito baixa para ser medida com precisão.

Note-se, no entanto, que Angst e Buchler (2015) se referem a macro-célula formada sobre a superfície de uma barra de aço, produto da penetração de cloretos no concreto que provoca corrosão localizada. Um sensor galvânico, de forma diferente, é formado por pequenos trechos de metal com potenciais elétricos diferentes onde um atuará como ânodo e outro como cátodo; embutidos no concreto em profundidades sempre menores do que a da armadura (Andrade et al., 2008; Araújo et al., 2013), o que diminui a influência da condutividade do eletrólito.

Resta considerar então o aspecto (ii) mencionado pelos autores: a possibilidade de colocar eletrodos de referência perto do ânodo e do cátodo. Assim, nos testes futuros que venham a utilizar o sensor galvânico proposto na presente pesquisa, é recomendável instalar também um eletrodo de referência. Esta prática possibilitará determinar de forma separada o potencial do ânodo e do cátodo e assim poder determinar a curva de polarização de cada eletrodo, e aprimorar o monitoramento do potencial do par galvânico.

Sugere-se também acompanhar o comportamento do potencial do par (E_{par}) em um meio livre de agentes agressivos, até o parâmetro atingir um ponto de equilíbrio na faixa dos valores positivos. Já que o seu valor está em função dos potenciais dos metais que compõem o par galvânico no interior do concreto (Pawlick et al., 1998; Mccarter e Vennesland, 2004).

Todavia, a estabilidade ao longo do tempo do potencial do sensor, também é influenciada pelas densidades de corrente anódica e catódica. Por sua vez, as correntes anódicas e catódicas são função da área do ânodo e da área de cátodo, respectivamente (Pawlick et al., 1998).

Sendo assim, se o ânodo tem área insuficiente, o potencial do par vai mudar para valores mais altos com um limite superior representado pelo potencial de circuito aberto do metal que atua como cátodo. Com a elevação da área do cátodo em relação ao ânodo, aumenta a demanda por elétrons do cátodo, enquanto a área do ânodo a partir da qual os elétrons serão fornecidos diminui e, portanto, a taxa de dissolução do ânodo aumenta (Sousa, 2014). Nestas condições, existe o risco que o ânodo se degrade excessivamente e diminua o período de vida útil do sensor. Sendo assim, deve-se avaliar o comportamento do sensor galvânico com uma relação área do cátodo/área do ânodo (A_C/A_A) igual a 1, de modo a aprimorar o funcionamento do sensor proposto no trabalho.

Inicialmente o programa experimental não previa a realização deste ensaio, mas demonstrou ser de suma importância para compreender o comportamento do sensor ao longo do tempo.

3.3 Corrente galvânica

Teoricamente, quando um processo corrosivo é estabelecido nas barras, a corrente galvânica passa a aumentar na faixa dos valores positivos, em decorrência da variação do potencial do ânodo, que assume valores mais negativos em relação aos obtidos inicialmente, em seu estado passivo (Araújo et al., 2013; Lacerda e Muller, 2015). Um aumento da corrente galvânica, acompanhado por uma diminuição do potencial de circuito aberto, indica que um nível crítico de íons cloreto foi atingido (Andrade et al., 2008; Araújo et al., 2013).

Nas Figuras 10 e 11 é possível observar que durante o monitoramento, a corrente galvânica (I_{gal}) ficou negativa durante sete dos oito ciclos nos seis ânodos monitorados (quatro do sensor galvânico e as duas barras principais). Para o concreto de 15 MPa (Figura 10), se observaram valores positivos de corrente galvânica no ciclo 7, após 141 dias de monitoramento. Porém, voltam a se tornar negativos no ciclo 8. Para o concreto de 30 MPa, na Figura 11 se observa que a corrente galvânica ficou positiva nos ciclos 7 e 8.

Em princípio, valores positivos de corrente estão em concordância com o potencial de circuito aberto mais negativo do que -350 mV (probabilidade de corrosão $> 90\%$), e com o potencial do par maior do que 200 mV/min. , observados nos ânodos instalados a menor profundidade (1,5 e 2,5 cm).

No entanto, nas barras principais instaladas com 6 cm de cobrimento, o E_{par} indicou uma reação eletrolítica ao longo do monitoramento, o que significa que as barras ficaram em estado passivo em concordância com o valor de potencial de circuito aberto medido. Sendo assim, o registro de corrente galvânica (I_{gal}) positiva não correspondia com o observado nas barras nos testes anteriores. No entanto, a corrente galvânica ficou perto de zero durante todo o teste. Valores de corrente galvânica perto de zero também são indicativos da condição passiva do aço (Park et al., 2005; Sousa, 2014). Sendo assim, da mesma forma que o acontecido na primeira etapa do programa experimental com os sensores embebidos em uma solução aquosa (Calvo et al., 2017), a I_{gal} mostrou maior inércia para identificar a presença de um agente agressivo. Além disso, de acordo com Ribeiro e Cunha (2014), a corrente galvânica (I_{gal}) vai decaindo ao longo da medição, demonstrando um comportamento capacitivo e isto dificulta o seu monitoramento.

Os resultados de corrente galvânica obtidos nos seis ânodos (1,5, 2,5 e 6 cm) instalados nos corpos de prova do traço de 15 MPa, foram estatisticamente equivalentes aos valores de corrente galvânica registrados nos ânodos instalados nos corpos de prova do traço de 30 MPa.

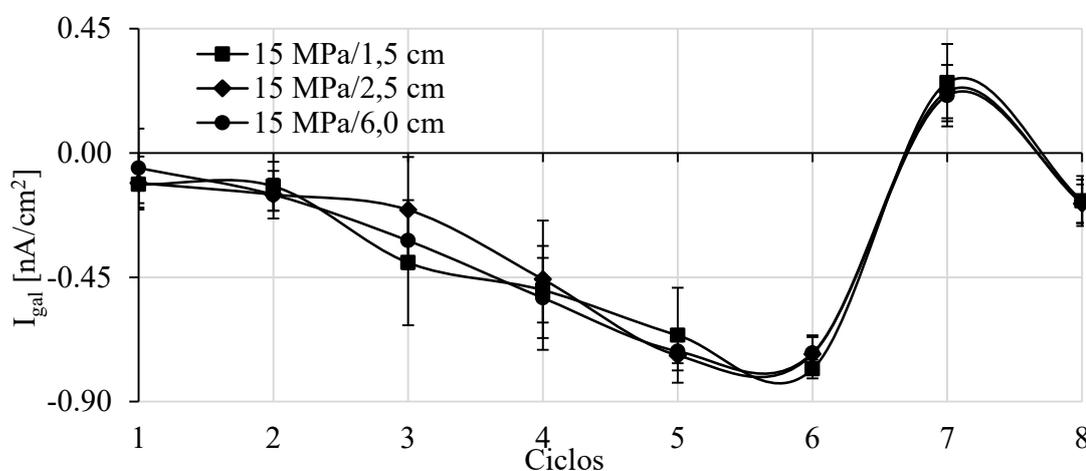


Figura 10. Corrente galvânica para o traço 15 MPa. Fonte: Autor.

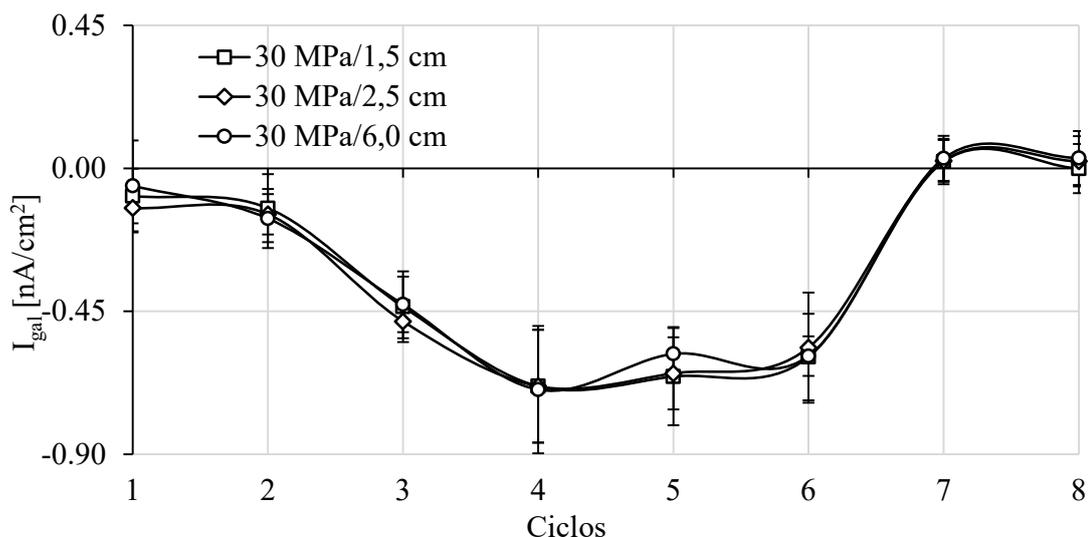


Figura 11. Corrente galvânica para o traço 30 MPa. Fonte: Autor.

Finalmente, para a análise dos dados se aplicou o modelo linear, com determinação do R^2 para inferir a correlação entre as técnicas eletroquímicas consideradas no trabalho. Nenhum fator de correlação (R^2) chegou a se aproximar de 0,9, por tanto, não se pode afirmar que exista uma relação linear positiva entre as técnicas eletroquímicas. Ou seja, as grandezas medidas diferem e não convergem. Por esse motivo este tipo de estudo é importante, pois a escolha da técnica correta, ou conjunto de técnicas, é essencial para que o monitoramento seja eficiente. Todavia as sugestões feitas anteriormente no sentido de aprimorar o funcionamento do sensor são essenciais para poder compreender e estimar o comportamento das grandezas avaliadas em campo de forma certa.

3.4 Penetração de cloretos pelo método colorimétrico

Ao final do monitoramento da corrosão, foram realizados os testes colorimétricos com nitrato de prata (AgNO_3 0,1 M) e fenoltaleína. Na Figura 12, se observa a aparência das fatias do corpo de prova após a aspersão dos indicadores. Em nenhum dos oito corpos de prova testados, se observou concreto carbonatado, conforme indica a coloração rósea em uma das fatias do corpo de prova. Esta evidência de não haver carbonatação nos concretos é importante para ter certeza que o teste colorimétrico com aspersão de solução com nitrato de prata será efetivo, sem indicar o falso positivo alertado nos trabalhos de Pontes et al. (2020).

Na fatia à esquerda, é possível apreciar duas regiões distintas quanto à coloração: uma com precipitado marrom correspondente à região sem cloretos livres, e outra sem coloração na região afetada por cloretos livres que indica até onde chegou a frente de penetração de cloretos. Na Figura 12 a região sem cloretos foi delimitada com uma linha tracejada.

Após 150 dias ao final do oitavo ciclo, a frente de penetração de cloretos atingiu uma profundidade média de 7,6 cm nos corpos de prova do concreto de 15 MPa e de 7,2 cm nos corpos de prova do concreto de 30 MPa. Sendo assim, no concreto ao redor dos ânodos do sensor foi atingido um nível crítico de cloretos. Pois, os resultados obtidos nos ânodos do sensor durante os testes de E_{corr} e E_{par} , indicaram alta probabilidade de corrosão ao final do ensaio.

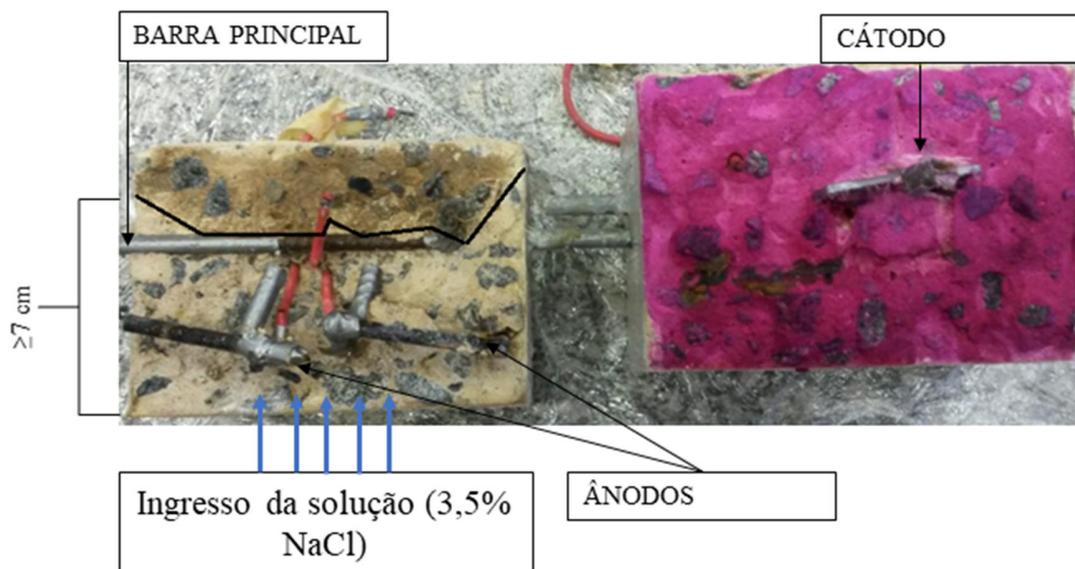


Figura 12. Ensaio colorimétrico (penetração de cloretos e carbonatação) no corpo de prova após o fim do monitoramento.

Observa-se que a profundidade de penetração de cloretos ao final dos ciclos foi semelhante entre os concretos de 15 MPa e o de 30 MPa. Nesse sentido, é necessário apontar que assim como a porosidade, a fissuração proporciona de igual modo facilidades para que os agentes agressivos penetrem no concreto e iniciem sua ação destruidora na estrutura. Após o endurecimento da massa as fissuras são resultado, entre outros fatores, de retração por secagem, corrosão das armaduras e ciclos alternados de molhagem e secagem (Brandão e Pinheiro, 1999). Neste trabalho, os três fatores agiram em combinação proporcionando a aparição de microfissuras, como mostra a Figura 13.

A aparição de microfissuras pode ter intensificado a penetração capilar de água com íons cloro, fazendo com que os concretos apresentem comportamentos semelhantes, diferente do observado em condições de exposição natural. Desse modo, a secagem em estufa a 50 °C não parece adequado e deve ser reavaliado em outros estudos semelhantes. Todavia, estudos que avaliaram a penetração de cloretos em diferentes cimentos brasileiros observaram que concretos com CP-II-F apresentam elevada capacidade de penetração de íons cloro quando comparados a outros tipos de cimento, reduzindo, assim, a influência da relação a/c (Pereira, 2001; Crauss, 2010; Frota et al., 2018).



Figura 13. Microfissuras nos corpos de prova.

Por outro lado, mesmo a frente de penetração de cloretos tendo chegado até as barras principais (6 cm de cobrimento), o teor crítico de cloretos para a despassivação das armaduras não foi atingido no concreto nesta profundidade. Isso, porque a probabilidade de corrosão ficou menor do que 10 % ou na zona de incerteza. Enquanto que o E_{par} indicou uma reação eletrolítica, ou no máximo ficou no intervalo -5 a 20 mV/min.

Neste sentido, é necessário apontar que a chegada de cloretos nas proximidades da armadura, por si só, não representa o início do processo de corrosão. O processo se iniciará apenas quando quando o teor de íons Cl^- em torno da barra de aço atingir o teor crítico (Jin et al., 2017) de forma a despassivar o aço.

A maioria das normas fixam os teores de íons Cl^- permitidos em relação à massa de cimento. Embora seja um ponto bastante polêmico o valor de 0,4% em relação à massa de cimento é um consenso na maioria das normas (Casado, 1997). A norma NP EN 206, por exemplo, adota o valor de 0,4% (Silva, 2017) e a ABNT NBR 12655 (2006) estabelece 0,15 % nas condições de serviço da estrutura.

Além disso, ao romper os corpos de prova, foi possível confirmar a presença do produto de corrosão ao redor das barras do sensor, mas não ao redor da parte exposta das barras principais (6 cm de cobrimento). É necessário destacar que os extremos das barras principais foram protegidos com fita isolante na cor cinza, de forma com que ficasse exposto somente 60 mm da barra, o mesmo comprimento dos ânodos do sensor, como mostra a Figura 3(a).

4. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência de um sensor galvânico de múltiplos eletrodos no monitoramento da corrosão de prismas armados de concreto, comparando com métodos eletroquímicos convencionais e com a profundidade de penetração de cloretos. Como principais conclusões do estudo, pode-se citar:

- A relação a/c não influenciou nos ensaios, sendo o cobrimento o fator que exerceu maior influência.
- O potencial de circuito aberto e o potencial do par indicaram estado ativo de corrosão nos ânodos dos sensores (1,5 e 2,5 cm) antes que nas barras principais (6 cm).
- Para efeitos desta pesquisa, 20 mV/min. é o valor de potencial do par (E_{par}), que caracteriza o par galvânico de aço carbono-cobre testado. Enquanto o patamar de 200 mV/min. aparenta indicar a mudança para o estado ativo.
- A corrente galvânica apresentou pouca variação ao longo do tempo, com comportamento capacitivo durante os 150 dias de monitoramento.
- A frente de penetração chegou a uma profundidade maior do que 7 cm, atingindo as barras principais (6 cm). Por este motivo, os ensaios indicaram uma tendência de a barra entrar na zona de incerteza até que sejam atingidas concentrações suficientes de cloretos para despassivar a armadura e iniciar a corrosão.
- O sensor desenvolvido apresentou sensibilidade para detectar a frente de cloretos e prever a possibilidade de corrosão das armaduras. Sendo ainda necessários ajustes como acompanhar o comportamento do potencial do par (E_{par}) e do potencial de corrosão (E_{corr}) em um meio livre de agentes agressivos até que o E_{par} estabilize. Considera-se que os parâmetros E_{corr} , E_{par} e I_{gal} se comportam de formas distintas como parâmetros de monitoramento da corrosão.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (LAME-DCC-UFPR), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC-UFPR), ao Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC-UFPR), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Agência Nacional de Águas (ANA) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. REFERÊNCIA

- American concrete institute (ACI) (2014). ACI 318-14: *Building Code Requirements for Structural Concrete*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1980). NBR 6118: *Projeto e execução de obras de concreto armado*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2006). NBR 12655: *Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2014). NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003). NM 248: *Agregados - Determinação da composição granulométrica*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2009). NBR 7211: *Agregados para concreto – Especificação*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003). NM 52: *Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003). NM 53: *Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1992). NBR 7223: *Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003). NBR 5738: *Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2018). NBR 5739: *Concreto — Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2018). NBR 16697: *Cimento Portland - Requisitos*.
- ASTM Internacional. (2015). ASTM C876 – 15 *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Edição atual aprovada em 1 de novembro de 2015. Publicado em abril de 2016. Originalmente aprovado em 1977. Última edição anterior aprovada em 2009 como C876-09. doi: <https://doi.org/10.1520/C0876-15>
- NT BUILD 492 (2000), *Non-Steady State Chloride Migration (Diffusion Coefficient)*.
- Araújo, A., Panossian, Z., Portella, P. D., Bäessler, R. (2013), Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto: sensor galvânico. *Revista Técnica*. Edição 194. Maio/2013. Link: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/194/artigo294083-1.aspx>
- Andrade, C., Figueiras, H., Félix, C., Coutinho, J. S. (2008), “Desempenho do kit-sensor de corrosão na monitorização da durabilidade de estruturas de betão”, in: Anais do Encontro Nacional Betão Estruturas - BE2008. Guimarães. 5, 6, 7 de novembro de 2008.
- Angst, U., Buchler, M. (2015), On the applicability of the Stern–Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion. *Materials and Corrosion*. 66(10). doi: <https://doi.org/10.1002/maco.201407997>

- Akimov, G. V. (1957), “*Théorie et Méthodes d’Essais de la Corrosion des Métaux*”. Dunod. Paris. p 53.
- Baltazar, M., Almeraya, F., Nieves, D., Borunda, A., Maldonado, E., Ortiz, A. (2007). *Corrosión del acero inoxidable 304 como refuerzo en concreto expuesto a cloruros y sulfatos*. Scientia Et Technica, XIII (36),353-357. Acesso em: 17 de Julio de 2021. ISSN: 0122-1701. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84903663>
- Brandão, A. M. S.; Pinheiro, L. M. (1999), *Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto*. Cadernos de Engenharia de Estruturas. n.8. EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1999.
- BioLogic Science Instruments (2011), EC-LAB Software: Techniques and Applications. Version 10.1x. Fevereiro, Disponível em: <https://www.egr.msu.edu/~scb-group-web/blog/wp-content/uploads/2012/07/EC-Lab-software-Techniques-and-Applications-manual.pdf>
- Cheng, Y., Asad H., Chen, E., Ma, G., Li, Z. (2018), *Simulation of a novel capacitive sensor for rebar corrosion detection*. Construction and Building Materials. 174: 613–624. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.133>
- Chen, Y., Tang, F., Tang, Y., O’Keefe, M. J., Chena, G. (2017), *Mechanism and sensitivity of Fe-C coated long period fiber grating sensors for steel corrosion monitoring of RC structures*. Corrosion Science. 127: 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.08.021>
- Calvo Valdés, A., Farias Medeiros, M. H., de Jesus Roque, P. (2017). *Sensores de corrosão para monitoramento de pontes e viadutos de concreto armado. Primeira etapa – Testes em solução aquosa*. Revista De Engenharia E Pesquisa Aplicada, 2(3). <https://doi.org/10.25286/repa.v2i3.689>
- Calvo Valdés, A. (2018), “*Sensores de corrosão para monitoramento de pontes e viadutos de concreto armado*”. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação de Engenharia de Construção Civil – PPGCEC. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba.
- Cascudo, O. (1997), “*O controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas*”. Capítulo 2: Corrosão de armaduras em concreto. p 39-61. Capítulo 8: Potenciais de corrosão p 137-153. Primeira versão 1997.
- Capraro, A. P. B., Gervasio, S., Medeiros, M. H. F., Hoppe Filho, J., Braganca, M., Oliveira, I. (2016), “*Avaliação dos mecanismos de corrosão de concretos contaminados com diferentes teores de pirita (FeS₂)*”, in: Anais do 58o Congresso Brasileiro de Concreto (58o CBC 2016). Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. Belo Horizonte/MG, 1–16.
- Capraro, A. P. B., Macioski, G., Medeiros, M. H. F. (2021), *Effect of aggregate contamination with pyrite on reinforcement corrosion in concrete*. Engineering Failure Analysis. 120: 1350-6307. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105116>
- Crauss, C. (2010), “*Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial*”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Maria. 31 de agosto de 2010.
- De Lacerda, M. M., Müller, R. (2015), *Uso de sensor de taxa de corrosão instantânea como técnica de monitoramento da corrosão em estruturas de concreto*. Obra24horas. Acesso em: novembro / 2015. Disponível em: <https://www.obra24horas.com.br/artigos/concreto/uso-do-sensor-de-taxa-de-corrosao-instatanea-como-tecnica-de-monitoramento-da-corrosao-em-estruturas-de-concreto>
- De Lima, Ma. G., Morelli, F. (2004), “*Caracterização da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto*”. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP. p 1-20 2004. Disponível em: https://semengo.furg.br/images/2004/07_2004.pdf
- Dotto, J. M. R (2006), “*Corrosão do aço induzida por íons cloreto – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana*”. Dissertação (Doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

- Dong, S.-G., Lin, C.-J., Hu, R.-G., Li, L.-Q., Du, R.-G. (2011), *Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor*. *Electrochimica Acta*. 56(4): 1881–1888. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.08.089>
- Freire, K. R. R (2005), “*Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto*”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em engenharia de construção civil – PPGCEC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2005.
- França, Clério Bezerra (2011), “*Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata*”. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Católica de Pernambuco. Pró -Reitoria Acadêmica- PRAC.
- Fernandes, K. V., Martenda, P. C. (2015), *Por que os metais sofrem corrosão?* Engenheiro de Materiais. Acesso em: novembro 2015. Disponível em: <http://engenheirodemateriais.com.br/tag/pilha-galvanica/>
- Figueiredo, E. J P., Meira, G. R. (2013), *Boletim Técnico: Corrosão das armaduras de concreto*. Boletín No. 6, Associação Latinoamericana de Controle da qualidade, Patologia e Recuperação da Construção. ALCONPAT Internacional.
- Federal Highway Administration (FHA) (2011). *U.S. Government of Transportation. Bridge preservation guide*. August 2011.
- Feliú, S., González, J. A., Feliú Jr., S., Andrade, M. C. (1990), *Confinement of the electrical signal or in-situ measurement of polarization resistance in reinforced concrete*. *ACI Materials Journal*. 87 (5):457.
- Frota, W.D.S.; Martins, E. R.; Valerio, P. P. (2018), *Avaliação da difusão de íons cloreto considerando concreto simples constituído por três principais classes de cimento portland convencional*. *Sodebras Journal*. 13(151): 99-113. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12429.64486>
- Godinho, J. P., Oliveira, R. L. N., Capraro, A. P. B., Réus, G. C., Medeiros, M. H. F. (2018), “*Influência das condições de limpeza de barras de aço carbono do concreto armado nas leituras eletroquímicas de densidade de corrente de corrosão e potencial de corrosão*”, in: *Anais do 3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto (3º DEGRADA)*, São Carlos/SP, 77–92.
- Godinho, J. P., Zermiani, B. N., Oliveira, R. L. N., Medeiros, M. H. F. (2019), *Comportamento eletroquímico do aço carbono inserido no concreto durante a passivação*. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*. ISSN 2358-5420 –Edição Especial – Setembro de 2019, 1 - 16.
- Gurdián, H.; García-Alcocel, E.; Baeza-Brotons, F.; Garcés, P.; Zornoza, E. (2014), *Corrosion behavior of steel reinforcement in concrete with recycled aggregates, fly ash and spent cracking catalyst*. *Materials (Basel)*. 7(4), 3176-3197. doi: <https://doi.org/10.3390/ma7043176>
- Gentil, V. (1996), “*Corrosão*”. 3a Edição. Rio de Janeiro. Editora LTC. Capítulo 3: “Potencial de eletrodo”. p 14 – 28.
- Ghods, P., Isgor, O. B., McRae, G. A., Gub, G. P. (2010), *Electrochemical investigation of chloride-induced depassivation of black Steel rebar under simulated service conditions*. *Corrosion Science*. 52(5): 1649–1659. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.02.016>
- Ghods, P., Isgor, O. B., McRae, G., Miller, T. (2009), *The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement*. *Cement and Concrete Composites*. 31(1): 2–11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.003>
- Hays, G. F. (2020), *Now is the Time*. Director General da World Corrosion Organization. Acesso em: dezembro de 2020. Disponível em: http://corrosion.org/Corrosion+Resources/Publications/_nowisthetime.pdf

- Pei, H., Li, Z., Zhang, J., Wang, Q. (2015), *Performance investigations of reinforced magnesium phosphate concrete beams under accelerated corrosion conditions by multi techniques*. Construction Building Materials. 93: 982-994. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.057>
- Hernández, Y., Troconis de Rincón, O., Torres, A., Delgado, S., Rodríguez, J., Morón, O. (2016). *Relación entre la velocidad de corrosión de la armadura y el ancho de fisuras en vigas de concreto armado expuestas a ambientes que simulan el medio marino*. Revista ALCONPAT, 6(3), 272 - 283. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i3.152>
- Institut Für Seltene Erden und Strategische Metalle (ISE) (2020), *Preços, ocorrência, extração e uso do Titan*. Acesso em: dezembro de 2020. Disponível em: <https://pt.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/titan/>
- Inaudi, D. (2009), “*Integrated Structural Health Monitoring Systems for Bridges*”. in: Anais do 1o Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP'09. Lisboa. 2009.
- Jucá, T. R. P. (2002), “*Avaliação de Cloretos Livres em Concretos e Argamassas de Cimento Portland pelo Método de Aspersão de Nitrato de Prata*”. Universidade Federal de Goiás. Escola Engenharia Civil II.
- Jin, M., Jiang, L., Zhu, Q. (2017), *Monitoring chloride ion penetration in concrete with different mineral admixtures based on embedded chloride ion selective electrodes*. Construction Building Materials. 143: 1-5. 15 julho, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.131>
- Jiang, J. -Y., Wang, D., Chu, H. -Y., Ma, H., Liu, Y., Gao, Y., Shi, J., Sun, W. (2017), *The passive film growth mechanism of new corrosion-resistant steel rebar in simulated concrete pore solution: Nanometer structure and electrochemical study*. Materials (Basel). 10(4): 412. doi: <https://doi.org/10.3390/ma10040412>
- Klassen, R. D., Roberge, P. R. (2008), “*Technique for corrosion monitoring*”. Capítulo 5: Zero resistance ammetry and galvanic sensor. p 111-124.
- Leek, D. S. (1991), *The Passivity of Steel in Concrete*. Quarterly Journal of Engineering Geology. 24:55–66. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1991.024.01.05>
- Lv, H., Zhao, X., Zhan, Y., Gong, P. (2017), *Damage evaluation of concrete based on Brillouin corrosion expansion sensor*, Construction and Building Materials, 143: 387-394, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.122>
- Mccarter, W. J., Vennesland, Ø. (2004), *Sensor systems for use in reinforced concrete structures*. Construction and Building Materials. 18(6): 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.008>
- Medeiros, M. H. F. (2008), “*Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente a ação de íons cloretos*”. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. 2008.
- Medeiros, M. H. F., de Oliveira Andrade, J. J., Helene, P. (2011), “*Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto*”. Capítulo 22, Concreto: Ciência e Tecnologia, Geraldo Cechella Isaia (Editor), © 2011 IBRACON. URL: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf>
- Medeiros, M. H. F., Rocha, F. C., Medeiros-Junior, R. A., Helene, P. (2017), *Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover*, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais (RIEM). 10 (4):864–885. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000400005>
- Torres-Luque, M., Bastidas-Arteaga, E., Schoefs, F., Sánchez Silva, M., Osma, J. F. (2014), *Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges*. Construction and Building Materials. 68:68-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.009>
- Marcondes, C. G. N. (2012), “*Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas*”. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – PPGECC. 2012.

- Meira, G. R. (2017), “*Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto - fundamentos, diagnóstico e prevenção*”. 1ª edição, editora do IFPB, João Pessoa-PB, 2017.
- Macioski, G., de Souza, D. J., Capraro Brandão, A. P., de Medeiros, M. H. F. (2016). *Análisis de la corrosión de barras de acero en función de la variación del pH del medio*. Revista ALCONPAT, 6(3), 223 - 234. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i3.153>
- Mota, A. C. M. (2011), “*Avaliação da presença de cloretos livres em argamassas através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata*”. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Martínez, I., Andrade, C. (2009), *Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures*. Cement and Concrete Composites, 31(8): 545–554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.007>
- Nahali, H., Dhouibi, L., Idrissi, H. (2014), *Effect of phosphate based inhibitor on the threshold chloride to initiate steel corrosion in saturated hydroxide solution*. Construction and Building Materials. 50: 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.054>
- Pérez López, T., Sosa, M. R., Moo-Yam, V. M. J., Chávez, E., Pérez-Quiroz, J. T. (2018). *Análisis de la interfaz concreto-acero en especímenes expuestos a la intemperie e inmersos en agua de mar natural*. Revista ALCONPAT, 8(1), 16 - 29. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.203>
- Pereira, E. V., Salta, M. M. (2012), “*Monitorização permanente da corrosão em estruturas de betão armado*”. Resultados a longo prazo”, in: Anais do Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012. FEUP, 24-26 de outubro de 2012.
- Pereira, E. V., Figueira, R. B., Salta, M. M. L., Da Fonseca, I. T. E. (2009), *A Galvanic Sensor for Monitoring the Corrosion Condition of the Concrete Reinforcing Steel: Relationship Between the Galvanic and the Corrosion Currents*. Journal of Sensor. 9(11): 8391-8398. doi: <https://doi.org/10.3390/s91108391>; ISSN 1424-8220. 2009.
- Pawlick, L. A., Stoner, G. E., Clemeña, G. G. (1998), *Development of an embeddable reference electrode for reinforced concrete structures*. Contract Research Sponsored by Virginia Transportation Research Council. URL: https://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/99-cr1.pdf
- Park, Z.-T., Choi, Y.-S., Kim, J.-G., Chung, L. (2005), *Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structure. Part 2. Laboratory electrochemical testing of sensors in concrete*. Cement and Concrete Research. 35(9): 1814–1819. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.027>
- Pontes, C. V., Réus, G. C., Araújo, E.C., Medeiros, M. H. F. (2020), *Silver nitrate colorimetric method to detect chloride penetration in carbonated concrete: How to prevent false positives*. Journal of Building Engineering. (34): 101860. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101860>
- Poursae, A. (2016), *Corrosion of Steel in Concrete Structures*. Elsevier, 1st Edition. Amsterdã, Holanda, 2016.
- Pereira, V. G. A. (2001), “*Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura*”. Dissertação de mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Rio Grande do Sul.
- Real, L. V., Oliveira, D. R. B., Soares, T., Medeiros, M. H. F. (2015). *Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte*. Revista ALCONPAT, 5(2), 149 - 159. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Romano, P., Brito, P. S. D., Rodrigues, L. (2013), *Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions*. Construction and Building Materials. 47: 827–832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.042>
- Ribeiro, V. D., Cunha, T. M. P. (2014), “*Corrosão em Estruturas de Concreto Armado*”. Capítulo 8: Técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado, p 215.

Ribeiro, D. V., Helene, P., Cascudo, O., Tutikian, B. F., Sales, A., Souza, C. A. C., Cunha, M. P. T., Lourenco, M. Z., Almeida, F. C. R. (2018), “*Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção*”. 2a, Elsevier Brasil, Rio de Janeiro-RJ, 2018.

Rocha, F. C. (2012), “*Leituras de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado: influência da relação água / cimento, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobertura e do teor de umidade do concreto*”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em engenharia de construção civil – PPGCEC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2012.

Rocha, F., Campos, H., de Andrade, T. S., Roquitski, A., Medeiros, M. H. (2014). *Influência da espessura de cobertura e da contaminação por cloretos nas leituras de potencial de corrosão de armaduras*. REEC - Revista Eletrônica De Engenharia Civil, 8(2). <https://doi.org/10.5216/reec.v8i2.26968>

Raupach M., Schießl, P. (2001), *Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures*. NDT & E International. 34(6): 435-442. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00011-1)

Ribeiro, D. V., Souza, C. A. C., Abrantes, J. C. C. (2015), *Uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para monitoramento da corrosão em concreto armado*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 8 (4): 529-546. Agosto 2015. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000400007>

Sousa, C. D. C. A. (2014), “*Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*”. Capítulo 2: Princípios da corrosão eletroquímica., p 13-34.

Silva, P. N. R. (2017), *Ataque em estruturas de concreto por ação de cloretos*. Acesso em: dezembro 2017. Disponível em: <https://www.axfiber.com.br/single-post/2017/01/12/ataque-em-estruturas-de-concreto-por-a%C3%A7%C3%A3o-de-cloretos>

Silva, E. P. (2010), “*Avaliação do potencial de corrosão de concretos estruturais produzidos segundo as prescrições da NBR 6118, submetido a ensaio de corrosão acelerado*”. Dissertação (Graduação) -Curso de Engenharia Estrutural e Construção Civil de Fortaleza. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza 2010.

Santos, L. O. (2014), “*Monitoramento e ensaio de Pontes*”. in: Anais do Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro. p 1-14. 21-23 de Maio del 2014.

Wu, L., Li, W., Yu, X. (2017), *Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments*. Construction and Building Materials. 152: 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.016>

Williamson, J., Isgor, O. B. (2016), *The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar*. Corrosion Science. 106: 82–95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.01.027>

Zhang, J., Lui, C., Sun, M., Li, Z. (2017). *An innovative corrosion evaluation technique for reinforced concrete structures using magnetic sensors*. Construction and Building Materials. 135: 68-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.157>

Zoghi, M. (2013), “*The International Handbook of FRP composites in civil engineering*”. 1st Edition. CRC Press. ISBN 9780849320132. September 26, 2013. Acesso: Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.crcpress.com/TheInternational-Handbook-of-FRP-CompositesinCivilEngineering/Zoghi/p/book/9780849320132>