

Comparação entre sensores galvânicos e potenciais de corrosão para monitoramento do risco de corrosão de armaduras de aço em estruturas de concreto

J. L. Pérez-Díaz^{1*} , J. A. Cabrera-Madrid¹ , D. Hernández Cruz¹ ,
E. A. Godínez-Domínguez¹ , M. D. Mundo Molina¹

*Contato Autor: jose.perez@unach.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.620>

Recepção: 24/06/2022 | Aceitação: 29/08/2022 | Publicação: 01/09/2022

RESUMO

O risco devido à corrosão do aço foi avaliado, usando sensores galvânicos internos de carbono/aço inoxidável e eletrodo externo de Cu/CuSO₄. Os sensores foram utilizados para monitorar os potenciais e correntes de macrocélulas de corpos prismáticos de concreto armado, com relações água-cimento de 0,40 e 0,60, imersos em solução de NaCl a 5% por 18 meses. Os dois potenciais resultados mostrarão uma boa correlação entre os dois eletrodos de referência, podendo avaliar a corrosão do sistema. Além disso, a técnica de ruído eletroquímico se mostrou efetiva para o caso de íons cloreto. Portanto, sensores galvânicos podem ser considerados como úteis à implementação e monitoramento da avaliação do estado do risco de corrosão em estruturas de concreto armado.

Palavras-chave: aço reforçado; concreto reforçado; potencial de corrosão; macrocélula; sensor galvânico.

Citar como: Pérez, J. L., Cabrera, J. A., Hernández, D., Godínez, E. A., Mundo, M. D. (2022), “Comparação entre sensores galvânicos e potenciais de corrosão para monitoramento do risco de corrosão de armaduras de aço em estruturas de concreto”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 378 – 400, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.620>

¹ Faculdade de Engenharia, Universidade Autônoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor J. L. Pérez-Díaz contribuiu com a concepção da pesquisa e a realização de ensaios laboratoriais (100%), redação do texto (70%), análise e discussão dos resultados (60%) e revisão (50%). O autor JA Cabrera-Madrid contribuiu com a redação do texto (15%), análise e discussão dos resultados (15%) e revisão (15%). O autor D. Hernández Cruz contribuiu com a redação do texto (15%), análise e discussão dos resultados (15%) e revisão (15%). O autor EA Godínez-Domínguez contribuiu com a análise e discussão dos resultados (10%) e revisão (10%). O autor MD Mundo Molina com a revisão de 10%.

Licença Creative Commons

Os direitos autorais (2022) são de propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-lançamento

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada na terceira edição do ano de 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento da segunda edição do ano de 2023.

Comparison between galvanic sensors (steel/stainless steel) and half cell potentials (Ecorr) for monitoring the corrosion risk of steel reinforcement in concrete structures

ABSTRACT

The corrosion risk of steel in concrete was assessed using internal galvanic carbon/stainless steel sensors and the external Cu/CuSO₄ electrode. The sensors were used to monitor the macrocell potentials and currents of reinforced concrete prismatic specimens, with water to cement ratios of 0.4 and 0.6, immersed in 5% NaCl solution, for 18 months. The results of the potentials showed a good correlation between the two reference electrodes, being able to evaluate the corrosion of the system. In addition, the electrochemical noise technique supports observations of the effect of chloride ions. Therefore, galvanic sensors can be considered for implementation in the monitoring and evaluation of corrosion risk of reinforced concrete structures.

Keywords: corrosion rate; reinforced concrete; corrosion potential; microcell; galvanic sensor.

Comparativa entre sensores galvânicos y potenciales de corrosin para el monitoreo del riesgo por corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto

RESUMEN

Se evaluó el riesgo por corrosión del acero en concreto, utilizando sensores galvnicos internos de acero al carbono/acero inoxidable y un electrodo externo de Cu/CuSO₄. Los sensores se utilizaron para monitorear los potenciales y corrientes de macrocelda de probetas prismáticas de concreto reforzado con relaciones agua-cemento de 0.4 y 0.6, inmersas en solución de NaCl al 5% durante 18 meses. Los resultados de los potenciales mostraron buena correlación entre los dos electrodos de referencia, pudiendo evaluar la corrosión del sistema. Además, la técnica de ruido electroquímico respalda el efecto por iones cloruro. Por lo tanto, los sensores galvnicos pueden considerarse para su implementación en el monitoreo y evaluación del estado de riesgo por corrosión en estructuras de concreto reforzado

Palabras clave: acero de refuerzo; concreto reforzado; potencial de corrosión; macrocelda; sensor galvnico

Informan legal

A Revista ALCONPAT  uma publican quadrimestral da Associan Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperan da Construn, Internacional, AC, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, CP 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Site: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo n 04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualizan desta edin, Unidade de Tecnologia da Informan da ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores n refletem necessariamente a posin do editor.

A reprodun total ou parcial dos conteúdos e imagens da publican  realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras devido à presença de cloretos no concreto gera a deterioração das estruturas expostas a ambientes salinos, colocando em risco sua funcionalidade e segurança, reduzindo a durabilidade esperada. Isso causa custos consideráveis de inspeção e manutenção ou, em muitos casos, o risco de perda total da estrutura. Sensores galvânicos têm sido utilizados desde 1990 como método preventivo contra o ataque de agentes agressivos (Schiessl e Raupach, 1992). Principalmente para uma grande variedade de estruturas marítimas, onde a atuação desses sensores (par galvânico) pode detectar o momento em que a armadura despassiva e a corrosão é ativada pela presença de agentes agressivos. Sensores de macrocélulas de corrosão (Raupach, 1996) têm monitorado o risco de corrosão do aço da armadura, estrategicamente posicionados na área livre de cobrimento e áreas de difícil acesso, melhorando a previsão de vida útil ou ampliando o alcance do conhecimento de durabilidade existente (Raupach e Dauberschmidt, 2003), como complemento a outros sistemas de proteção. No entanto, ainda faltam avaliações e resultados com aplicações práticas utilizando outros tipos de materiais, sob diferentes condições de estudo, e onde possam ser esperados valores limites relevantes (Raupach e Schießl, 2001; McCarter et al., 2001). A corrosão galvânica é conhecida como corrosão de macrocélulas, os potenciais e correntes são medidos a partir da atividade entre um ânodo corrosivo e um cátodo passivo, onde ocorrerá a redução (Figura 1). A corrente registrada é uma medida da parte da corrosão causada pelo processo de redução catódica, não considerando a própria corrosão anódica (McCarter e Vennesland, 2004).

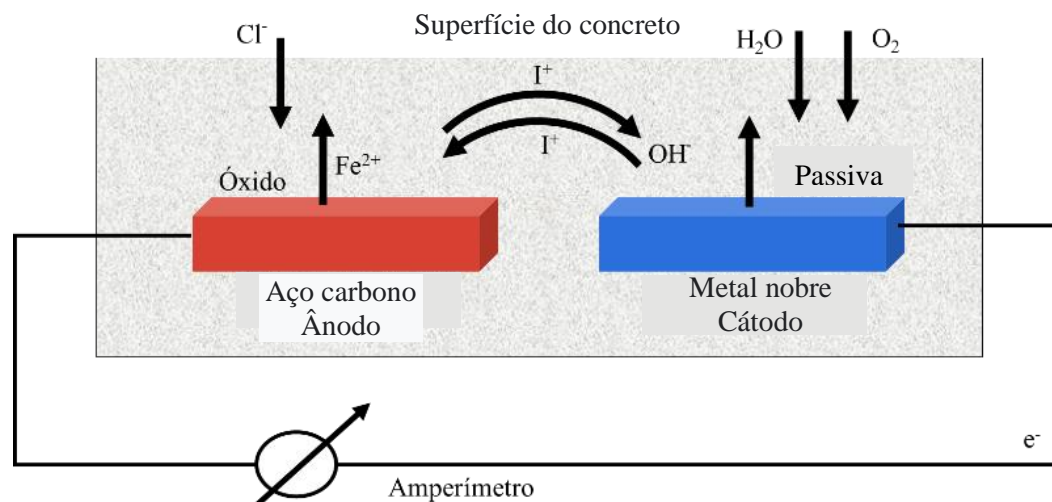


Figura 1. Esquema de Macro célula de Corrosão

Para que ocorra a corrosão eletroquímica do aço no concreto, devem ocorrer processos de oxidação e redução, onde as principais reações (equações 1, 2) são as seguintes:



O processo de corrosão no ânodo envolve ambas as reações, mas neste caso a corrente anódica é maior que a corrente catódica. No cátodo, a corrente catódica é maior que a corrente anódica, que forma a macrocélula de corrosão.

Muitos são os fatores que influenciam o funcionamento de uma macrocélula de corrosão no concreto, como o dimensionamento na forma geométrica e o tamanho dos sensores, a posição dentro da zona de cobrimento, bem como a separação entre ânodos e cátodos podem causar o

aumento ou diminuição dos valores da corrente galvânica (Arya e Vassie, 1995). Neste estudo, foram examinados os fatores influenciadores no sinal de corrente da macrocélula, tais como: a razão da área ânodo/cátodo, as distâncias de separação dentro das sondas e a altura em relação ao nível de imersão (posição vertical das sondas). Variáveis como a qualidade do concreto, espessura da área livre do cobrimento de armadura, monitoramento de potenciais e correntes de macrocélulas dos eletrodos sensores, foram consideradas para determinar o mecanismo de corrosão do sistema (Raupach e Dauberschmidt, 2003). Além disso, avaliar se a técnica de sensores galvânicos macrocélulas baseados em aço inoxidável 304 pode ser utilizada como método alternativo de monitoramento para detectar o risco de corrosão dentro do concreto. O aço inoxidável 304 foi utilizado por representar um material econômico para todos os fins, resistente à corrosão, com excelente resistência e ductilidade. Da mesma forma, embutido no concreto e colocado próximo ao aço da armadura, pode funcionar como um sistema de detecção interna na área livre de cobrimento. Tendo as características exigidas de um sensor resistente e de fácil implementação (Llorens et al., 2019), embora com uma relação de área exposta ânodo/cátodo diferente (sensor galvânico: aço carbono/aço inoxidável) e com diferentes condições de ensaio (ambiente submerso). A área livre de cobrimento também foi avaliada, onde a função útil do sensor é exposta para monitorar seu comportamento devido à corrosão na presença de íons cloreto, que entram no concreto a partir da solução de NaCl a 5% em peso em relação à água.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais para dosagem de concreto

Foram utilizadas duas dosagens de concreto preparadas de acordo com a NMX C155 (2014); com cimento Portland comum CPO 30R (NMX C414, 2004), brita com tamanho máximo de agregado de 19 mm (3/4”), agregado miúdo com módulo de finura de 2,71, água potável e relação água/cimento (a/c) de 0,60 e 0,40. Os corpos de prova de concreto foram curados em água por 28 dias de acordo com (NMX-C-159-ONNCCE-2004). Os dados de dosagem mostrados na Tabela 1 foram obtidos usando o método ACI-211.1 (American Concrete Institute, 2002).

Tabela 1. Dosagem de concreto ((kg/m³ concreto) /proporção)

Traço	Cimento	Água	Cascalho	Areia	Aditivo
a/c 0,60	324	209	1035	765	Sem aditivos
a/c 0,40	513	209	1035	606	Sem aditivos

2.2 Configuração dos corpos de prova prismáticos

Foram confeccionados 16 corpos de prova prismáticos com dimensões de 17 x 20 x 30 cm; como armadura, foi utilizada uma configuração de 10 x 15 cm com hastes de aço carbono de 9,5 mm (3/8”) de diâmetro e estribos de 6,35 mm (1/4”) fixados com arame. Em cada corpo de prova, dois sensores foram colocados próximos ao aço da armadura conforme mostrado na Figura 2. Os ânodos foram colocados em faces opostas dos corpos de prova: na face 1 o ânodo A1 e na face 2 o ânodo A2, a uma profundidade de 8 cm e 22 cm no sentido longitudinal, em relação ao nível da água (NA) ou 5 % de solução de NaCl (NS). Foi deixada uma cobertura livre para o sensor de 3 cm, e a cobertura livre para as hastes da armadura nas faces expostas à penetração de cloreto foi de 3,5 cm. A área das faces expostas aos cloretos foi de 20 x 30 cm, enquanto as faces laterais dos corpos de prova (17 x 20 cm e 17 x 30 cm) foram cobertas com nata de cimento e impermeabilizante asfáltico à base de solvente, para restringir a penetração de cloretos (Figura 2).

Para identificação dos tubos de ensaio, eles foram rotulados com a sigla AP143, que corresponde ao número do tubo de ensaio 1 exposto em água potável (AP1), relação água/cimento de 0,40

(número 4) e armadura de aço de 9,5 mm (3/ 8") (número 3). As etiquetas SM563 referem-se à amostra número 5 exposta em salmoura (SM5), proporção água/cimento de 0,60 (número 6) e aço da armadura de 3/8" (9,5 mm) (número 3).

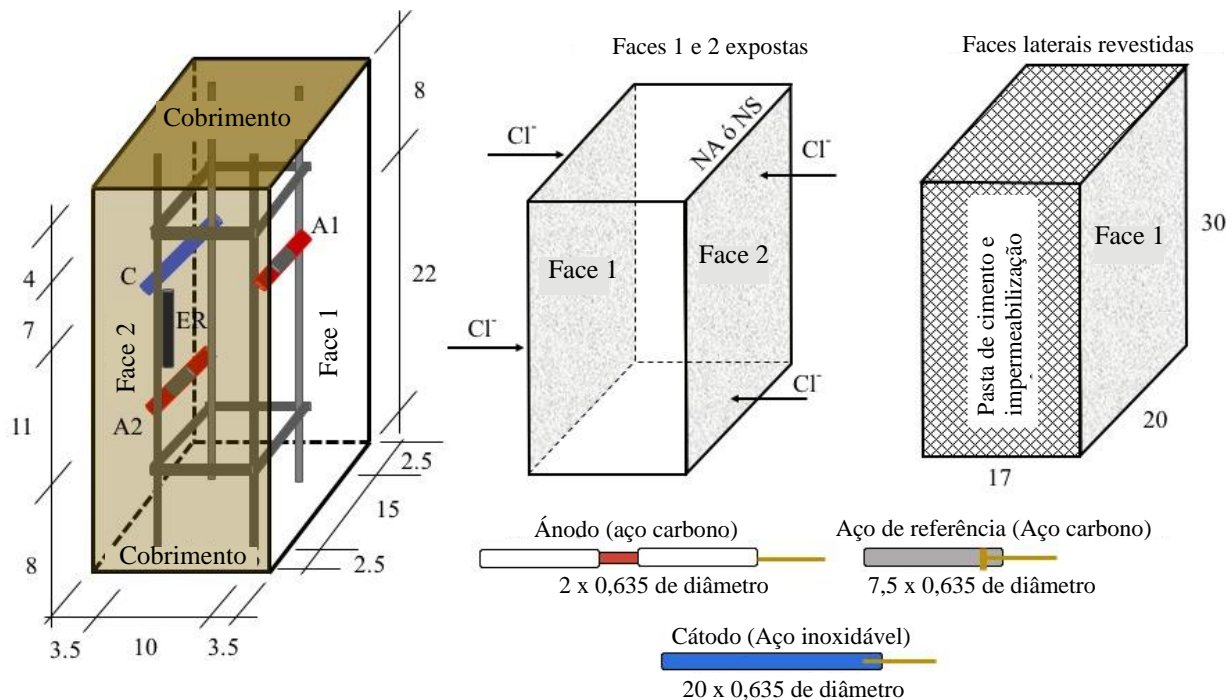


Figura 2. Diagrama dos corpos de prova de concreto armado e sensores galvânicos embutidos.

2.3 Sistema de sensores

Os sensores foram projetados como uma célula galvânica, composta por eletrodos de aço carbono (ânodos "A") e de aço inoxidável (cátodos "C"), que foram isolados da armadura por meio de mangueiras industriais. O aço de referência (AR) foi deixado em contato elétrico com a armadura. Foi utilizado fio de cobre para as conexões entre os eletrodos (Figura 3), deixando extensões para fora da barra para fechar o circuito elétrico e obter as medidas por meio de sinais elétricos. Deve-se notar que devido ao diâmetro do fio de cobre em relação ao dos eletrodos, não foi considerado um efeito representativo nos valores monitorados durante o tempo de ensaio. O sensor foi preso à armadura usando laços de plástico. A razão ânodo/área do cátodo foi de 1:10, correspondendo a 4 cm² para cada ânodo e 40 cm² para o cátodo. A área do cátodo maior que o ânodo foi utilizada para evitar baixas correntes galvânicas, principalmente para eletrodos de aço inoxidável; uma vez que uma quantidade semelhante de área entre o ânodo e o cátodo teria pouca eficácia na detecção de danos de corrosão do aço no concreto (Zinc-Taek et al., 2005).

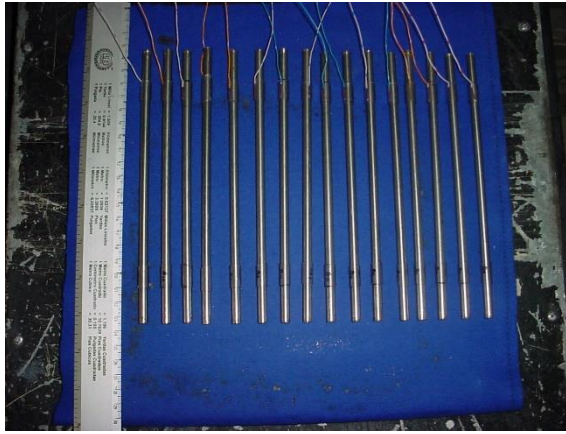


Figura 3. Cátodos de aço inoxidável tipo 304 com conexão de fio de cobre, fixados com mangueira industrial

Foi utilizado aço AISI-SAE 1020 (UNS G10200) como ânodo, da mesma composição da armadura; e aço inoxidável austenítico tipo 304 (UNS S30400) como cátodo (Tabela 2) (AISI-SAE, 1983; Hudok, 1990).

A análise da composição química elementar do sensor foi realizada com amostras de 3,0 g extraídas do material anódico e catódico. A digestão ácida foi realizada em micro-ondas (marca CEM modelo MDS-200), aplicando-se o método Still. 0,5 g de cada amostra foi preparado com HCl, HNO₃, HF e HBO₃. Para análise elementar, foram utilizadas as técnicas de Espectrometria de Emissão de Plasma (ICP-OES, modelo IRIS-AP), Espectrofotometria de Absorção Atômica (modelo FAA AVANTA SIGMA) e Analisador Elemental (modelo EA-1110) (PROCEDIMENTO LAQ03, 2005). Os resultados da análise são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química elementar do aço para os sensores e a referência

Elementos (%) peso	Cr	Ni	C	Mn	Si	S	P	Fe	Cu	Mo	Co
Aço carbono 1020	0,041	0,027	0,198	0,429	----	0,021	0,02	bal.	0,021	----	0,014
Aço inoxidável 304	17,864	7,719	0,072	2,003	0,484	0,032	0,045	bal.	0,356	0,595	0,101

2.4 Exposição e monitoramento com técnicas eletroquímicas

Os corpos de prova prismáticos foram expostos por 18 meses em imersão em dois ambientes: em água potável (AP) e em solução de NaCl a 5% em peso em relação à água (salmoura "SM"). Durante a exposição, foi supervisionado que o mesmo nível de líquido fosse mantido e a solução fosse trocada a cada 3 meses. O mesmo número de corpos de prova com uma relação a/c de 0,60 e 0,40 foram expostos em AP e SM. A monitoração da tensão e corrente da macrocélula nos tubos de ensaio foi realizada por meio de um multímetro de alta impedância (FLUKE 87 III) através de um curto-circuito externo. Os potenciais de corrosão também foram medidos usando um eletrodo de referência externo de Cobre-Cobre Sulfato (Cu/CuSO₄) ou (CSC) (Figura 4).



Figura 4. Monitoramento com multímetro e eletrodo de referência Cu/CuSO₄

A técnica de ruído eletroquímico foi utilizada nos corpos de prova imersos em SM por 9 meses a partir do mês 10, devido à ativação dos corpos de prova de concreto de melhor qualidade ou mais densos nos meses 7, 8 e 9 expostos em solução de NaCl a 5% em peso em relação à água, para conhecer o efeito dos cloretos nos sensores (A1 e A2) e nas armaduras; utilizando um Potenciostato/Galvanostat SOLARTRON 1285. Esta técnica permite detectar e avaliar o comportamento da corrosão geral e localizada (Dawson, 1996), através das flutuações aleatórias do potencial ou da corrente do material sujeito à corrosão em relação ao tempo. Os resultados foram analisados visual e estatisticamente por meio do programa MATLAB. O arranjo do circuito para monitoramento é mostrado na Figura 5.

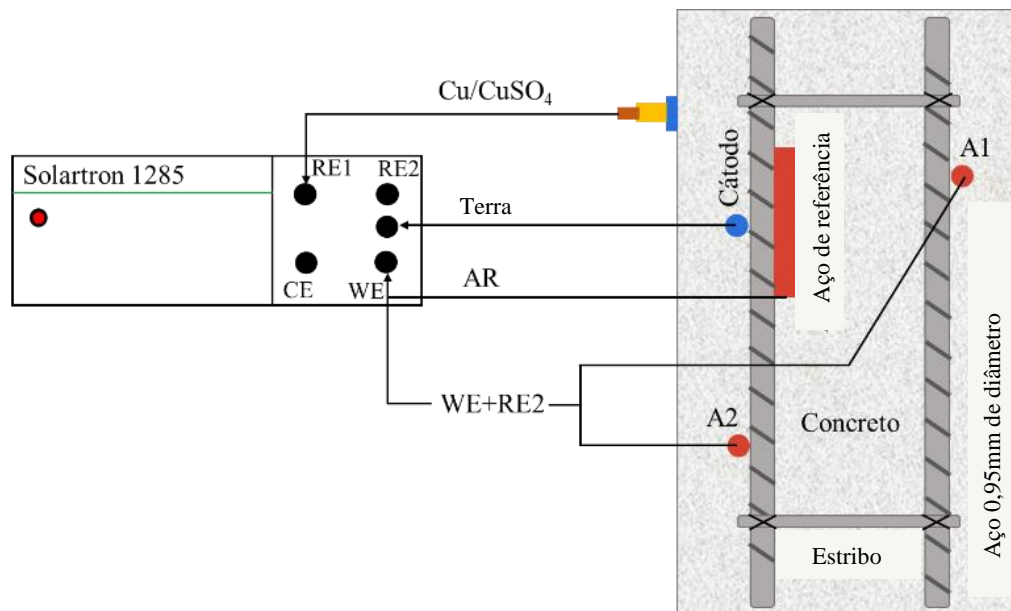


Figura 5. Diagrama para monitoramento de potencial e corrente ao longo do tempo

2.4.1 Monitoramento de potenciais e correntes

As tensões e correntes foram monitoradas individualmente para os ânodos A1 e A2, e, também, para o aço de referência (AR) em relação ao cátodo (Figura 6a). Assim, os potenciais de corrosão também foram medidos em relação ao eletrodo de referência Cu/CuSO₄, utilizando o aço de referência (AR), os ânodos (A1, A2) e o cátodo (C) como eletrodo de trabalho (Figura 6b).

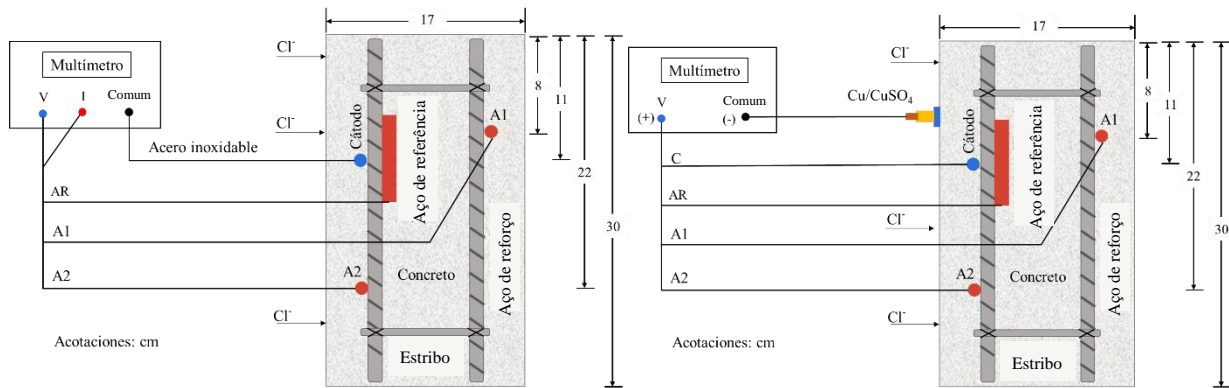


Figura 6a e 6b. Diagramas para monitorar tensões e correntes de macrocélulas e potenciais de corrosão

A análise das tensões das macrocélulas em relação ao aço inoxidável e os potenciais de corrosão em relação ao Cu/CuSO₄, foi realizada de acordo com os valores de referência da norma (ASTM C 876-91), estabelecendo uma equivalência de referência de ambos os eletrodos (aço inoxidável e Cu/CuSO₄) em relação ao eletrodo de hidrogênio normal (NHE) (Tabela 3). No entanto, a análise para a corrente da macrocélula foi realizada de acordo com as informações disponíveis na literatura, pois não existem valores padronizados dos níveis de corrente que indiquem o risco de corrosão para um sistema de concreto armado e sensores embutidos.

Tabela 3. Potenciais de corrosão vs Cu/CuSO₄ e sua equivalência para o aço inoxidável ASTM C 876-91.

Potenciais de corrosão (E _{corr}) (mV)	macrocélulas (V _{corr}) (mV)	Risco de dano (%)
Mais positivo que -200	Mais positivo que -95	10% de probabilidade de corrosão
Valores de -200 a -350	Valores de -95 a -166	Incerteza
Mais negativo que -350	Mais negativo que -166	90% de probabilidade de corrosão

2.5 Ensaios de cloreto

O teor de cloreto livre do concreto foi obtido a partir das amostras pulverizadas extraídas das áreas próximas aos ânodos e da armadura. Utilizando 30 g de amostra e seguindo o procedimento padrão (ASTM D 1411-99). As porcentagens de íons cloreto livres foram calculadas em relação ao peso de concreto e cimento, para o concreto com relação a/c de 0,40 e 0,60.

2.6 Ensaio de compressão simples

A resistência à compressão simples foi determinada após 28 dias de cura (NMX C159, 2004) de acordo com o procedimento ASTM C39-17 (ASTM International, 2017). Três corpos de prova cilíndricos de concreto de 15 cm de diâmetro por 30 cm de comprimento foram usados para cada relação a/c. A argamassa de enxofre foi usada para nivelar as seções transversais dos cilindros. O ensaio de compressão simples dos cilindros foi realizado com uma Prensa Hidráulica Elétrica Universal com capacidade de 120 Toneladas (Modelo ELVEC), equipada com bomba Modelo CT-715H. A velocidade de aplicação da carga foi de 5,3 kN/s, registrando a carga máxima até o colapso dos cilindros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Voltagens de macrocélulas

As tensões das macrocélulas dos ânodos A1, A2 e AR imersos nos corpos de prova com relação a/c de 0,40, e expostos em AP, foram superiores a -95mV , o que representa um baixo risco de corrosão (Figura 7). Para os ânodos A1, A2 e AR dos corpos de prova expostos em SM, os valores de tensão foram mais negativos que -166mV a partir do mês 7, representando uma alta probabilidade de corrosão (Figura 7). Além disso, o ânodo A1 (localizado a uma profundidade de 8 cm) apresentou valores de tensão mais negativos que o ânodo A2 (localizado a uma profundidade de 22 cm). Portanto, observou-se maior ativação dos ânodos A1 que estão mais próximos da superfície de imersão do que os ânodos A2. Embora o acesso de oxigênio seja mais restrito ou baixo em concreto úmido e submerso, os valores de corrosão são muito importantes e não necessariamente podem ser atribuídos apenas ao efeito do oxigênio (Alonso et al., 1998). Um comportamento incomum também foi observado no ânodo SMA2, que pode ser devido à heterogeneidade do concreto, sendo este um caso isolado não observado com os demais eletrodos deste trabalho.

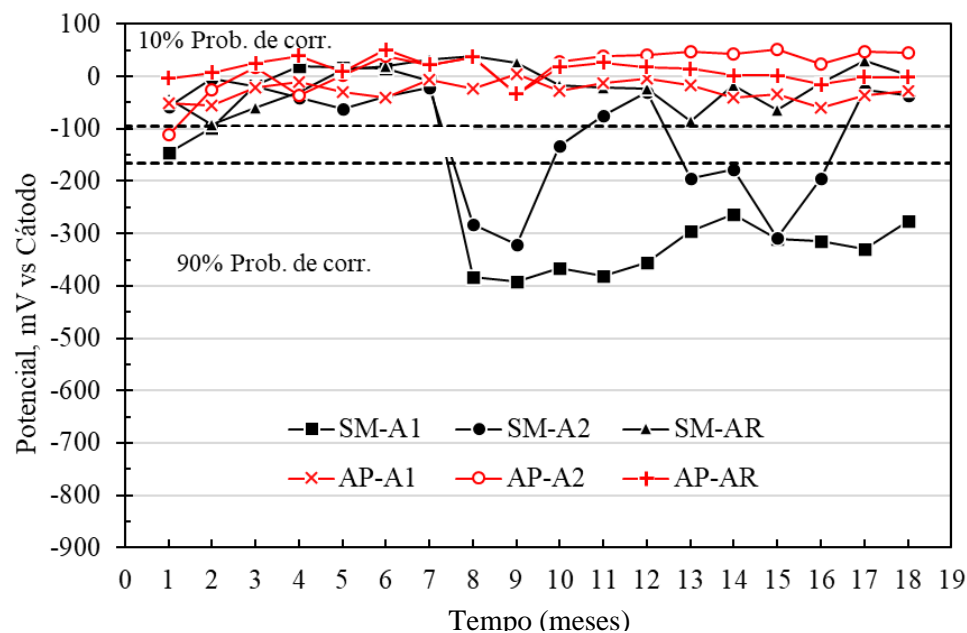


Figura 7. Potencial vs cátodo do tubo de ensaio com uma relação a/c de 0,40 exposto em água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (VÓS).

Para os corpos de prova com relação a/c de 0,60 e expostos em AP, as tensões das macrocélulas dos ânodos A1, A2 e AR foram geralmente mantidas na zona de baixa probabilidade de corrosão, com valores mais positivos que -95mV (Figura 8). Enquanto os ânodos dos corpos de prova imersos em SM apresentaram valores de tensão mais negativos que -166mV , com tendência para valores com maior probabilidade de corrosão a partir do mês 2 de exposição (Figura 8). Da mesma forma, observou-se que o ânodo A1 apresentou maior vulnerabilidade à corrosão do que o ânodo A2, sendo um efeito semelhante ao apresentado nas vigas com a/c de 0,40 (Figura 7). Particularmente para o caso das armaduras de aço (SM-AR), observou-se uma diminuição gradual do potencial ou tensão da zona de baixa probabilidade de corrosão para a zona de alta probabilidade, atingindo potenciais de -300mV para os meses 17 e 18, mostrando praticamente a mesma tendência dos ânodos A1 e A2.

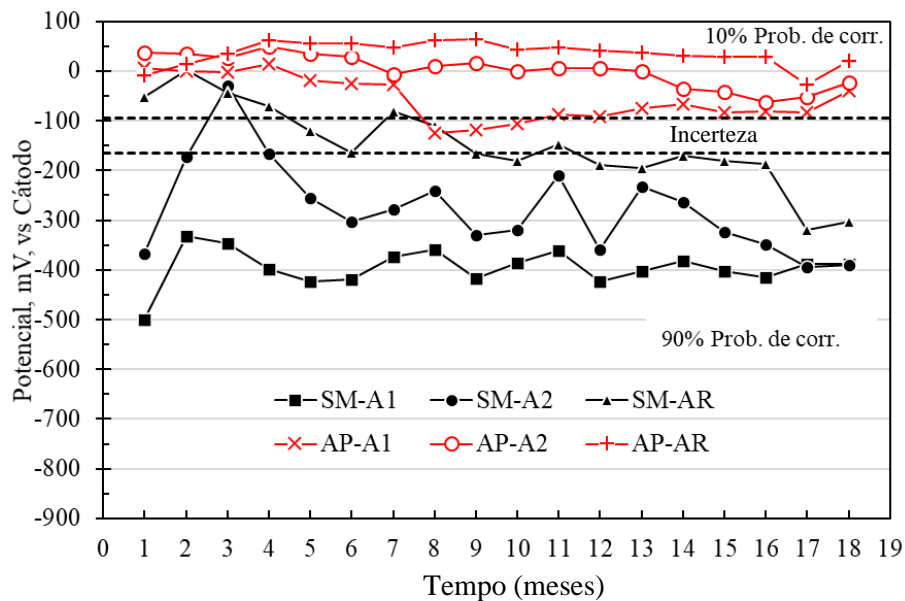


Figura 8. Potencial vs. cátodo de vigas com relação a/c de 0,60 expostas em água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

3.2 Potenciais de corrosão vs CSC (Cu/CuSO₄)

Os potenciais de corrosão dos anodos A1, A2 e AR em relação ao eletrodo CSC nos corpos de prova com relação a/c de 0,40 e expostos em AP, foram mais positivos que -200mV (baixo risco de corrosão) (Figura 9). No entanto, os ânodos dos corpos de prova expostos em SM atingiram valores de potencial mais negativos que -200mV, com indícios de alta probabilidade de corrosão após o mês 7. Observou-se também que o ânodo A1 apresentou maior vulnerabilidade à corrosão que o ânodo A2 (Figura 9). Isto sendo consistente com os resultados obtidos das voltagens das macrocélulas (Figura 7 e 8). Por outro lado, os potenciais do aço 304 utilizado como cátodo não representam um provável risco de corrosão para as vigas expostas em AP e SM, indicando um bom desempenho como meio de implementação para monitoramento de corrosão de estruturas de concreto armado (Figura).

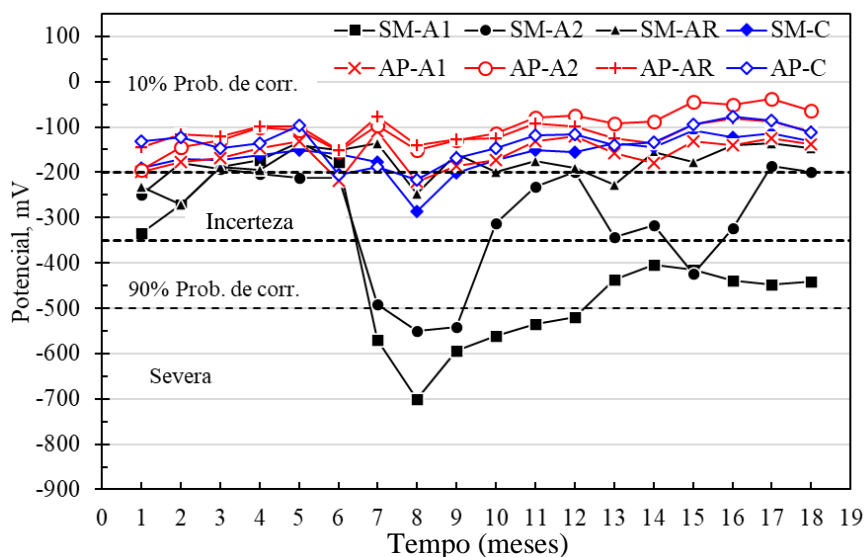


Figura 9. Potencial vs Cu/CuSO₄ de amostras com relação a/c de 0,40 expostos a água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

No caso dos corpos de prova com relação a/c de 0,60 e expostos em AP, os potenciais de corrosão de A1, A2 e AR vs CSC foram superiores a -200mV, ou seja, com baixa probabilidade de apresentar corrosão. Enquanto isso, os potenciais dos anodos nos corpos de prova imersos em SM mostraram tendências da zona de alta probabilidade para corrosão severa a partir do mês 2, com valores de -300mV a -700mV aproximadamente (Figura 10). Este mesmo efeito foi detectado nas voltagens das macrocélulas (Figura 7 e 8). Para os potenciais do aço da armadura, observou-se uma tendência para a zona de alto risco de corrosão, com potenciais de até -600mV para os meses 17 e 18. Enquanto o potencial do cátodo nos tubos de ensaio com relação a/c de 0,60 oscilou na faixa de -200mV a -350mV, sendo mais evidente entre os meses 5 a 10, geralmente representando baixo risco de corrosão.

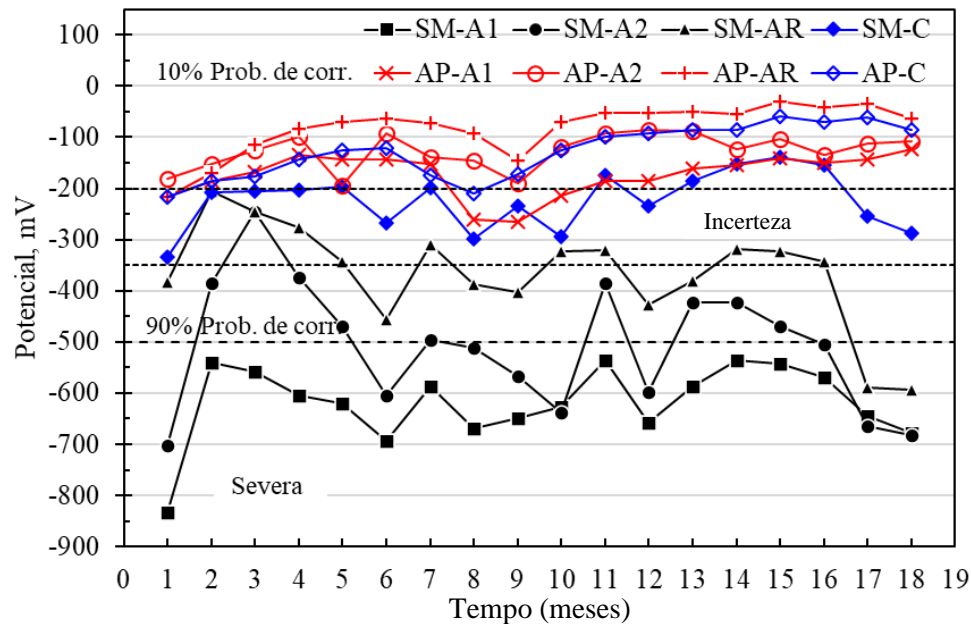


Figura 10. Potencial vs. Cu/CuSO₄ de espécimes com relação a/c de 0,60 expostos a água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

3.2.1 Comparação dos potenciais vs cátodo e vs eletrodo de cobre sulfato de cobre (CSC)

Utilizando os dados dos potenciais ou tensões das seções anteriores, a Figura 11 mostra as comparações entre os potenciais em relação ao cátodo e em relação ao CSC, correspondentes aos ânodos dos tubos de ensaio com relação a/c de 0,40 expostos em SM. Pode-se observar uma boa correlação dos potenciais obtidos com diferentes eletrodos de referência e durante o tempo de monitoramento. Portanto, esses sensores galvânicos podem ser uma opção viável para implantação e monitoramento de corrosão de estruturas de concreto armado.

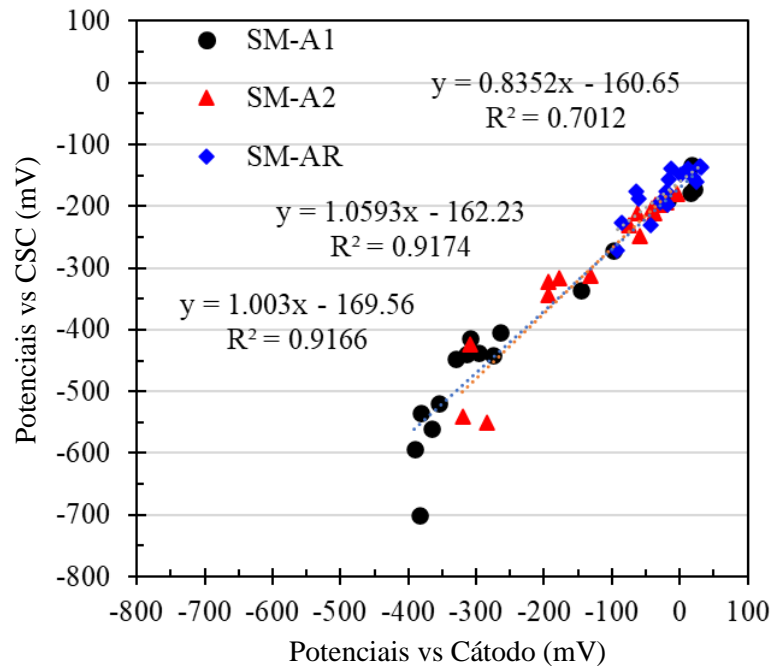


Figura 11. Comparação entre os potenciais de corrosão em relação ao cátodo e em relação ao eletrodo CSC dos ânodos dos corpos de prova com relação a/c de 0,40.

3.3 Densidades de corrente de macrocélula

Em geral, as densidades de corrente das macrocélulas para os sensores colocados nos corpos de prova com a/c de 0,40 expostos em HP apresentaram uniformidade entre os valores, estando dentro da área considerada como corrosão desprezível (Figura 12). No entanto, as densidades de corrente do sensor A1 dos corpos de prova SM expostos foram maiores a partir do mês 6, atingindo os valores considerados como corrosão moderada e alta (superior a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), o que também indica uma corrosão ativa (Figura 12). Embora o sensor A2 tenha indicado valores de ativação a partir do sexto mês, não foi mantido nos meses subsequentes, gerando uma passivação a partir do mês 10. Da mesma forma, observou-se que o sensor A1 dos corpos de prova expostos em SM, apresentou valores de correntes de macrocélula maior que A2, sendo influenciado pela profundidade em que os sensores estavam localizados e sua disponibilidade de oxigênio. Essa diferença também foi observada por medições das tensões e potenciais das macrocélulas em relação ao eletrodo CSC.

A diferença entre as correntes das macrocélulas dos sensores A1 maiores que A2, ambos expostos em AP e SM, pode ser devido à disponibilidade de oxigênio. Sendo que a difusão do oxigênio é menor em ambiente submerso, portanto a atividade de corrosão diminui (Tabela 4). Embora também tenha sido revelado em outros estudos (Alonso et al., 1998), que mesmo sob escassez de oxigênio, reações de redução podem ocorrer dentro do concreto.

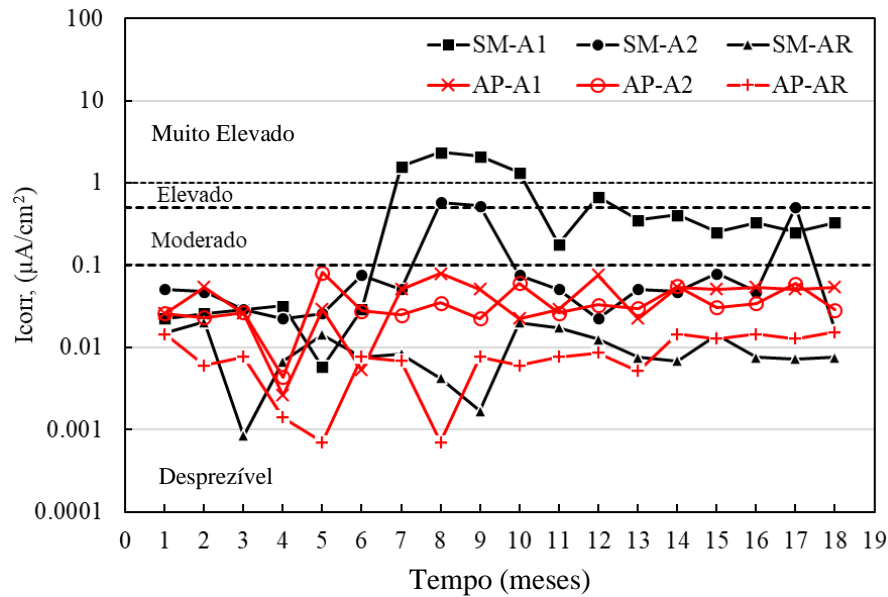


Figura 12. Densidade de corrente de macrocélulas das amostras com $a/c = 0,40$ expostas em água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

A Figura 13 mostra os resultados das densidades de corrente dos sensores colocados nos corpos de prova com relação a/c de 0,60, expostos em AP e SM. Pode-se observar que os valores de corrente obtidos nos anodos A1 e A2 expostos em AP, geralmente indicam corrosão desprezível (inferior a $0,1 \mu A/cm^2$), embora o sensor A1 (colocado a 8 cm de profundidade) tenha apresentado sinais de corrosão moderada a partir do mês 6. No caso dos sensores A1 e A2 dos corpos de prova expostos em SM, os valores atuais apresentaram inicialmente alta corrosão (maior que $1,0 \mu A/cm^2$) com tendência à corrosão moderada (menos de $0,5 \mu A/cm^2$) após o mês 10. Por outro lado, foi observado nos dois tipos de dosagens com uma relação a/c de 0,40 e 0,60 (Figura 12 e 13), que as densidades de corrente para os sensores AR expostos em AP e SM indicam estabilidade e corrosão desprezível.

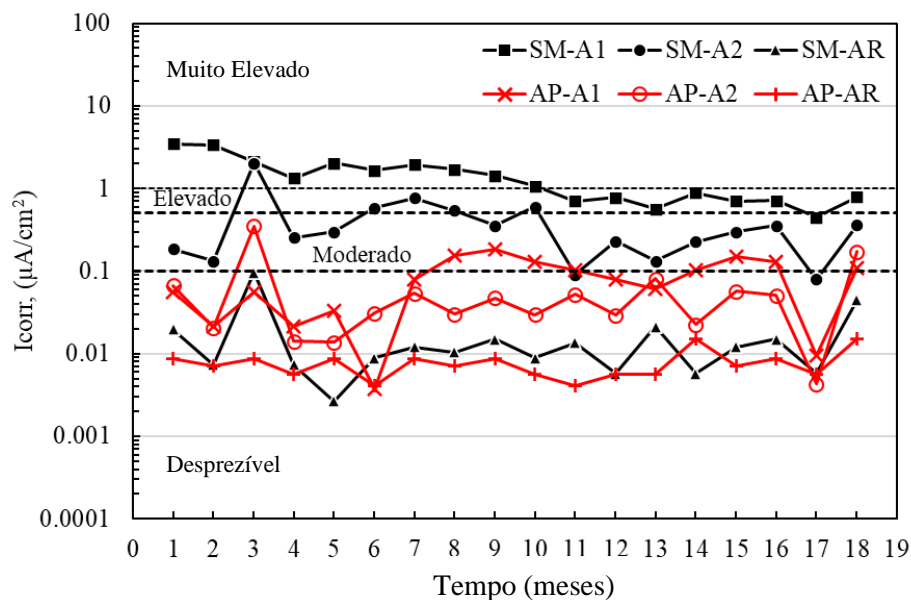
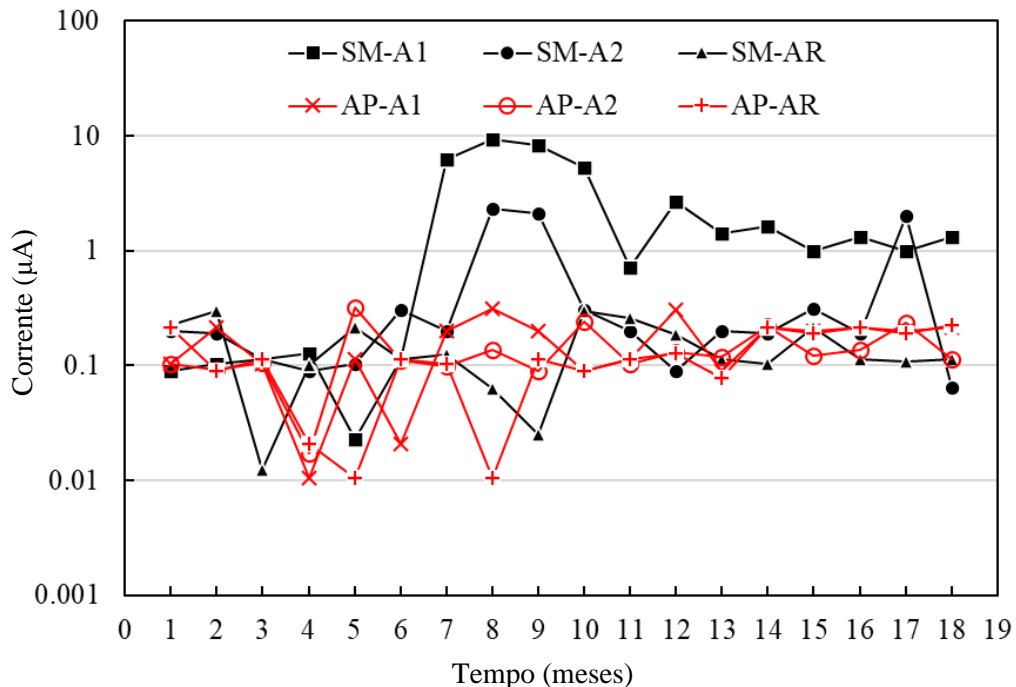


Figura 13. Densidade de corrente de macrocélulas das amostras com $a/c = 0,60$ expostas em água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

Tabela 4. Comparação dos valores limite de densidade de corrente

Tipo de sensor	Condições de ensaio	Área Rel.: Anodo/Catodo	Valores Limite	Referências
Aço/Aço Inoxidável 304	NaCl 5% imerso	1:10	3,50 μ A/ cm ²	Pérez et al., 2022
Aço/Aço Cobre /Aço Inoxidável	Gravidade - Imersão 3,5% NaCl	1:1	0,07 μ A/ cm ² -0,02 μ A/ cm ²	Parque Zink Taek, 2005
Aço/Aço Inoxidável 1.4301	Argamassa com 3% Cl ⁻ adicionada à água de amassamento	1:5	5,00 μ A/ cm ²	Elsner, 2002
Aço/Titânio-platina	Umidade e Secagem	1:8	3,00 μ A/ cm ²	Raupach e Schiebl, 2001
Aço/Aço Inoxidável 316	Umidade Relativa 95% e concreto com 3% Cl ⁻	1:30 1:33	3,85 μ A/ cm ²	Arya e Vassie, 1995

Na análise da intensidade de corrente de macrocélula (Figura 14) foi possível determinar que os sensores A1 colocados em menor profundidade nos corpos de prova expostos em SM apresentaram maiores correntes de macrocélula (9 μ A e 14 μ A para o concreto com a/c de 0,40 e 0,60, respectivamente) do que os sensores A2 localizados em maiores profundidades (2,40 μ A e 2,00 μ A para concreto com a/c de 0,40 e 0,60). De acordo com os primeiros valores de intensidade de corrente de macrocélula, verificou-se que eles eram semelhantes aos relatados na literatura, com valores limite de corrente galvânica de 15 μ A e 16 μ A. No entanto, a diferença encontrada pode ser devido a diferentes condições de ensaio, materiais dos sensores, relações anodo/catodo e arranjos geométricos dentro do concreto (Raupach e Schiebl, 2001 ; Elsner, 2002), Tabela 5 .



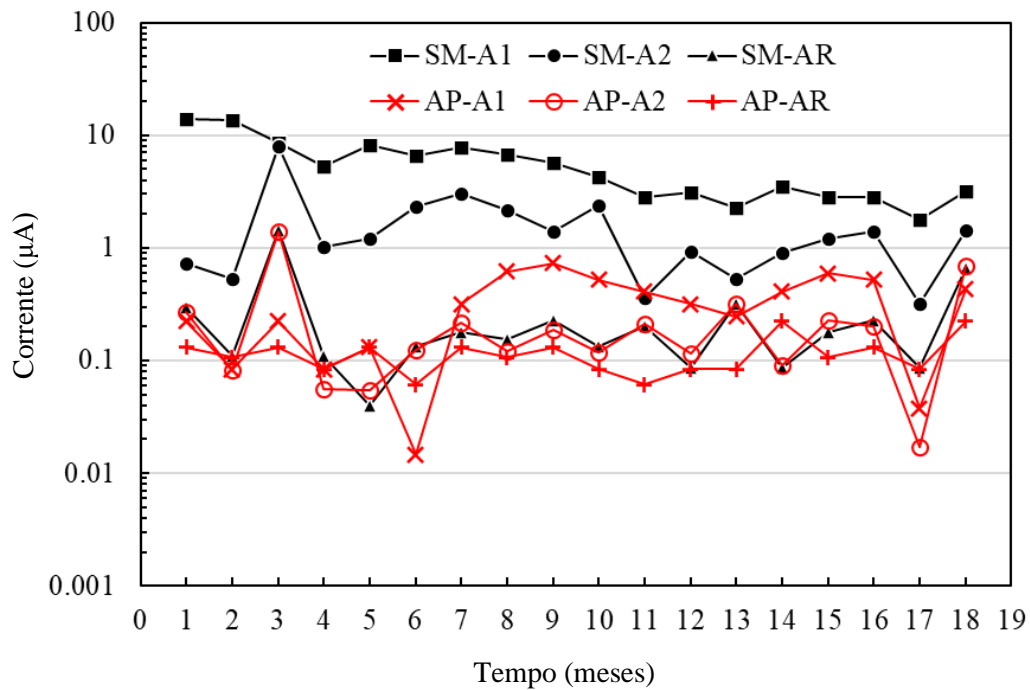


Figura 14. Intensidade de corrente da macrocélula dos corpos de prova com a/c = 0,40 e 0,60 expostos à água potável (AP) e solução de NaCl a 5% (SM).

Tabela 5. Comparação dos valores limites atuais

Tipo de sensor	Condições de ensaio	Área Rel.: Anodo/Catodo	Valores Limite	Referências
Aço/Aço Inoxidável 304	Imerso em 5% NaCl	1:10	14µA	Pérez et al., 2022
Aço/Aço Inoxidável 1.4301	Argamassa com 3% Cl ⁻ adicionada à água de amassamento	1:5	16µA	Elsner, 2002
Aço/Titânio-platina	Molhagem e Secagem	1:8	15µA	Raupach e Schiebl, 2001

3.4 Ruído eletroquímico

Devido à ativação nula obtida dos sensores em AP, são mostrados apenas os resultados de ruído eletroquímico dos corpos de prova expostos em SM, e sua análise para determinar o tipo de corrosão do sistema. Os dados de potencial (E) e atual (I) foram registrados com 1024 pts, a 1 pt/seg.

A Figura 15 e a Figura 16 mostram os gráficos de exemplo das séries de densidade de potencial e corrente ao longo do tempo para os ânodos A1, imersos em concreto com uma relação a/c de 0,40 e 0,60, respectivamente. Em ambas as dosagens de concreto, observou-se uma correspondência de comportamento entre as séries de potencial e corrente, apresentando oscilações aleatórias dos sinais com transientes de 1,0 mV e 1,0 µA/cm² no sinal base do potencial e da corrente. Este tipo de comportamento foi associado a um tipo de corrosão generalizada.

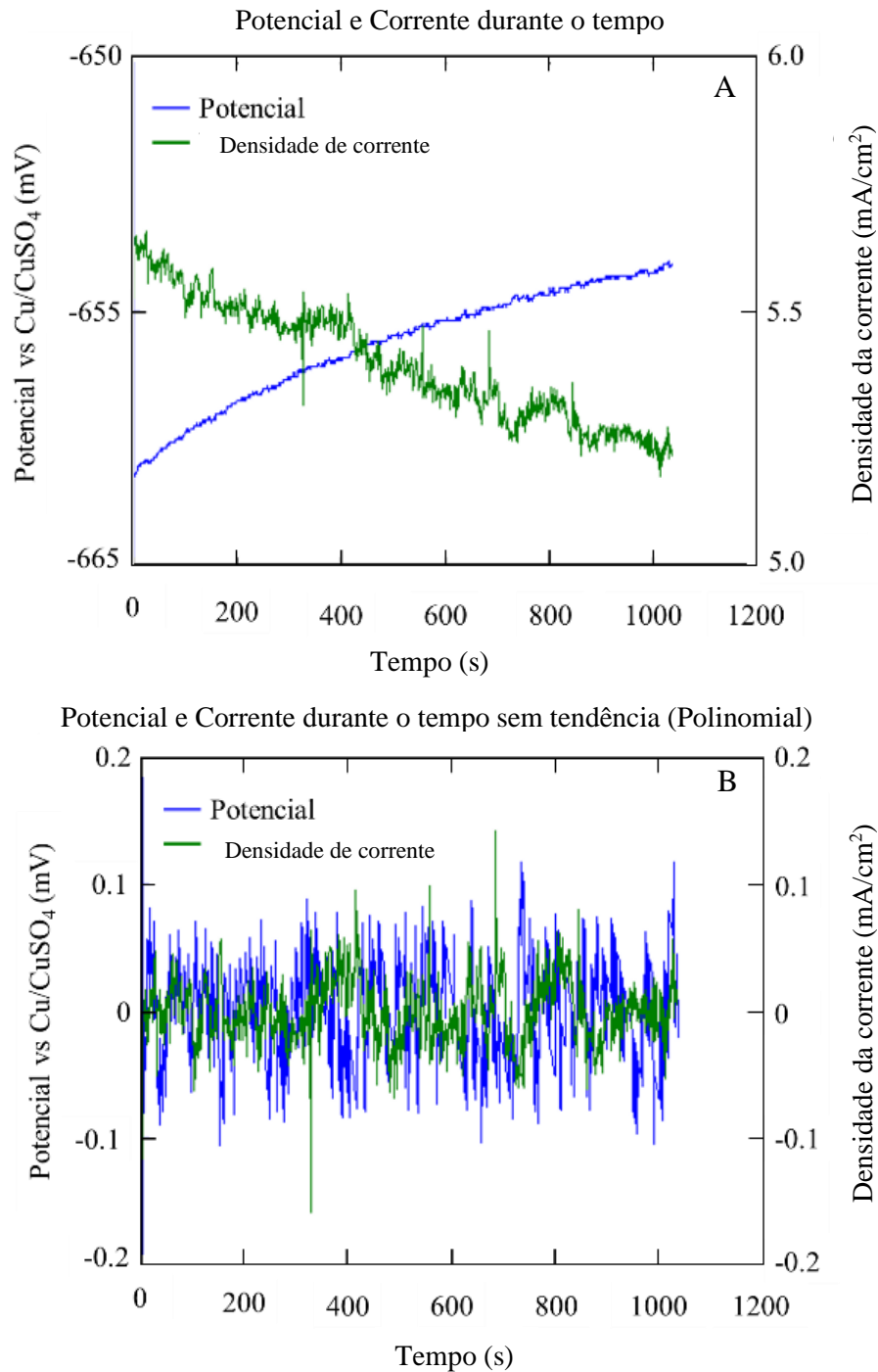


Figura 15. Séries de potencial e corrente ao longo do tempo obtidas do ânodo A1 especificamente com a/c 0,60, após 10 meses em SM: com tendência (A) e com remoção de tendência (B).

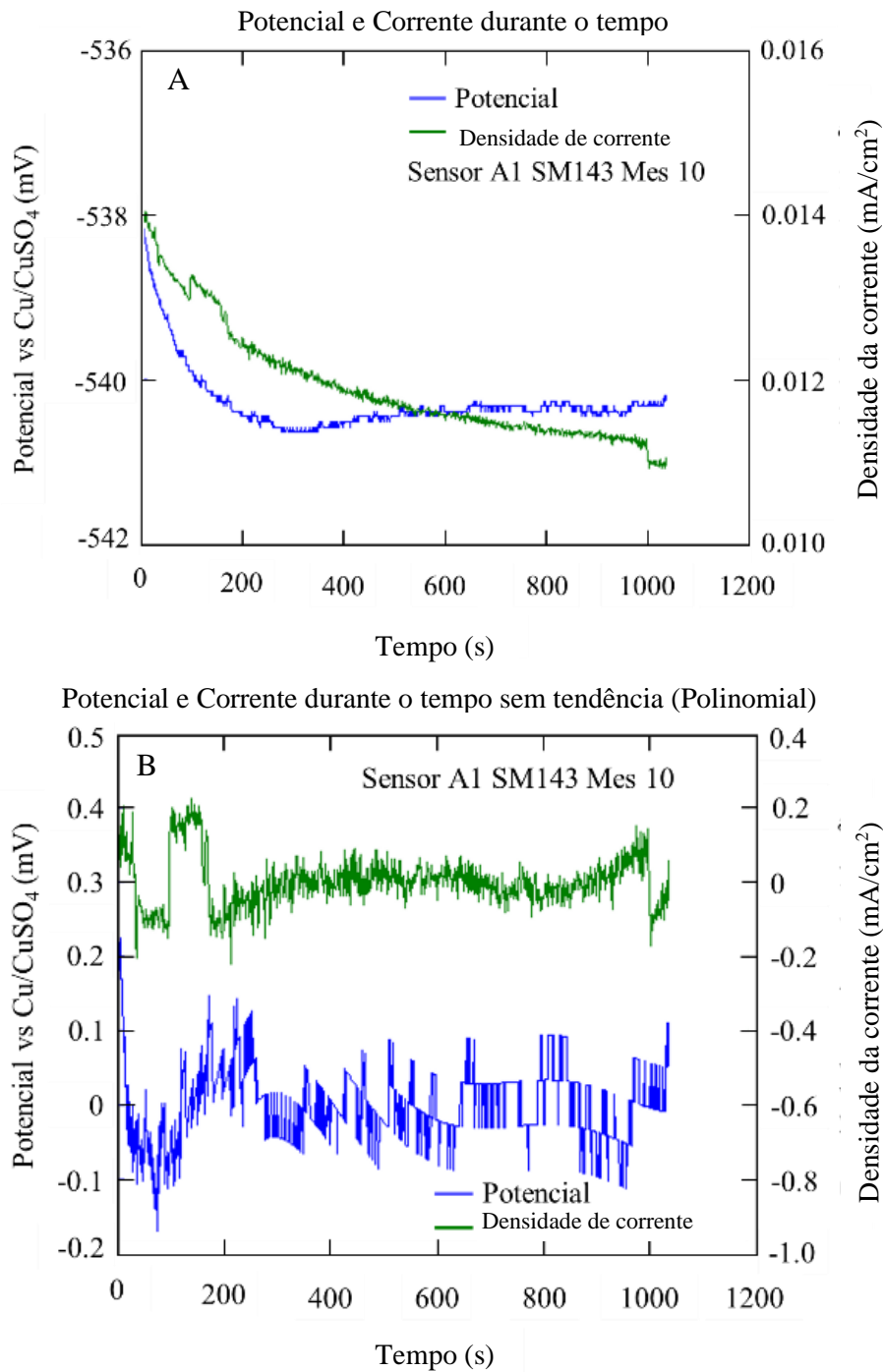


Figura 16. Séries de potencial e corrente ao longo do tempo obtidas do sensor A1 especificamente com a/c 0,40, após 10 meses em SM: com tendência (A) e com remoção de tendência (B).

As Figuras 17 e 18 mostram alguns gráficos de exemplo das densidades espectrais de potencial e densidade de corrente dos anodos A1, para concreto com relação a/c de 0,60 e 0,40, após 10 meses de exposição. Através desses gráficos foi possível determinar as inclinações com as quais o fenômeno de corrosão nos anodos foi avaliado. Para este caso, declives mais acentuados foram considerados indicativos de alguma atividade de corrosão.

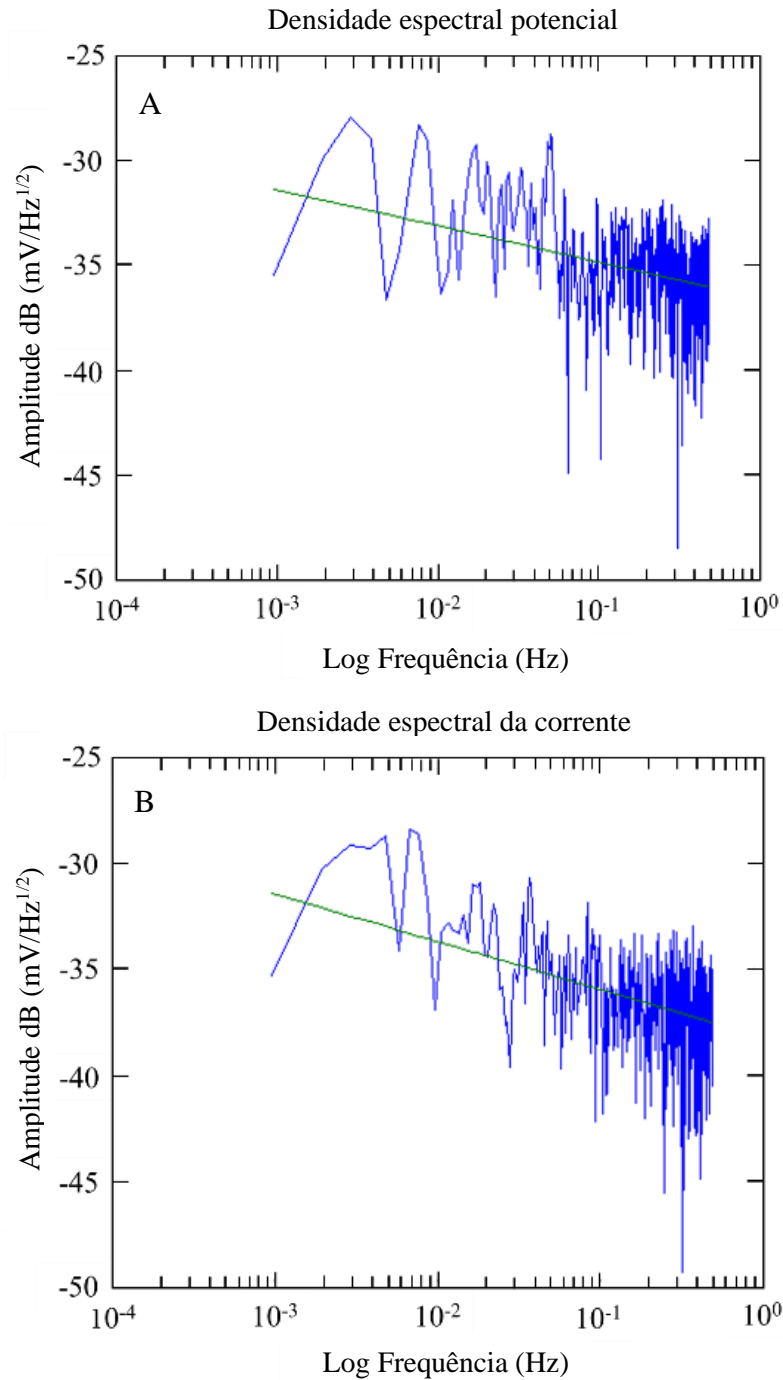


Figura 17. Densidades espectrais de potenciais e correntes ao longo do tempo, obtidas do sensor A1 especificamente em a/c 0,60 após 10 meses de exposição.

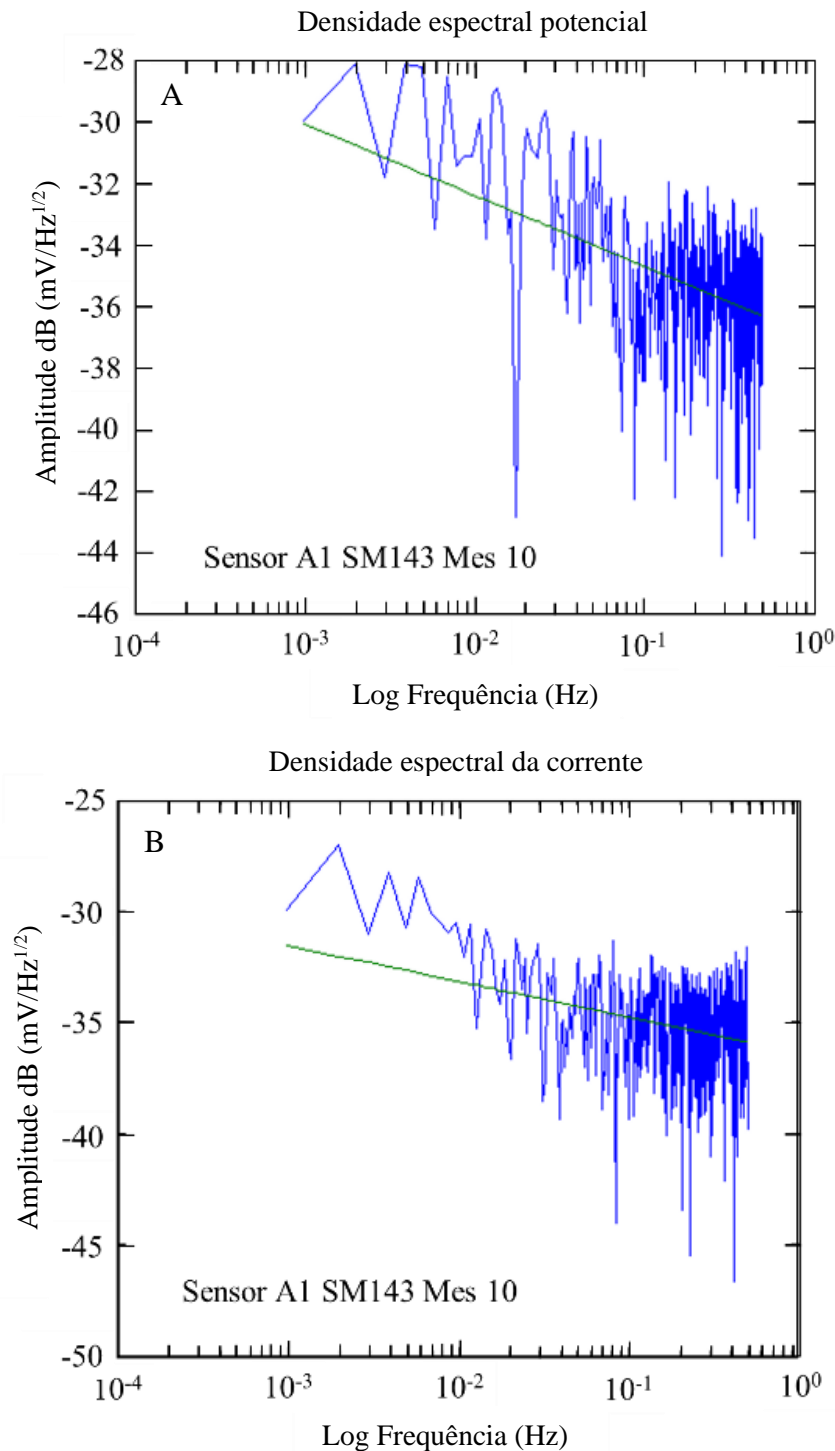


Figura 18. Densidades espectrais de potenciais e correntes ao longo do tempo, obtidas do sensor A1 especificamente em a/c 0,40 após 10 meses de exposição.

Durante os 9 meses de monitoramento dos sensores e da armadura dos corpos de prova de 0,40 a/c, as inclinações obtidas das densidades espectrais potenciais ficaram entre -1,72 e -3,76; enquanto para as amostras de a/c 0,60 ficaram entre -2,06 e -3,48. Da mesma forma, as inclinações dos registros de densidade espectral da corrente das sondas de 0,40 a/c foram -0,63 e -4,92; e para as amostras de a/c 0,60 ficaram entre -0,43 e -3,26. Esses valores em função da inclinação das densidades espectrais de frequência correspondem a um tipo de corrosão uniforme e passivação-

uniforme (Figuras 17 e 18) (Legat e Dolecek, 1995).

Com os registros de ruído eletroquímico dos tubos de ensaio com relação a/c de 0,60 e 0,40, foi realizada uma análise estatística para determinar os dados de resistência, potencial e corrente que permitiram classificar o tipo de corrosão nos ânodos, que estão resumidos na Tabela 6.

Da mesma forma, os valores do índice de localização (LI) (Kelly et al., 1996). obtidos a partir dos registros de ruído eletroquímico dos anodos, para o mês 10 em ambas as qualidades de concreto, indicam os tipos de corrosão generalizada e mista (Tabela 6). Para o mês 18, foi observado um tipo de corrosão mista para ambas as qualidades de concreto, sem ultrapassar um nível maior que a unidade (>1), onde haveria um processo de pite nos sensores.

Tabela 6. Resultados da análise estatística de ruído eletroquímico e interpretação do tipo de corrosão nos ânodos dos concretos de a/c 0,60 e 0,40, para os meses 10 e 18.

relação a/c	Eletrodo - Mês	Rn ($\Omega\text{-cm}^2$)	Índice de localização, IL	tipo de corrosão	PSD potencial (mV)	tipo de corrosão	PSD corrente ($\mu\text{A/cm}^2$)	tipo de corrosão
0,40	A1-10	2,35E+04	0,0058	difundido	-3,76	Uniforme	-1,67	Uniforme
0,40	A2-10	1,92E+04	0,0294	misturado	-3,24	Uniforme	-0,63	passivação uniforme
0,40	AR-10	1,26E+05	0,0878	misturado	-1,72	Uniforme	-4,92	Uniforme
0,60	A1-10	1,50E+04	0,0048	difundido	-2,19	Uniforme	-2,24	Uniforme
0,60	A2-10	1,40E+04	0,0046	difundido	-2,09	Uniforme	-3,03	Uniforme
0,60	AR-10	2,26E+05	0,0406	misturado	-2,06	Uniforme	-0,43	passivação uniforme
0,40	A1-18	1,30E+04	0,0325	misturado	-2,93	Uniforme	-3,98	Uniforme
0,40	A2-18	2,50E+04	0,0175	misturado	-2,00	Uniforme	-1,39	Uniforme
0,40	AR-18	1,26E+05	0,0878	misturado	-1,72	Uniforme	-4,92	Uniforme
0,60	A1-18	1,40E+04	0,0246	misturado	-3,48	Uniforme	-3,26	Uniforme
0,60	A2-18	1,60E+04	0,0469	misturado	-3,38	Uniforme	-2,32	Uniforme
0,60	AR-18	1,40E+04	0,0548	misturado	-2,27	Uniforme	-0,68	passivação uniforme

3.5 Teor de cloretos livres no concreto por peso do cimento

A Tabela 7 mostra os resultados da porcentagem de íons cloreto solúveis em água em relação ao concreto e cimento, para os corpos de prova de concreto com relação a/c de 0,40 e 0,60. Onde pode-se observar que para ambos os tipos de concreto expostos em AP, as quantidades de íons cloreto foram desprezíveis. No caso dos corpos de prova de 0,40 a/c expostos à solução de NaCl a 5%, as porcentagens de íons cloreto foram menores do que nas vigas de 0,60 a/c, esta atingindo um valor de 0,44% de Cl^- em relação ao cimento. Esse valor pode ser considerado um risco iminente de corrosão, de acordo com os valores relatados na literatura (Mohammed e Hamada, 2001; Alonso, 2001), Tabela 8; e pelos valores das tensões e correntes das macrocélulas que foram monitoradas neste trabalho, onde aos 10 meses apresentam valores de alta probabilidade de corrosão.

Tabela 7. Teor de íons cloreto solúveis em água de ambas as dosagens de concreto

Mistura	% Cl em relação ao concreto		% Cl em relação ao cimento	
	em água potável	Em salmoura	em água potável	Em salmoura
a/c: 0,40	0,0000	0,0470	0,00	0,21
a/c: 0,60	0,0035	0,0650	0,02	0,44

Tabela 8. Íons de cloreto livres (Cl⁻) em peso de cimento

Referências	% Cl em relação ao cimento
ACI 318	< ou = 0,15
ACI 222R	0,20
Marrom, 1980 Maomé e Hamada 2001	0,40
Outros	0,10-0,60

3.6 Ensaio de compressão simples

A Tabela 9 mostra os valores médios da resistência à compressão de três corpos de prova cilíndricos de concreto, para cada relação a/c de 0,40 e 0,60. Esses valores de tensão obtidos são relativamente altos, o que está relacionado a um processo de corrosão lento apesar de estar em um ambiente agressivo em solução de NaCl a 5%. Esses resultados permitem corroborar que os concretos feitos com as especificações padrão garantem boa qualidade e são menos vulneráveis à entrada de agentes agressivos.

Tabela 9. Resultados do ensaio de compressão simples

relação a/c	f'c = kg/cm ²
0,40	476
0,60	358

4. CONCLUSÕES

Através de sensores galvânicos é possível monitorar e avaliar o estado de risco devido à corrosão em estruturas de concreto armado, pois as tensões das macrocélulas do sensor galvânico interno (aço carbono/aço inoxidável) apresentaram uma boa correlação com relação aos potenciais de corrosão sensor Cu/CuSO₄, durante o tempo de ensaio do sistema.

Os sensores galvânicos podem ser considerados para sua implementação como método preventivo em correlação com as técnicas eletroquímicas existentes, pois foram observados valores limite de corrente e densidade de corrente semelhantes a outros sistemas similares.

O comportamento do eletrodo de referência de aço inoxidável (cátodo “C”), embutido no concreto armado, geralmente manteve sua estabilidade frente ao risco de corrosão por íons cloreto durante a etapa de avaliação.

O valor de cloretos livres encontrado próximo ao sensor aos 10 meses atingiu um percentual de 0,44% em relação ao cimento, o que representa um risco com probabilidade suficiente para a ativação de corrosão na armadura, sendo este diagnóstico compatível com a tensão da macrocélula e medidas atuais, e por valores próximos aos relatados na literatura.

As informações obtidas com a técnica de ruído eletroquímico mostram que os corpos de prova apresentam corrosão uniforme e/ou mista na armadura e nos sensores devido à passivação do sistema durante a formação dos óxidos, no tempo de exposição; exceto para o corpo de prova de qualidade inferior, que apresenta maiores sinais de corrosão nos meses 17 e 18, mas ainda não apresenta corrosão localizada.

5. REFERÊNCIAS

- AISI. (1983), *AISI – SAE Standard carbon steels. Steel products manual*, American Iron and Steel Institute.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., Castro, P. (2001), *Reply to the discussion by T.U. Mohammed and H. Hamada of the paper: Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*. Cement and Concrete Research. 31(5):39-840. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00486-0](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00486-0)
- Alonso, C., Andrade, C., García, A. M. (1990), *Oxygen availability in the corrosion of reinforcements*. Advances in Cement Research. 3(11):127-132. DOI: <https://doi.org/10.1680/adcr.1990.3.11.127>
- Alonso, C., Andrade, C., Nóvoa, X. R., Izquierdo, M., Pérez, M. C. (1998), *Effect of protective oxide scales in the macrogalvanic behaviour of concrete reinforcements*. Corrosion Science. 40(8):1379–1389. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00040-7)
- American Concrete Institute (2002), *ACI 211.1: Recommended practice for selecting proportions for normal weight concrete*, p. 953. Retrieved from <https://doi.org/10.14359/7325>
- Arya, C., Vassie, O. (1995), *Influence of cathode-to-anode area ratio and separation distance on galvanic corrosion currents of steel in concrete containing chlorides*. Cement and Concrete Research. 25(5):989-998. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00094-s](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00094-s)
- ASTM International. (2010). *ASTM D 1411-04 Standard Test Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixtures in Graded Aggregate Road Mixes*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/d1411-04>
- ASTM International. (2016). *ASTM C 876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/c0876>
- ASTM International. (2017). *ASTM C 39-17 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/c0039_c0039m-05e02
- Dawson, J. L. (1996). Electrochemical noise measurement. In: Kearns, J. R., Scull J. R. “*Electrochemical noise measurement for corrosion applications*”, ASTM STP 1277. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, p. 3. DOI: <https://doi.org/10.1520/stp37949s>
- Elsener, B. (2002). *Macrocell corrosion of steel in concrete-implications for corrosion monitoring*. Cement and Concrete Composites. 24(1):65-72. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00027-0](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00027-0)
- Hudok, D. (1990). *Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys*. In: “Metals handbook”, 1, E.U., pp. 200-211.
- Kelly R.G., Inman, M.E., Hudson, J.L. (1996), *Analysis of Electrochemical Noise for Type 410 Stainless Steel in Chloride Solutions*. In: Kearns, J. R., Scully, J. R. “*Electrochemical noise measurement for corrosion applications*”. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, pp. 101-113. DOI: <https://doi.org/10.1520/stp37954s>
- Legat, A., Dolecek, V. (1995), *Corrosion Monitoring System Based on Measurement and Analysis of Electrochemical Noise*. Corrosion Science. 51(4): 295-300. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3293594>
- Llorens, M., Serrano, Á., Valcuende, M. (2019), *Sensors for Determining the Durability of Reinforced Concrete Constructions*. Revista Ingeniería de Construcción. 34(1): 81-98. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-50732019000100081>
- McCarter, W. J., Chrisp, T. M., Butler, A., Basheer, P. A. M. (2001), *Near-Surface Sensors for Condition Monitoring of Cover-Zone Concrete*. Construction and Building Materials. 15(2-3): 115-124. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(00\)00060-x](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(00)00060-x)
- McCarter, W. J., Vennesland, Ø. (2004), *Sensor systems for use in reinforced concrete structures*. Construction and Building Materials. 18(6):51-358.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.008>

Mohammed, T. U., Hamada, H. (2001), *A discussion of the paper: Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar* by C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote, and P. Castro. *Cement and Concrete Research*. 31(5): 835-838.

DOI: [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00485-9](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00485-9)

NMX C155. (2014). *Industria de la construcción – Concreto hidráulico – Dosificado en masa – Especificaciones y métodos de ensayo*. Ciudad de México: ONNCCE.

NMX C159. (2004). *Industria de la construcción -Concreto -Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*. Ciudad de México: ONNCCE.

NMX C414. (2004). *Industria de la construcción -Cementos hidráulicos -Especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México: ONNCCE

PROCEDIMIENTO LAQ03. (2005), *Determinación del contenido de Al, C, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Si, Ti y Zn, de aceros al carbono y aceros inoxidables por ICP-AAE y CHNS-O*. CIMAV-EMA, BAJO NORMA ISO/IEC-17025-2005, México.

Raupach, M. (1996), *Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences*. *Construction and Building Materials*. 10(5): 329-338.

DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00018-6](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00018-6)

Raupach, M., Dauberschmidt, C. (2003), “*Durability of marine structures made of high-performance concrete*”. In: RILEM Proceedings, PRO 32 International Conference on Advances in Concrete and Structures, 2, pp. 919-930. ISBN: 2-912143-41-1. e-ISBN: 2351580176

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.

DOI: [https://doi.org/10.1016/s0963-8695\(01\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s0963-8695(01)00011-1)

Schiessl, P., Raupach, M. (1992), *Monitoring system for the corrosion risk of steel in concrete structures*. *Concrete International*. 14(7):52-55.

Zinc-Taek, P., Yoon-Seok, C., Jung-Gu, K., Lun, C. (2005), *Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of steel embedded in concrete structure*. *Cement and Concrete Research*. 35(9): 1814-1819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.027>