

# Comportamento de armaduras galvanizadas em diferentes alcalinidades

Gibson Rocha Meira <sup>[1]</sup>, Karolina Ferreira <sup>[2]</sup>, Taíssa Guedes Cândido <sup>[3]</sup>, Mariane Carvalho <sup>[4]</sup>

[1] gibsonmeira@yahoo.com. [2] karolinanferreira@gmail.com. Instituto Federal da Paraíba. [3] taissaguedes1@hotmail.com. [4] marianekrvalho@hotmail.com. Universidade Federal da Paraíba.

## RESUMO

Considerando os poucos estudos realizados sobre armaduras galvanizadas, este trabalho propôs-se a estudar o comportamento destas armaduras em meios de distintas alcalinidades e submetidos à carbonatação posterior. Para tal, armaduras galvanizadas e de aço carbono foram imersas em soluções alcalinas e monitoradas eletroquimicamente para avaliar o seu comportamento. Os resultados indicam que as armaduras galvanizadas apresentam bom desempenho em meios carbonatados e em meios com pH inferior a 13,3, com potencial de corrosão em patamares que indicam um estado passivo da armadura em relação à corrosão. Por outro lado, as armaduras em aço carbono apresentam atividade de corrosão em meio carbonatado e condição passiva em meios com pH superior a 12,5.

**Palavras-chave:** Armadura galvanizada. Carbonatação. Concreto. Corrosão. pH.

## ABSTRACT

*Taking into account the few studies carried out about hot-dipped galvanized reinforcements, this work aimed to study the behaviour of these reinforcements in different alkalinity media and subjected to subsequent carbonation. For this purpose, galvanized and carbon reinforcements were immersed in alkaline solutions and electrochemically monitored to evaluate their behaviour. Results show that galvanized reinforcements present good performance in carbonated media and also in media with pH lower than 13.3, which presented corrosion potential under levels that indicate a passive state of reinforcements regarding corrosion. On the other hand, carbon reinforcements present corrosion activity in carbonated media and passive condition in medias with pHs over 12.5.*

**Keywords:** Galvanized reinforcement. Carbonation. Concrete. Corrosion. pH.

## 1 Introdução

As estruturas de concreto armado estão sujeitas à agressividade do ambiente no qual se encontram inseridas. Nesse contexto, a corrosão de armaduras é um dos fenômenos mais recorrentes. Este processo é, geralmente, desencadeado pela ação dos íons cloreto ou pela carbonatação do concreto (MEIRA, 2004; HELENE, 1993; TUUTTI, 1982; HO, LEWIS, 1987).

Os valores ideais para o pH do concreto se encontram na faixa que varia de 12 a 13,5. Quando se inicia o processo de carbonatação, ocorre uma redução deste pH, chegando a valores próximos de 8,5. A armadura possui uma película passiva estável em elevada alcalinidade. Devido à redução de pH do concreto, decorrente das reações de carbonatação, essa película torna-se instável, ocorrendo a despassivação e iniciando-se o processo de corrosão.

As armaduras galvanizadas, em princípio, são capazes de ter um melhor desempenho que armaduras comuns em concretos sujeitos à ação dos cloretos ou concretos carbonatados (MACIAS; ANDRADE, 1990). Estudos indicam que a armadura galvanizada permanece passiva mesmo após a carbonatação, mantendo níveis de corrosão da armadura da mesma ordem de grandeza das não carbonatadas, enquanto que armaduras convencionais em concretos carbonatados podem apresentar níveis de corrosão até dez vezes maiores (MAAHN; SORENSEN, 1986). No entanto, o desempenho dessas armaduras galvanizadas depende das características da capa galvanizada, bem como do meio no qual essa armadura é inserida (GONZÁLEZ, ANDRADE, 1982; ANDRADE, MACIAS, 1988; FARINA, DUFFÓ, 2007).

Sabendo-se que a utilização do concreto armado é ampla e o problema da corrosão de armaduras é uma das maiores causas de perda de desempenho da estrutura, demandam-se estudos que possam contribuir para mitigar o processo de corrosão do aço, sendo ele comum ou galvanizado. É nesse contexto que este trabalho busca estudar o comportamento eletroquímico de barras galvanizadas e não galvanizadas em meios alcalinos, simulando a fase líquida do concreto, fazendo comparações de desempenho entre esses materiais.

## 2 Referencial teórico

A corrosão de armaduras no concreto é uma das grandes responsáveis pela deterioração de estruturas de concreto, levando à redução da sua vida útil.

É considerada o mecanismo de degradação mais comum no concreto, segundo John *et al.* (2002). Este fenômeno pode ser desencadeado pela carbonatação ou ação dos cloretos.

A carbonatação é um fenômeno físico-químico decorrente do transporte do  $\text{CO}_2$  para o interior da matriz cimentícia e da reação deste gás com compostos alcalinos do cimento, entre eles o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), que se encontra em maior quantidade, o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), na presença de umidade, gerando carbonatos como subprodutos de baixa solubilidade (MEHTA, MONTEIRO, 2008; MOREIRA, 2006; ANDRADE, 1988; TUUTTI, 1982).

Poubaix (1974) esclarece, em seu estudo sobre equilíbrio termodinâmico do metal, que o potencial de corrosão do metal depende diretamente do pH do meio em que ele está inserido, uma vez que existe interação entre os íons que se encontram na reação de corrosão com os íons do eletrólito.

Considerando o equilíbrio termodinâmico da armadura, esta pode assumir três condições distintas: imunidade, passivação e corrosão. Na zona de imunidade, o metal não corrói, permanecendo estável para qualquer valor de pH. A zona de passivação é onde o metal se recobre de uma camada de óxidos e hidróxidos que atua como barreira de proteção, impedindo o progresso da corrosão. O último estágio do processo corrosivo é o da corrosão em si, quando o potencial eletroquímico dá condições para que os produtos da camada de passivação não sejam mais estáveis (CARMONA, 2005).

Em ambientes agressivos, sujeitos à ação do  $\text{CO}_2$ , a película de passivação do aço perde sua estabilidade devido à carbonatação e, conseqüentemente, redução do pH. Uma maneira de prevenir a corrosão é a melhoria da qualidade do concreto, que deve apresentar baixa porosidade para dificultar a entrada de agentes agressivos. Entretanto, nem sempre a proteção conferida pelo concreto é suficiente para evitar esse problema. Por isso, alguns estudos foram realizados buscando alternativas para prevenir a corrosão nas armaduras.

Um método financeiramente atraente de proteção contra corrosão, que garante a preservação das propriedades mecânicas do aço e não requer manutenção periódica, é o revestimento da superfície do aço. Com base em fatores tecnológicos, bem como ecológicos, econômicos e até mesmo históricos, os revestimentos de epóxi (ou poliuretano) e galvaniza-

ção convencional por imersão a quente parecem ser os mais adequados (POKORNÝ; TEJ; KOUŘIL, 2017).

A proteção por galvanização pode ser feita aplicando-se um revestimento de zinco por meio de galvanização por imersão a quente. Durante este processo, o aço é imerso em um banho de zinco fundido a uma temperatura de aproximadamente 450 °C, ponto em que ocorre interação entre o ferro e o zinco fundido, formando um revestimento aderente que proporciona uma excelente barreira à corrosão do ferro (TAN; HANSSON, 2008).

Segundo Pokorny, Tej e Kouřil (2017), a proteção por galvanização, além de ser resistente à corrosão em ambiente carbonatado, apresenta, como outras vantagens, maior resistência aos cloretos do que a armadura convencional. O autor também afirma que, caso o processo de corrosão se inicie, os produtos formados são menos volumosos e não perturbam a integridade do cimento na interface, em comparação com os volumosos produtos de corrosão do aço comum.

Embora o aço galvanizado tenha sido usado com sucesso para prolongar a vida útil das estruturas de concreto armado, permanecem incertezas com relação ao comportamento inicial de corrosão do próprio revestimento galvanizado quando incorporado ao concreto e como esse comportamento é influenciado pela composição da superfície do revestimento (TAN; HANSSON, 2008). Isso porque seu comportamento varia de acordo com a alcalinidade do concreto. Alguns estudos indicam que em meio alcalino, com pH até 13,3, a barra galvanizada consegue formar uma eficiente película de passivação (MACIAS; ANDRADE, 1990).

Diante disso, esta pesquisa visa analisar o comportamento de barras galvanizadas em diferentes alcalinidades e comparar o seu desempenho com as barras comuns.

### 3 Método da pesquisa

O presente trabalho de pesquisa foi conduzido em três etapas, respeitando os objetivos específicos propostos, quais sejam: elaboração das células de ensaio, carbonatação das soluções e monitoramento eletroquímico das armaduras durante todo o processo.

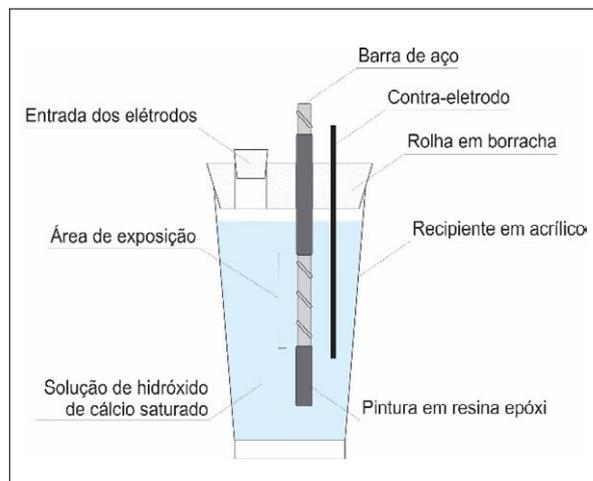
#### 3.1 Elaboração das células de ensaio

Para cada condição de ensaio, foram elaboradas duas células de ensaio, uma contendo armadura galvanizada e outra armadura comum (aço carbono). As armaduras comuns foram em aço CA 50, com diâmetro igual a 6,3 mm. Antes do emprego dessas barras, e com o objetivo de eliminar qualquer indício de corrosão prévia na superfície destes materiais e delimitar uma região de exposição, alguns procedimentos foram realizados.

A armadura galvanizada não passou por tratamento antes de ser inserida na solução, já a armadura comum, antes de ser inserida na solução, recebeu o tratamento descrito a seguir. Inicialmente, as barras foram cortadas em segmentos de 100 mm, chanfradas nas extremidades com esmeril e limpas mecanicamente com escova de cerdas de aço. Em seguida, foram submetidas a uma limpeza química, tendo como base para isto a norma americana ASTM G1 (ASTM, 2011).

Após todo o processo de limpeza, as barras foram pintadas com resina epóxi, deixando apenas uma longitude de 30 mm de exposição. Uma vez endurecida a resina, as barras passaram, novamente, pelo processo de limpeza química, nos mesmos moldes descritos acima. Na parte superior das barras de aço, foram realizadas conexões utilizando-se fios de cobre, possibilitando, posteriormente, a leitura das medidas eletroquímicas. As armaduras galvanizadas já foram recebidas em segmentos de 100 mm, com toda a sua superfície galvanizada. Nesse caso, procedeu-se apenas a colocação das conexões elétricas e a delimitação da longitude de exposição.

Compondo o arranjo das células, foram utilizadas soluções saturadas de hidróxido de cálcio e hidróxido de potássio em quatro concentrações distintas, compondo quatro pHs na faixa de 12,6 a 13,5, simulando a fase líquida dos materiais a base de cimento. A escolha por estas soluções deu-se por representar os produtos da fase líquida do concreto e por responderem pela elevada alcalinidade do concreto (CASCUDO, 1997; MEHTA, MONTEIRO, 2008). A Figura 1 apresenta o arranjo empregado nas células de ensaio.

**Figura 1** – Arranjo empregado nas células de ensaio

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez confeccionadas, as células foram conservadas em ambiente de laboratório ( $UR=70\pm 10\%$  e  $T=25\pm 5^\circ\text{C}$ ) e constantemente monitoradas, através das medidas eletroquímicas das barras e das medidas de pH das soluções.

### 3.2 Carbonatação das soluções

Antes do início do processo de carbonatação, as armaduras foram mantidas imersas na solução, por um período de aproximadamente quinze dias, até a constatação da estabilização dos parâmetros eletroquímicos e a passivação das armaduras.

Após esse procedimento, deu-se início ao processo de carbonatação das soluções, onde foi introduzido, no interior das soluções, gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). Essa ação provocou a redução de seu pH, o qual foi monitorado através de um pHmetro de bancada durante os períodos de inserção do gás. Uma vez atingido valores de pH em torno de 8, foi encerrado o procedimento.

Após a carbonatação das soluções, os parâmetros eletroquímicos das armaduras foram monitorados por um período de tempo suficiente para identificação de alterações no comportamento das armaduras ou manutenção das suas condições antes da carbonatação.

Cabe ressaltar que o procedimento de carbonatação só foi adotado naqueles casos em que houve uma prévia estabilização do comportamento eletroquímico da armadura e foi comprovada a sua passivação.

### 3.3 Monitoramento eletroquímico

O monitoramento das barras nas células de ensaio foi realizado através das técnicas eletroquímicas de potencial de corrosão em circuito aberto e resistência de polarização com compensação da queda ôhmica. Para a realização das medidas, foi empregado um potenciostato de bancada com um eletrodo de referência de  $\text{Cu-CuSO}_4$  (ESC) e um contra eletrodo de aço inoxidável, mantendo todo o conjunto envolto em uma gaiola de Faraday para evitar interferências externas (ANGST, VENNESLAND, 2009; MEIRA *et al.*, 2014) (Figura 2).

**Figura 2** – Medidas eletroquímicas

Fonte: Elaborada pelo autor.

As leituras foram realizadas em intervalos constantes de tempo, durante todas as etapas do estudo: estabilização inicial com formação da película de passivação, carbonatação das soluções e comportamento posterior à carbonatação. Leituras de potencial de corrosão mais eletronegativas que  $-350\text{ mV}$  (ESC) foram utilizadas como critérios para identificar o momento da despassivação, conforme recomenda a literatura (GONZÁLEZ, ANDRADE, 1982; CASCUDO, 1997).

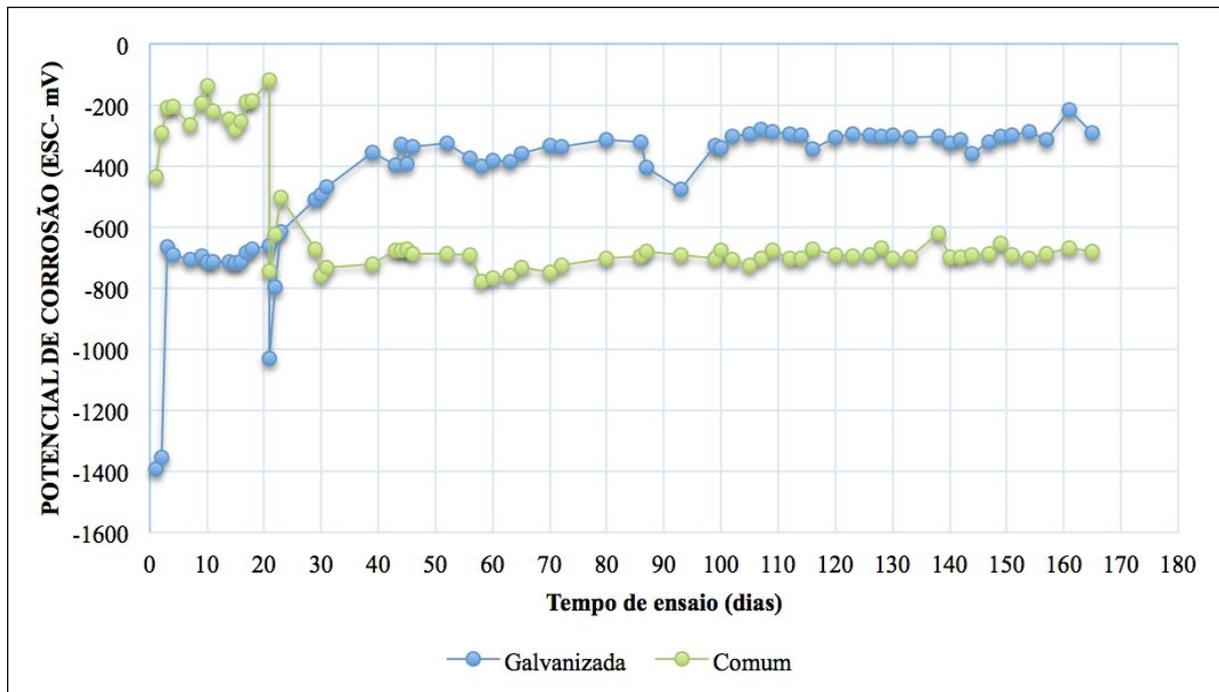
## 4 Resultados da pesquisa

A Figura 3 ilustra o comportamento da armadura galvanizada e não galvanizada no pH inicial de 12,6 e, após o processo de carbonatação, no pH em torno de 8,5. Após sofrer a carbonatação, a armadura comum mostrou uma mudança considerável no potencial, se tornando mais eletronegativo, indicando a sua despassivação. Já na armadura galvanizada, o potencial de corrosão se tornou menos eletronegativo

e permaneceu nesse patamar, não dando sinais de despassivação. Dessa forma, pode-se dizer que em ambientes carbonatados, as barras galvanizadas

são resistentes à corrosão, conforme indica a literatura (MACIAS, ANDRADE, 1990; POKORNÝ, TEJ, KOUŘIL, 2017).

**Figura 3** – Potencial de corrosão da armadura galvanizada e comum em solução inicialmente alcalina que sofre carbonatação



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 4 ilustra o comportamento do potencial de corrosão das armaduras galvanizadas em diferentes alcalinidades. Os resultados mostram que as leituras iniciais (nos primeiros dias de ensaio) do potencial de corrosão indicam um risco alto ou incerto de corrosão, com valores mais eletronegativos do que -350 mV. Estes resultados, porém, vão se tornando menos eletronegativos com o passar do tempo, indicando que as leituras tendem a uma diminuição no grau de corrosão até a estabilização.

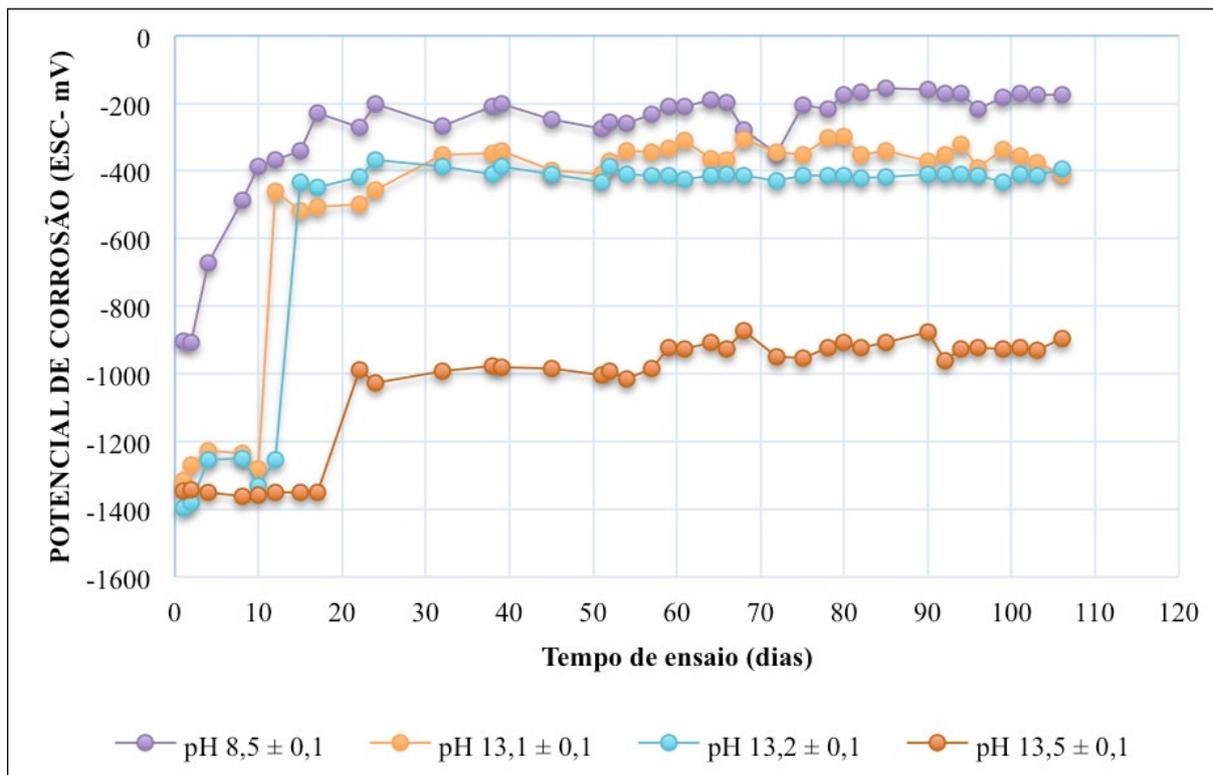
A armadura galvanizada em solução com pH em torno de 13,5 não foi passivada, por isso seu potencial de corrosão está entre -1000mV e -1200mV (ESC), e permaneceu nesse patamar de potencial durante todo o tempo de ensaio. Isto está de acordo com Macias e Andrade (1990), que afirmam que para pHs acima de 13,3 não há formação eficiente da capa passiva nas armaduras galvanizadas.

A Figura 5 ilustra o comportamento do potencial de corrosão das armaduras comuns (aço carbono) para o pH em torno de 8,5, representando a situação de carbonatação, e para diferentes alcalinidades. Pode-se observar que são necessários aproximadamente 10 dias para a estabilização das medidas.

No caso das armaduras comuns, em meio alcalino, não houve uma diferença significativa no potencial de corrosão. A armadura permaneceu em seu estado de passivação, isto é, indicado pelo potencial de corrosão, que para todos os pHs alcalinos apresentou valores acima de -300 mV (ESC).

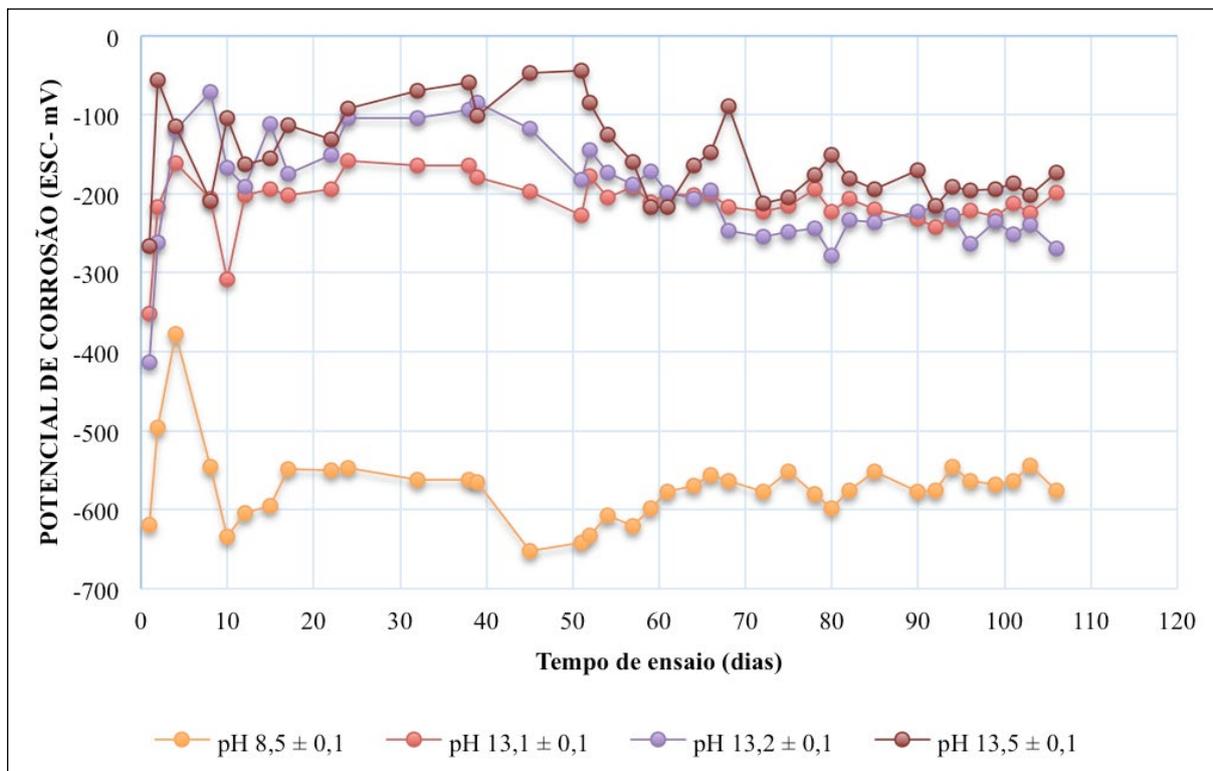
Já na situação de carbonatação, com pH em torno de 8,5, a armadura comum apresentou valores de potenciais de corrosão em torno de -600 mV (ESC). Isso já se é esperado, uma vez que, segundo Mehta e Monteiro (2008), as armaduras comuns perdem a estabilidade da película passivadora em pH abaixo de 11,5.

Figura 4 – Potencial de corrosão das armaduras galvanizadas em soluções com diferentes pH



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5 – Potencial de corrosão das armaduras comuns (não galvanizadas) em soluções com diferentes pH



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5 Conclusão/Considerações

Por meio do monitoramento eletroquímico, foi possível observar que as barras comuns tiveram comportamentos iniciais bastante parecidos para todas as idades, ou seja, os potenciais de corrosão assumiram valores um pouco mais eletronegativos. Contudo, conforme decorria o tempo, as barras comuns em solução alcalina possivelmente iniciaram o período de formação da película passivadora, o que aumentou seus potenciais de corrosão.

Já as barras galvanizadas, como comportamento geral, tenderam a apresentar potenciais de corrosão mais eletronegativos à medida que o pH das soluções se tornou mais alcalino, até uma condição limite de não passivação quando o pH alcançou o patamar de 13,5. Isso mostra a susceptibilidade do material frente a matrizes cimentícias que apresentam pH elevado.

Considerando os ensaios realizados e armaduras empregadas nesses ensaios, pode-se concluir que as armaduras galvanizadas representam uma alternativa viável para ser empregada em estruturas de concreto armado, com boa estabilidade em meios carbonatados. Isso possibilita o seu uso em ambientes urbanos com alta concentração de CO<sub>2</sub> ou mesmo em ambientes específicos, como estacionamentos em subsolos, onde a concentração desse gás pode ser significativamente elevada. Contudo, em matrizes cimentícias de elevada alcalinidade, as armaduras galvanizadas devem ser empregadas com cautela, pois a sua película de passivação pode não estabilizar em meios alcalinos com pHs acima de 13,3. Nesses casos, o emprego da armadura convencional se apresenta de forma mais adequada.

Portanto, recomenda-se o uso de barras galvanizadas em ambientes agressivos, onde há uma elevada concentração de gás carbônico (viadutos, túneis etc.), e o uso de matrizes cimentícias de menor alcalinidade, principalmente com cimentos que tenham adições pozolânicas.

### REFERÊNCIAS

ASTM G-1. American Society For Testing and Materials. **Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2011.

ANDRADE, C. **Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras**. Madrid: CSIC/IETcc, 1988. 122 p.

ANDRADE, C.; MACIAS, A. Galvanized reinforcement in concrete. In: A. D. Wilson, J. W. Nichols, H. J. Prosser (Eds). **Surface coatings**. New York: Elsevier Applied Sciences, 1988. p. 137- 154.

ANGST, U. M.; VENNESLAND, Ø. **Critical chloride content in reinforced concrete - State of the art**. In: Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II. London: Taylor & Francis Group, 2009. p. 149-150.

CARMONA, T. G. **Modelos de Previsão da Despassivação das Armaduras em Estruturas de Concreto Sujeitas à Carbonatação**. 2005. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana)—Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CASCUDO, O. **Controle da corrosão de armaduras em concreto-Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. São Paulo: Ed. PINI, 1997.

FARINA, S. B.; DUFFÓ, G. S. Corrosion of zinc in simulated carbonated concrete pore solutions. **Electrochimica Acta**, v. 52, p. 5131-5139, 2007.

GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C. Effect of carbonation, chlorides and relative ambient humidity on the corrosion of galvanized rebars embedded in concrete. **Br. Corrosion Journal**, v. 17, p. 21-28, 1982.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 1993. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil)— Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 17, p. 489-504, 1987.

JOHN, V. M. *et al.* **Durabilidade e Sustentabilidade: Desafios para a Construção Civil Brasileira**. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 2., São José dos Campos, 2002.

MACIAS, A.; ANDRADE, C. The behaviour of galvanized steel in chloride-containing alkaline solutions – the influence of the cation. **Corrosion Science**, v. 30, p. 393-407, 1990.

MAAHN, E.; SORENSEN, B. The influence of microstructure on the corrosion properties of hot-dip galvanized reinforcement in concrete. **Corrosion**, v. 42, p. 187-196, 1986.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. Tradutora Cristina Borba. São Paulo: Ibracon, 2008.

MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. 2004. 369 f. Tese (Doutorado em Engenharia)–Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

MEIRA, G. R. *et al.* Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 289-298, 2014.

MOREIRA, C. **Recalibração de estruturas de concreto carbonatados com a utilização de gel saturado de solução alcalina**. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Goiânia, 2006.

POURBAIX, M. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. Houston, NACE, 1974.

POKORNÝ, P.; TEJ, P.; KOUŘIL, M. Evaluation of the impact of corrosion of hot-dip galvanized reinforcement on bond strength with concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 271-289, 2017.

TAN, Z. Q.; HANSSON, C. M. Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embedded in concrete. **Corrosion Science**, v. 50, n. 9, p. 2512-2522, 2008.

TUUTTI K. **Corrosion of steel in concrete**. Sweden: CBI, 1982.