

Estudo do comportamento eletroquímico da solda de aço ASTM A 615 com aço inoxidável AISI 304 utilizando eletrodo tipo Inconel 182

J. C. I Ramirez –Soto^{1*} , J. T. Pérez-Quiroz² , J. M. Salgado-López³ , M. Martínez-Madrid² , T. Pérez-López¹ , M. Rendón-Belmonte² , E. Alvarez-Alfaro⁴ 

* Autor de Contato: autor.contacto@email.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

Recepção: 16/07/2018 | Aceitação: 04/03/2019 | Publicação: 30/04/2019

RESUMO

Este trabalho avaliou o desempenho contra a corrosão de juntas soldadas de metais dissimilares, estudando a união aço carbono ASTM A 615 com aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 como metais básicos, e como metal de enchimento eletrodo ER-309L, utilizando nos metais base, bisel único de 45 °. Metade dos corpos-de-prova foram submetidos a um processo com eletrodo fundido tipo Inconel 182. Os resultados eletroquímicos mostram que, apesar dos defeitos apresentados na fusão do eletrodo, eles formam capa passiva em meio alcalino. Os corpos de prova fundido na união com eletrodo tipo Inconel 182, apresentaram maior resistência à corrosão e melhor comportamento mecânico.

Palavras-chave: corrosão; soldagem dissimilar; infraestrutura.

Citar como: Ramirez –Soto, J. C. I., Pérez-Quiroz, J. T., Salgado-López, J. M., Martínez-Madrid, M., Pérez-López, T., Rendón-Belmonte, M., Alvarez-Alfaro, E. (2019), “Estudo do comportamento eletroquímico da solda de aço ASTM A 615 com aço inoxidável AISI 304 utilizando eletrodo tipo Inconel 182”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 167 – 184, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.334>

¹ Centro de Investigaciones en Corrosión, México.

² Instituto Mexicano del Transporte, México.

³ Tecnología de Materiales, México.

⁴ Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Querétaro, México.

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, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2019.

Electrochemical behavior of dissimilar welded joints between ASTM A615 and AISI 304 with and without buttering using Inconel 182

ABSTRACT

In this study, the corrosion performance of dissimilar welded joints between ASTM A615 and AISI 304 stainless steel with and without buttering using Inconel 182 was evaluated. In both cases, the filler metal was ER-309L and the base metals were prepared with a 45° single bevel. One half of the specimens were welded with “buttering” using Inconel 182. The electrochemical results showed that despite welding defects, the welded specimens formed a passive layer in alkaline environments. The specimens welded with buttering exhibited the best corrosion resistance and mechanical properties.

Keywords: corrosion; dissimilar welding; infrastructure.

Comportamiento electroquímico de uniones disímiles soldadas entre acero ASTM A615 y AISI 304 utilizando enmantequillado con Inconel 182 y sin enmantequillado

RESUMEN

Este trabajo evaluó el desempeño frente a la corrosión de uniones soldadas disímiles, utilizando como metales base acero al carbono ASTM A 615 y acero inoxidable austenítico AISI 304, y como metal de aporte electrodo ER-309L, se utilizó bisel simple a 45°. La mitad de los especímenes fueron sometidos a un proceso de “mantequillado” utilizando electrodo Inconel 182. Los resultados electroquímicos muestran que, a pesar de los defectos presentados en la unión soldada, estas tienden a pasivarse en medio alcalino, siendo las probetas con mantequillado las menos deterioradas por efecto de la corrosión y su resistencia mecánica no se ve minimizada.

Palabras clave: corrosión; soldadura disímil; infraestructura.

1. INTRODUÇÃO

O material mais comum na construção é o concreto armado, cujas propriedades mecânicas e químicas são importantes para a confiabilidade. No entanto, o comprometimento de estruturas de concreto, em geral está associado à corrosão nas armaduras, e isso tem sido relatado na literatura (Pérez, 2009). A maioria das pontes e píers no México foram construídas usando concreto armado com aço carbono. Uma exceção é o píer em Progreso, Yucatán e algumas seções do píer em Coatzacoalcos, Veracruz. O primeiro utiliza aço inoxidável como armadura e o segundo, aço galvanizado. Esta informação indica que a resistência contra ambientes agressivos é limitada (especialmente no caso de ambientes com íons cloreto e dióxido de carbono). Tradicionalmente, diferentes tipos de métodos são aplicados para neutralizar os danos causados pela corrosão em estruturas de concreto. Esses métodos podem ser classificados em quatro categorias com base no mecanismo de proteção (Kepler, 2000):

- **Modificação da matriz de concreto**

Relação água / cimento; Adicionando materiais cimentícios

- **Métodos de Barreira**

Revestimentos poliméricos; Pinturas; Revestimentos metálicos

- **Métodos eletroquímicos**

Proteção catódica por corrente impressa (ICCP) ou ânodos galvânicos (CPGA); Inibidores de corrosão; Extração eletroquímica de íons cloreto; Re-alcalinização eletroquímica.

● **Reabilitação de estruturas de concreto com novos materiais.**

Materiais compósitos, aço inoxidável.

As técnicas de reabilitação e renovação são muitas e diversas; algumas são aplicadas ao aço, outras no concreto e outras em ambos os materiais (Gonzalez 2010). A preservação da infraestrutura é vital tanto em termos econômicos quanto sociais, porque fornece segurança e apoio o desenvolvimento social. No entanto, as estruturas de concreto corroem e devem ser reparadas após 10, 20 ou 30 anos de serviço, porque as conseqüências afetam não apenas a integridade estrutural, mas também a estética, a imagem institucional e até segurança humana. Além disso, a corrosão reduz a funcionalidade e o valor de uma estrutura, levando a grandes despesas financeiras necessárias para reparar, reformar ou substituir a infraestrutura corroída. Devido a estas razões, existe a necessidade de se desenvolver processos para o controle e prevenção da corrosão em barras de aço de armadura embutidas em estruturas de concreto (Rougier, 2010; Terradillos, 2008). Dessa forma, armaduras de aço inoxidável para estruturas de concreto representam uma opção atrativa que vem sendo proposta há vários anos para aumentar a resistência do concreto em ambientes agressivos (BSSA, 2003; Medina, 2013).

Muitos pesquisadores, por exemplo Brown (1976), Treadaway (1989), Sorensen (1990), Nurnberger (1996) McDonald (1998), Pedferri (1997), Bertolini (1998) e Baltazar (2007), realizaram estudos para avaliar o comportamento do aço inoxidável como armadura para estruturas de concreto. Por outro lado, Lundin (1982), Doddy (1992), Ospina (2007), García (2011) e Pérez-Quiroz (2016) pesquisaram as propriedades metalúrgicas e mecânicas de juntas soldadas dissimilares, e seus resultados demonstraram que a aplicação dessas juntas é viável para a reabilitação de estruturas de concreto. Considerando que o aço inoxidável é mais caro que o aço carbono, as armaduras de carbono e aço inoxidável podem ser unidas por conectores ou juntas de solda para melhorar a resistência à corrosão de uma estrutura de concreto e reduzir custos.

Perez Quiroz (2016) apontou que, para evitar a difusão de carbono no aço inoxidável e minimizar o risco de danos devido à corrosão durante a soldagem, o uso de fusão tipo o eletrodo Inconel 182 é uma boa opção. Assim, é desejável investigar a metalurgia de juntas soldadas dissimilares e o comportamento de corrosão de tais uniões soldadas. Atualmente, existem poucos estudos que avaliam o comportamento de corrosão das juntas entre o carbono e o aço inoxidável com e sem fusão usando Inconel. Portanto, neste trabalho foi testada a resistência à corrosão de juntas soldadas entre barras de aço carbono e inox com e sem fusão de eletrodo Inconel 182 para avaliar esta metodologia de reabilitação de estruturas de concreto de pilares marítimos (Fig. 1).

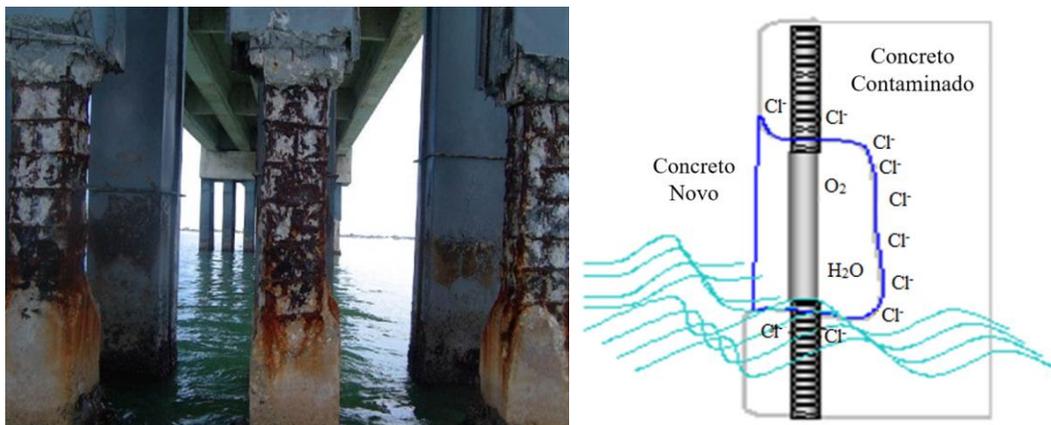


Figura 1. Reparo de estruturas de concreto usando aço inoxidável proposto por Pérez Quiroz, (2009)

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os materiais e processos aplicados neste projeto foram selecionados sob dois critérios: custo da(s) junta(s) e viabilidade para aplicação em campo do processo de soldagem e eletrodos. A Tabela 1 lista os materiais, equipamentos e produtos químicos que foram usados nesta pesquisa, e a Tabela 2 fornece as composições químicas dos metais de base, do eletrodo 309L e do metal de enchimento Inconel.

Tabela 1. Materiais, equipamentos e soluções químicas.

Materiais	Equipamento	Soluções Químicas
barras de armadura ASTM A615 barras de armadura AISI 304 Eletrodo ER 309L Eletrodo Inconel 182	Máquina de corte Máquina de corte automática de disco Máquina de torno convencional Fresadora convencional Castolin Eutectic, Master NT2000 máquina de solda AC/DC Máquina de eletro-descarga Moagem de disco duplo Máquina de polir disco duplo Aquecedor magnético Multímetro Fluke Equipamento Gamry interface1000 Eletrodo de referência Ag/AgCl	3.5% em massa de solução de cloreto de sódio (NaCl) (água do mar). Solução saturada de hidróxido de cálcio Ca(OH) ₂

Tabela 2. Composições químicas de metais básicos, eletrodo 309L e metal de enchimento Inconel.

Aço	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Fe
ASTM A 615	0.24	0.18	0.77	0.03	0.03	0.08	0.04	0.07	0.01	0.01	0.23	98.3
AISI 304	0.01	0.33	1.39	0.07	0.03	18.1	0.27	8.61	0.01	0.18	0.38	74.1
Elemento	C		Mg		Si		Cr		Ni		Fe	
Composição 309L (%)	0.03		1.92		0.80		23.8		13.3		Balanço	
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Fe	Ti		
Composição Inconel (%)	<0.1	<1	5-9.5	<0.03	<0.015	13-17	>59	1-2.5	<10	<1		

A identificação das amostras foi feita conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3. Designações de amostras de ensaio.

Designação	Tipo de amostra
A.C. SW	Aço carbono ASTM A615 em solução de NaCl a 3,5% em peso
A.I. SW	Aço inoxidável AISI 304 em solução NaCl a 3,5% em peso
A.C. HC	Aço carbono ASTM A615 em hidróxido de cálcio
A.I. HC	Aço inoxidável AISI 304 em hidróxido de cálcio
junta soldada dissimilar BsAM1	Junta em bisel única sem fusão exposta à solução de 3,5% em peso de NaCl
junta soldada dissimilar BcAM2	Bisel único com fusão do Inconel 182, exposto à solução de 3,5% em peso de NaCl
junta soldada dissimilar BsHC1	Junta de bisel única sem fusão de Inconel 182, exposto à solução de hidróxido de cálcio
junta soldada dissimilar BcHC2	Junta cônica única com fusão, exposta à solução de hidróxido de cálcio

As amostras foram constituídas de barras de aço carbono e inox com as seguintes dimensões: 1,9 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento (Fig. 2). O bisel da junta foi preparado a 45°, de acordo com NMX-H-121-1988 e ANSI / AWS D1.4-M 2005. O processo de soldagem para as juntas foi Soldagem por Arco Metálico Blindado (SMAW), porque este processo é o mais utilizado na soldagem, em canteiro, de armaduras.

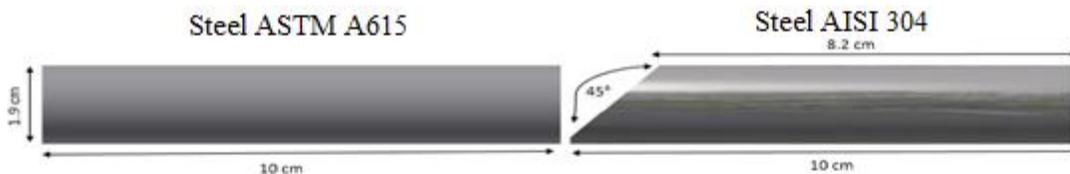


Figura 2. Diagrama de uma junta soldada com um único bisel a 45°.

O metal de adição aplicado para as juntas soldadas foi o aço inoxidável AISI 309L. No caso da soldagem com fusão, o eletrodo era Inconel 182. Esta etapa consistiu em aplicar uma camada de 2 mm de espessura na superfície frontal da barra AISI 304. A máquina de solda foi um Eutectic Castolin, Master NT2000 AC / DC e os parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de soldagem.

Diâmetro da barra (mm)	19
Diâmetro do eletrodo (mm)	3.2
Potencial elétrico (V)	22
Intensidade de soldagem (A) DC-PI	90-95
Velocidade de soldagem (mm/min)	45
Entrada de calor (kJ/mm)	2.5

Após a soldagem, as amostras foram cortadas longitudinal e transversalmente com uma máquina de descarga elétrica ACTSPARK. As amostras foram montadas em epóxi e depois preparadas para metalografia de acordo com ASTM E 3. Antes do polimento, o metal base de aço inoxidável de

cada amostra foi perfurado para introduzir um fio de cobre para obter o contato elétrico necessário para o ensaio eletroquímico. O comportamento de corrosão da junta dissimilar soldada foi avaliado com um potenciostato Gamry Interface 1000 (Fig. 3) aplicando as seguintes técnicas eletroquímicas: medida do potencial de corrosão de acordo com ASTM C 876; ensaio de resistência de polarização linear de acordo com ASTM G 59, e medição de ruído eletroquímico conforme com ASTM G 199.

Resistência de Polarização Linear (LPR)

Esta técnica consiste em medir a relação entre o potencial e a densidade de corrente em regime permanente, excitando o sistema pela aplicação de sinais de corrente contínua. Para a realização do ensaio de Rpl, utilizou-se uma célula de três eletrodos: a referência (Ag / AgCl), um eletrodo auxiliar (grafite), e o eletrodo de trabalho foi uma amostra de CA/SS. Os eletrodos mencionados foram colocados na célula e o ensaio de Rpl foi realizado usando o potenciostato Gamry interface1000 com as seguintes configurações: varredura de +/- 20 mV com uma taxa de varredura de 10 mV / min, de acordo com ASTM G 59.

Ruído Eletroquímico (EN)

O ruído eletroquímico é uma técnica que mede as flutuações espontâneas do potencial e da corrente em sistemas eletroquímicos, que são de baixa frequência (<10 Hz) e amplitude. O ruído eletroquímico origina-se, em parte, de variações naturais na cinética eletroquímica durante um processo de corrosão. Frequentemente, o EN é considerado e analisado como um fenômeno aleatório (estocástico) acoplado à cinética determinística.

A técnica EN foi realizada com a ajuda de um potenciostato Gamry Interface 1000. Este equipamento é capaz de medir em tempo real os fenômenos de redução de óxidos que ocorrem nos eletrodos. O número de leituras por peça de ensaio foi 2048, com tempo de estabilização de 10 s; o tempo de ensaio foi de 45 min. Este ensaio requer três eletrodos, dois idênticos, que consistem em prata / cloreto de prata Ag/AgCl, e um de referência.

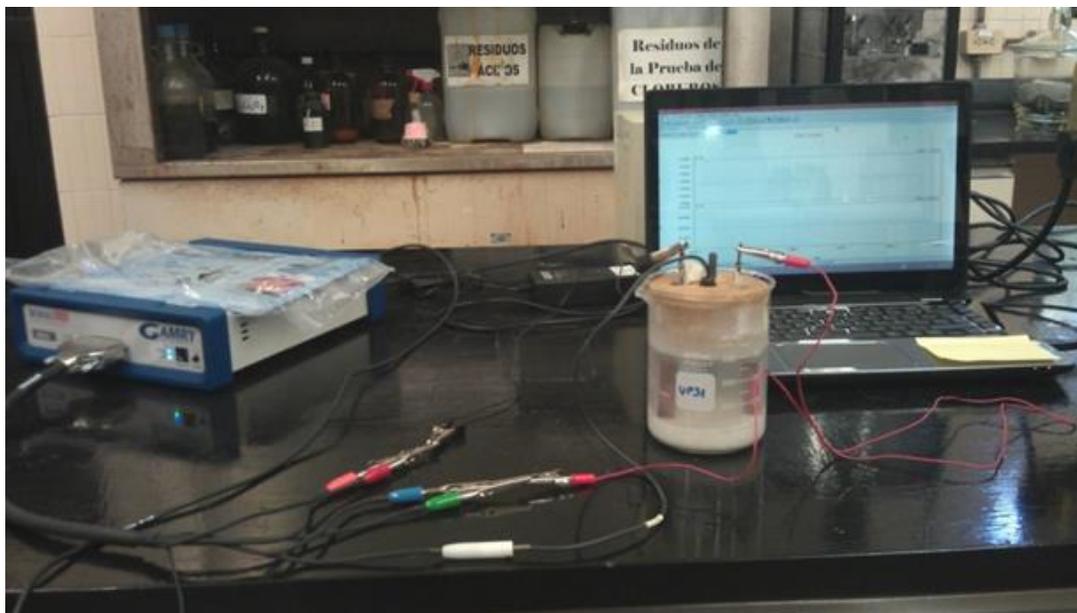


Figura 3. Configuração de célula eletroquímica para ensaios de corrosão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes do ensaio eletroquímico, as amostras foram observadas usando um microscópio estereoscópico, e foram observadas fissuras nas amostras onde foi realizada a aplicação de eletrodo fundido (Fig. 4); essas fissuras (aproximadamente 2 mm de comprimento) estão associadas a fissuras a quente devido ao teor de níquel no Inconel 182 utilizado para o revestimento. Lembrese que a fusão é aplicada a juntas soldadas dissimilares para evitar a difusão do carbono, a separação de fases e a precipitação de carbonetos de cromo, pois esses fenômenos influenciam o comportamento da corrosão no aço inoxidável. Os resultados coincidem com os de Evans (1962), que relataram que as ligas de níquel soldadas ao aço inoxidável são suscetíveis a fissuras a quente. As macrografias da Fig. 4 mostram alguma falta de fusão próxima à interface do aço carbono/metal de enchimento. Tais defeitos não devem influenciar o comportamento de corrosão da junta soldada, porque eles estão localizados no interior do metal, mas se o eletrólito entrar em contato com eles, eles se tornariam um ânodo e permitiriam corrosão localizada. Por outro lado, eles têm um forte impacto nas propriedades mecânicas porque atuam como descontinuidades concentradoras de tensões.

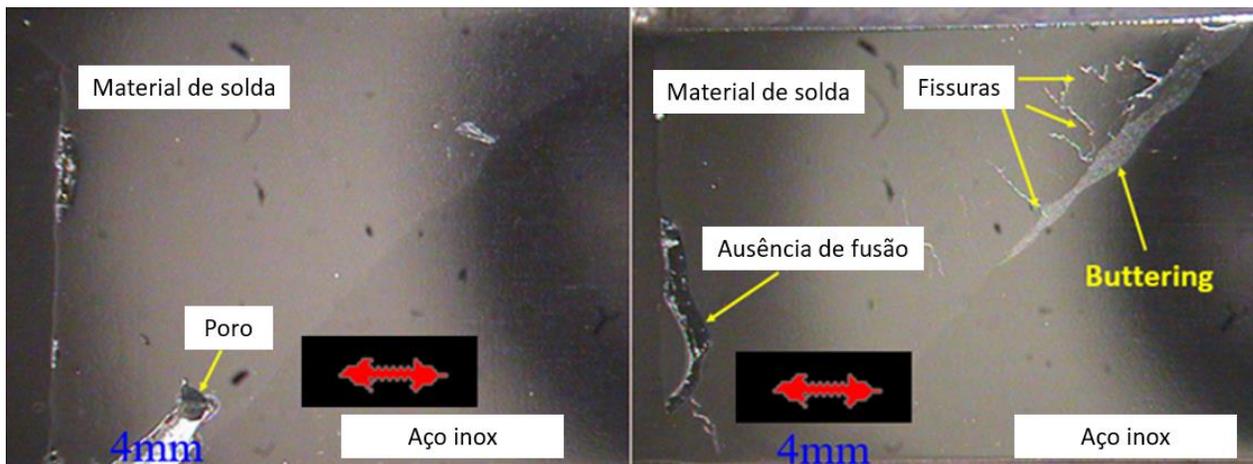


Figura 4. Amostras com aumento de 7x mostrando fissuras e falta de fusão das juntas soldadas dissimilares.

3.1 Potencial de Corrosão (Ecorr)

Na Fig. 5 são mostrados os resultados do potencial de corrosão dos metais de base. As medidas foram realizadas durante 14 dias para amostras imersas em NaCl e Ca(OH)₂. Na Fig. 5, os valores mais negativos ocorrem para o aço carbono em solução salina (A.C.), que simula a água do mar. Tais resultados indicam uma alta probabilidade de corrosão de acordo com a norma ASTM C 876 (2015). Sistonen (2002) indicou que tais valores representam um grave risco de corrosão. No caso do aço inoxidável (A.I.), os resultados do potencial de corrosão são mais positivos do que para o aço carbono na mesma solução e de acordo com a ASTM C876 (2015), os resultados estão dentro da zona de incerteza. Tais resultados podem ser explicados pela camada passiva de cromita no aço inoxidável, que protege o material até certo ponto. Sistonen (2002) sugeriu que o potencial de corrosão deve ser interpretado com base nos critérios mostrados na Tabela 5.

No caso da solução de Ca(OH)₂, os resultados do potencial de corrosão para ambos os materiais base são mais positivos do que na água do mar devido à alcalinidade da solução de Ca(OH)₂, segundo a norma ASTM C 876 (2015). A mesma norma menciona que a probabilidade de dano do aço carbono nesses ambientes é mínima. Com base nos critérios de Sistonen (2002), ambos os aços estão na categoria de risco médio de corrosão.

Tabela 5. Critérios para o potencial de corrosão de aço carbono e aço inoxidável (Sistonen, 2002).

Condição de corrosão	Barra de aço carbono mV vs CSE	Barra de aço inoxidável mV vs CSE
Risco de baixa corrosão, cerca de 10%	> - 200	> - 100
Risco Médio de Corrosão	- 200 a - 350	- 100 a -250
Alto risco de corrosão <90%	- 350 a - 500	-250 a - 400
Risco de corrosão severa	< - 500	< - 400

A Fig. 6 mostra a relação entre o potencial de corrosão e o tempo para juntas soldadas de chanfro simples em solução de NaCl a 3,5% em peso. Os valores estão dentro da faixa de corrosão de alta probabilidade de acordo com a ASTM C 876 (2015), mas de acordo com Sistonen (2002), eles estão dentro da faixa de risco de corrosão severa. Observe que a variação do potencial de corrosão da amostra BsAM2 foi causada por erro experimental, embora a tendência siga as outras amostras, onde o risco de corrosão é alto.

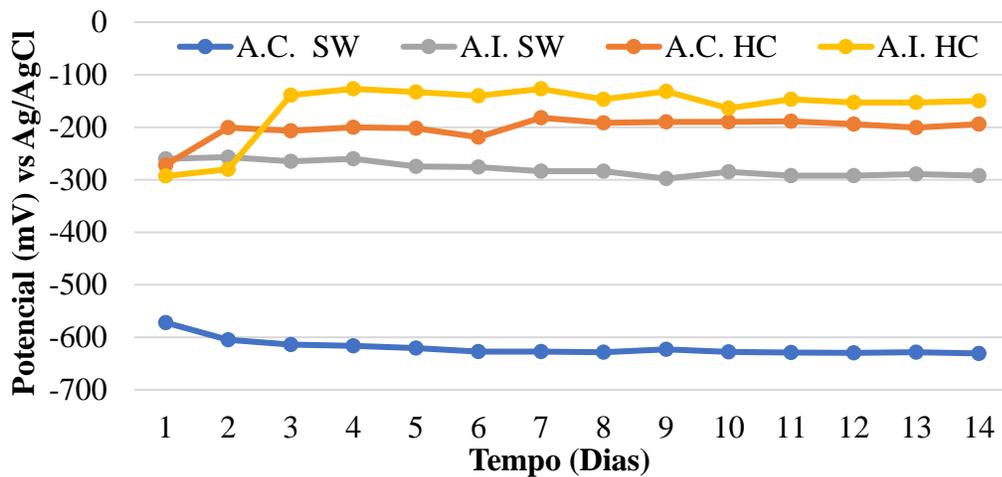


Figura 5. Potencial de corrosão dos metais base na água do mar e hidróxido de cálcio.

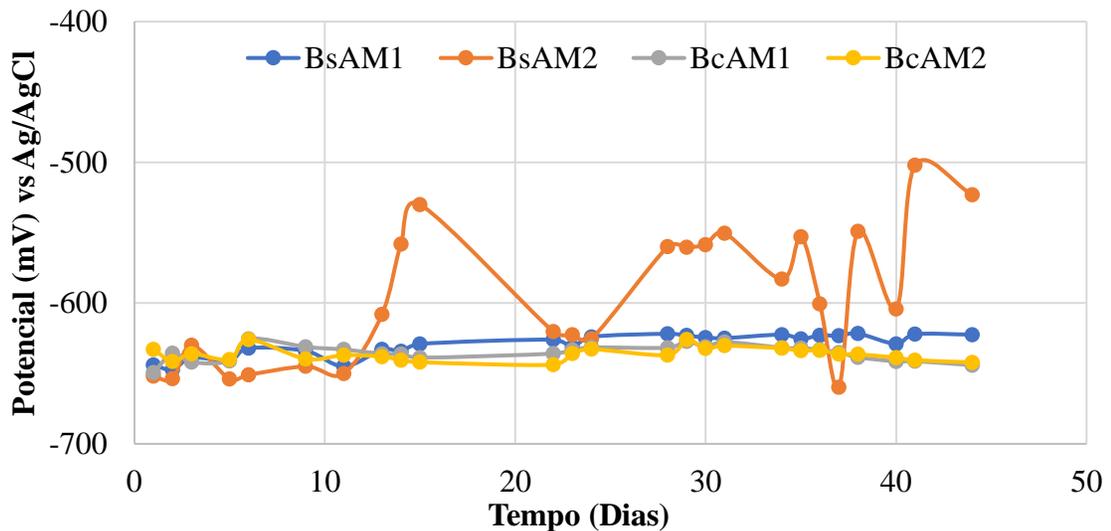


Figura 6. Potencial de corrosão x tempo em juntas soldadas de bisel único na água do mar.

Comparando a Fig. 5 com a Fig. 6, não é fácil detectar qualquer efeito do processo de fusão sobre o potencial de corrosão. No entanto, tal comparação indica que o potencial de corrosão de uma junta inteira caiu para valores mais negativos, que são muito semelhantes aos valores de aço carbono imersos na água do mar. Esses resultados indicam maior suscetibilidade à corrosão.

Com relação às amostras nas soluções de cloreto de sódio (NaCl) e hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a tendência dos valores de potencial de corrosão em relação ao tempo está entre -0.500 V a -0.670 V vs. Ag / AgCl , porque o metal mais ativo é o aço carbono (Figura 5) de acordo com ASTM G 82. Como o potencial de corrosão do aço carbono é, aproximadamente -0.600 V , e o potencial do aço inoxidável é -0.300 V . Ag / AgCl (Fig. 5) os valores potenciais mostrados na Fig. 6 em relação à ASTM C876 indicam que existe uma probabilidade de 90% de corrosão, porque são mais negativos do que $-0,350 \text{ V}$ Ag / AgCl . A Fig. 6 também mostra que o valor do potencial de corrosão está na faixa de -0.500 V a -0.650 V Ag / AgCl .

Amostras com maior número de defeitos (poros, fissuras, etc.) foram selecionadas para ensaios em hidróxido de cálcio para investigar se geraram uma camada passiva, o que reduz a taxa de corrosão. A Fig. 7 mostra os resultados, indicando que após 15 dias, os valores estão na faixa provável de corrosão de acordo com ASTM C 876 (2015) e Sistonen (2002). No entanto, após 20 dias, os potenciais de corrosão mudaram para valores mais positivos. Estes resultados indicam que o processo de corrosão ocorreu durante os primeiros 14 dias, após que uma camada passiva compacta e aderente foi formada na superfície das amostras devido à alcalinidade do ambiente, de acordo com ASTM C 876 (2015) e Sistonen (2002). Assim, com base nesses critérios, outros danos por corrosão em aço carbono, aço inoxidável e juntas soldadas devem ser mínimos. Note que para este ensaio, amostras com um maior número de defeitos foram selecionadas (com e sem fusão de eletrodo). Assim, os resultados sugerem que em ambiente alcalino os danos por corrosão seriam mínimos.

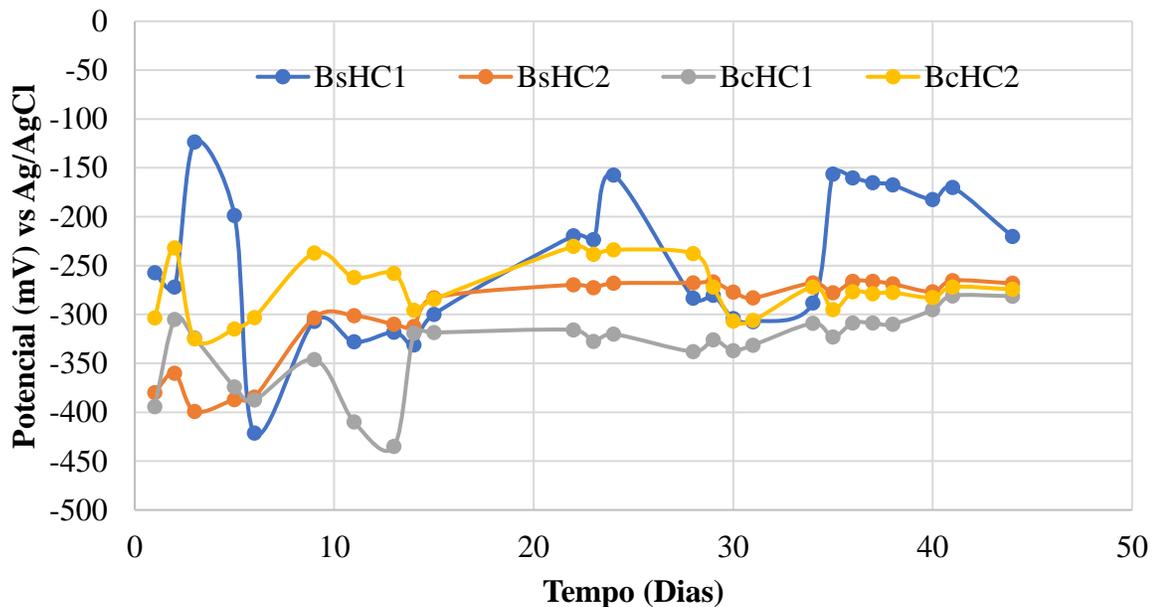


Figura 7. Potencial vs tempo para junta soldada de chanfro simples em hidróxido de cálcio

3.2 Medições da taxa de corrosão com base na resistência à polarização.

A Fig. 8 mostra as taxas de corrosão para as amostras imersas na água do mar, onde todas as taxas estão na faixa entre 0,15 a 0,25 mm/ano. Os valores são 10 vezes superiores às recomendações feitas pelo grupo DURAR (1997). Assim, pode-se afirmar que a corrosão sob estas condições é inevitável para o material de base e o metal de enchimento. Como mencionado anteriormente, a

conexão elétrica da amostra BsAM2 foi perdida, indicando porque os valores dessa amostra são quase zero.

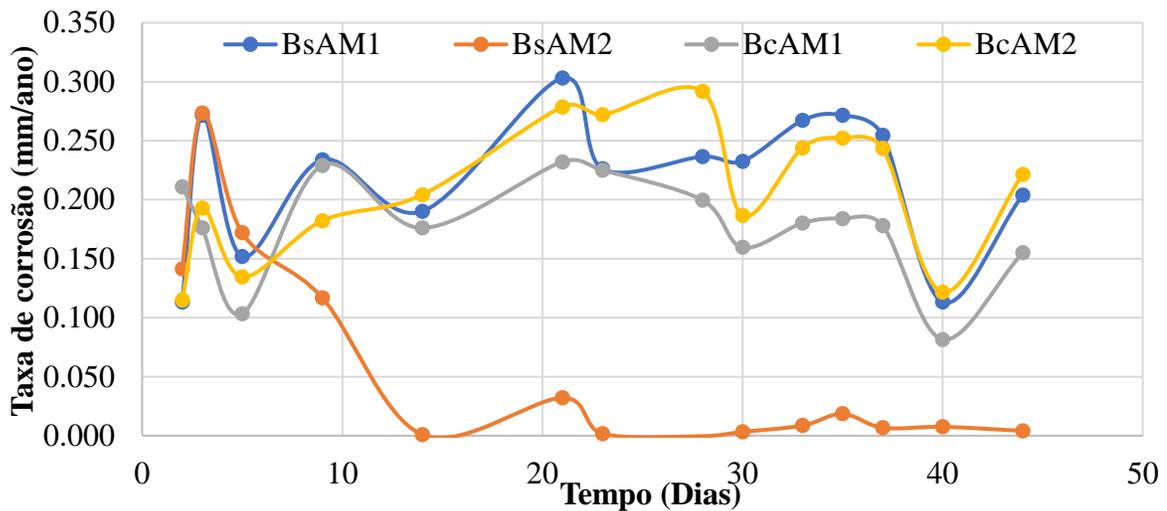


Figura 8. Taxa de corrosão de juntas soldadas de bisel único na água do mar.

A Fig. 9 mostra as alterações na taxa de corrosão do hidróxido de cálcio, que estão relacionadas ao início do processo de corrosão e à possível passivação das superfícies da amostra, devido ao meio alcalino no qual as amostras foram testadas

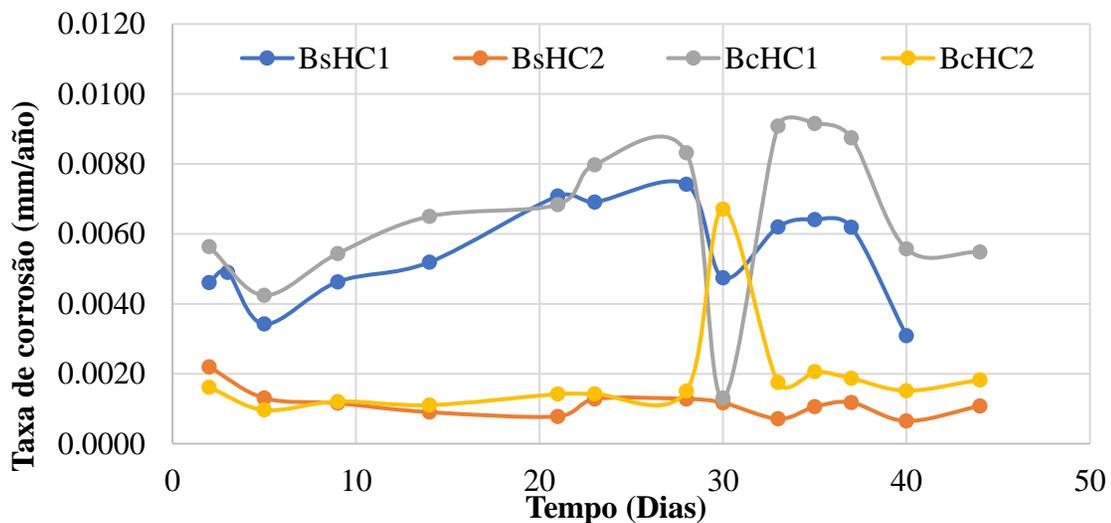


Figura 9. Taxas de corrosão de juntas soldadas de bisel único em hidróxido de cálcio.

A Fig. 9 mostra as taxas de corrosão das juntas soldadas imersas em uma solução de hidróxido de cálcio, que são muitas vezes menores que as taxas de corrosão na água do mar (ver Fig. 8). Como mencionado anteriormente, isso pode ser explicado pela formação da camada passiva devido ao ambiente alcalino da solução, mesmo com os defeitos de soldagem mostrados na Fig. 4. Esses fatos suportam o argumento de que o aço inoxidável é uma boa opção para substituir parcialmente o aço carbono em armaduras em estruturas de concreto, como mostrado na Fig. 1. Além disso, supondo que as barras de aço inoxidável estivessem embutidas em concreto novo, o material já estaria passivado e danos severos à corrosão não ocorreriam rapidamente. A afirmação anterior é justificada pelo diagrama de Pourbaix (1966), que indica que nas faixas alcalinas, o aço carbono é protegido por passivação.

Pesquisadores como Medina (2012), Bastidas (2014), Velasco (2013), Sanchez (2013), Bautista (2013), Acosta (2013), Landmann (2013), Andrade (1993) e González (1984) relataram bom desempenho do aço inoxidável, mesmo em ambientes salinos, porque o nível perigoso da taxa de corrosão para estruturas de concreto (100–125 mm / ano) é maior do que os resultados obtidos para o aço inoxidável. A Fig. 8 verifica se as taxas de corrosão das amostras são maiores do que a faixa recomendada de taxas, enquanto a Fig. 9 indica que as taxas de corrosão são substancialmente mais baixas do que aquelas faixas. Assim, reparos usando aço inoxidável satisfariam a especificação para um ambiente alcalino.

3.3 Medições da taxa de corrosão por ruído eletroquímico.

O efeito metalúrgico do comportamento de corrosão em juntas soldadas foi avaliado utilizando ruído eletroquímico. Essa técnica consiste em ajustar dois eletrodos em um eletrólito, conforme descrito no Capítulo 2 da ASTM C 199 e é mostrado na Fig. 3. Os resultados dessa técnica são mostrados nas Fig. 10–13. Duas variáveis caracterizam o comportamento de corrosão das amostras: resistência ao ruído (R_n), equivalente à resistência à polarização; e a segunda variável é o índice de localização (IL), que indica a forma de corrosão das amostras. Os seguintes critérios se aplicam: corrosão uniforme (0,001 a 0,01), mistura entre corrosão uniforme e localizada (0,01 a 0,1) e, finalmente, corrosão localizada (0,1 a 1). Esses critérios foram previamente considerados por Eden (1987), Kelly (1996), Mansfeld (1999) e Balan (2017).

A Fig. 10 mostra que os valores de IL das amostras de BsAM estão na faixa de corrosão localizada. Lembre-se de que essas amostras não tinham camada fundida e estavam imersas na água do mar. Portanto, a corrosão é esperada nessas amostras. A Fig. 11 mostra que os produtos de corrosão estão em pontos específicos das superfícies da amostra, conforme previsto pela norma ASTM G 199.

Embora os valores de IL das amostras de BcAM estejam na faixa de corrosão localizada, os produtos de corrosão são distribuídos uniformemente nas superfícies das amostras, o que está mais de acordo com o critério de corrosão uniforme. Isso sugere que a aplicação de fusão leva a uma corrosão mais uniforme. O consenso científico geral é que a corrosão uniforme é menos agressiva do que a corrosão por pite e em fresta, porque os últimos tipos de corrosão causam danos estruturais e podem levar a uma falha catastrófica.

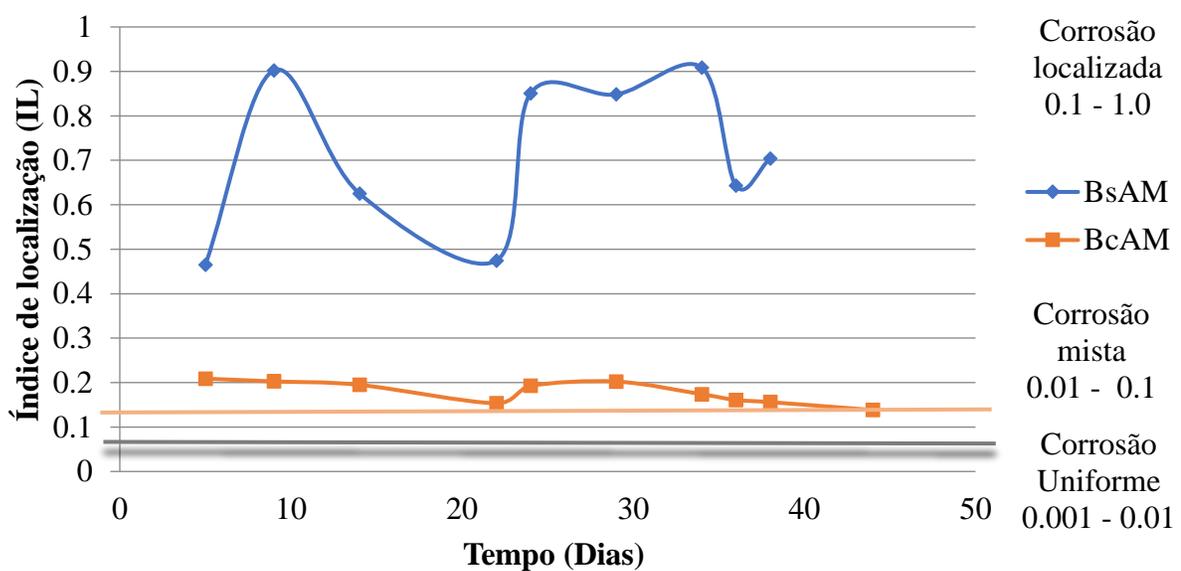


Figura 10. Resultados do ensaio de ruído eletroquímico de amostras de BsAM e BcAM na água do mar.

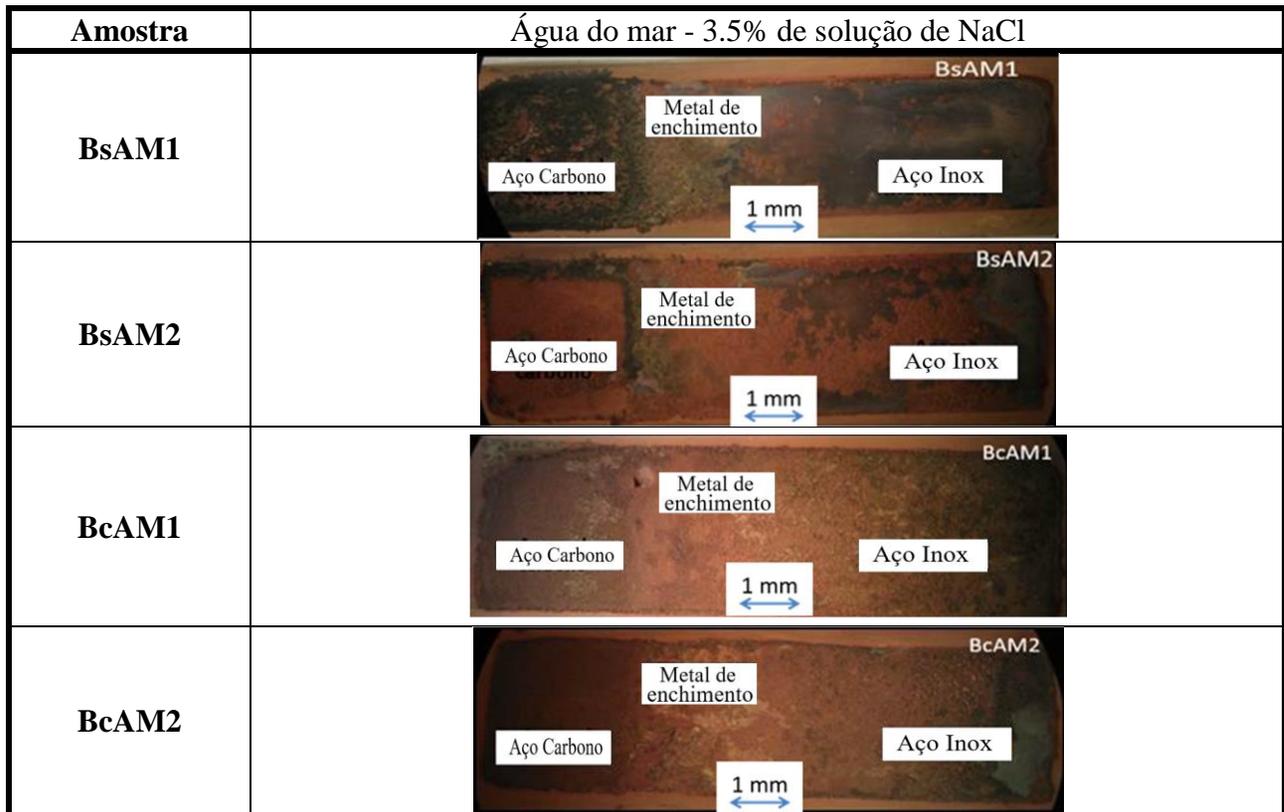


Figura 11. Imagens estereográficas de BsAM e BcAM testadas em água do mar (solução a 3,5% em peso de NaCl).

A Fig. 12 mostra os resultados das amostras testadas em hidróxido de cálcio. Esses resultados indicam que a corrosão localizada ocorre nos defeitos da junta soldada (como pode ser observado na Fig. 13), onde tal corrosão ocorre pela formação de células de corrosão por aeração diferencial. A amostra BsHC, que não continha defeitos de soldagem, exibiu uma camada branca na superfície da junta soldada (Fig. 13), que inibia a corrosão. Portanto, os únicos locais suscetíveis à corrosão localizada foram os defeitos de soldagem.

Neste caso, o comportamento da amostra BsCH está relacionado com o gráfico da Fig. 12. Esta amostra apresenta uma tendência de corrosão semelhante ao BcCH, porque os resultados de ambas as amostras estão na faixa de corrosão localizada. No entanto, no caso do BcHC, considera-se que a corrosão está associada a defeitos de soldagem, bem como à dissolução localizada da camada de níquel. Como explicado por Pourbaix (1966), o níquel corrói levemente em soluções alcalinas antes de formar uma camada passiva. O comportamento da amostra BcHc concorda com esta afirmação e explica as diferenças nos resultados entre as duas amostras.

A Fig. 13 mostra imagens estereográficas de amostras testadas em hidróxido de cálcio, as quais foram cobertas com uma camada de cor branca (depósito calcário), que forma uma camada passiva nas superfícies das amostras.

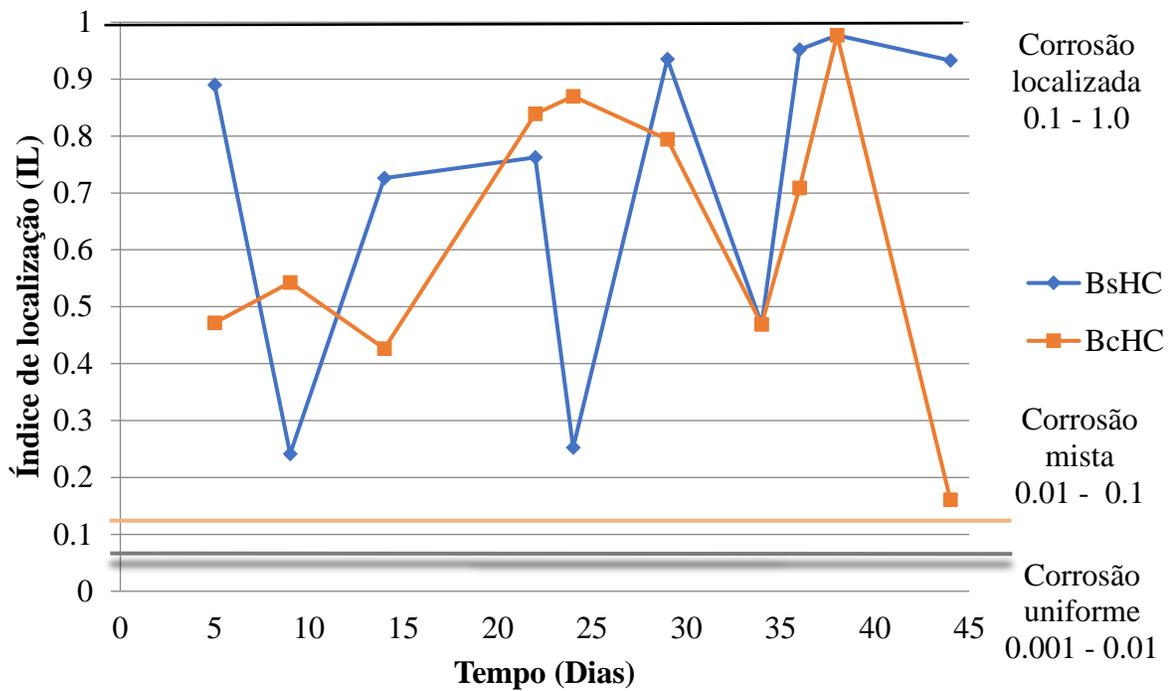


Figura 12. Gráfico dos valores de IL para as amostras BsHC e BcHC testadas em hidróxido de cálcio.

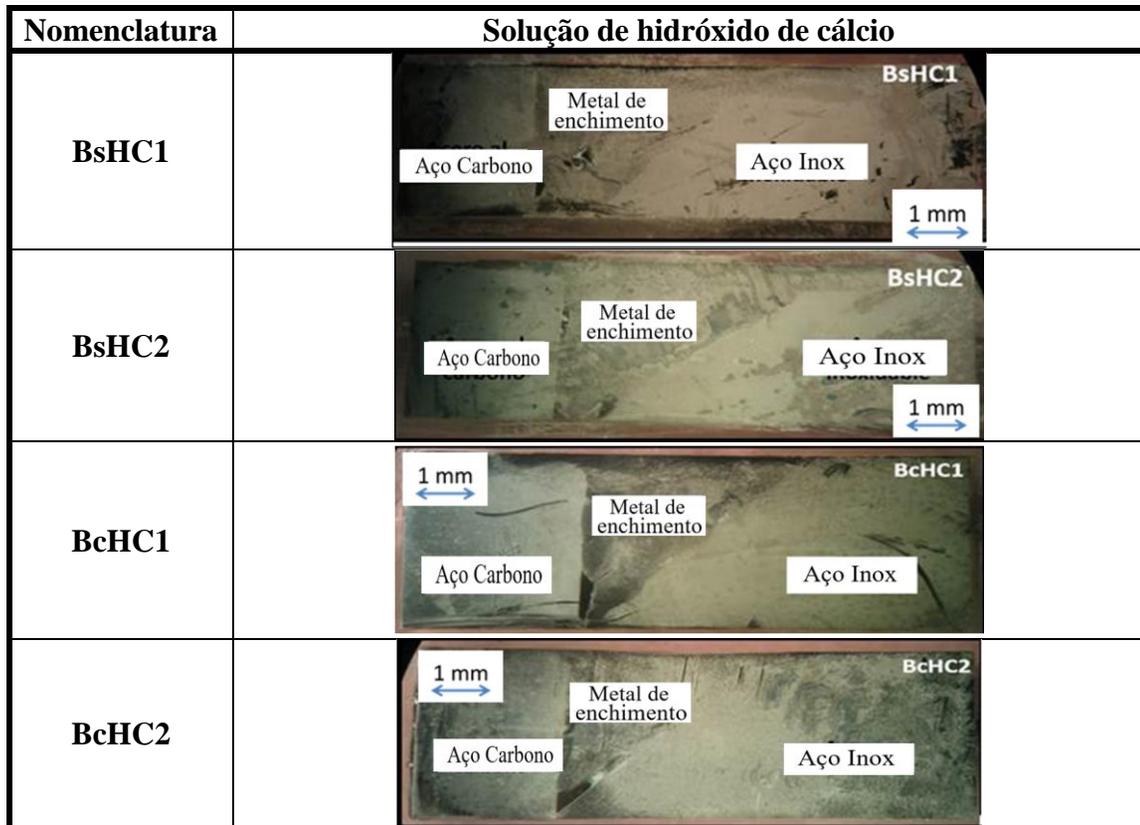


Figura 13. Superfícies de amostras de BsHC e BcHC após ensaio em hidróxido de cálcio.

O ruído de resistência (Rn) é uma ferramenta muito poderosa para avaliar a baixa taxa de corrosão das amostras de BsHC e BcHC imersas em hidróxido de cálcio, e é semelhante à resistência à

polarização. Portanto, essa técnica foi aplicada a essas amostras e os resultados são mostrados nas Fig. 14 e 15. O ASTM G 102 (2015) especifica a relação entre R_p e i_{corr} , que é inversamente proporcional. Em outras palavras, quanto maiores os valores de resistência a ruído, menor a densidade de corrente de corrosão, indicando uma menor taxa de corrosão. Amostras em água do mar (solução NaCl 3,5% em peso) apresentaram menores valores de resistência a ruídos do que as amostras na solução de $Ca(OH)_2$, portanto apresentaram maior densidade de corrente de corrosão, indicando maiores taxas de corrosão. As Fig. 14 e 15 destacam esses resultados. Os resultados concordam com os resultados relatados por Kelly (1996) e Garcia (2014).

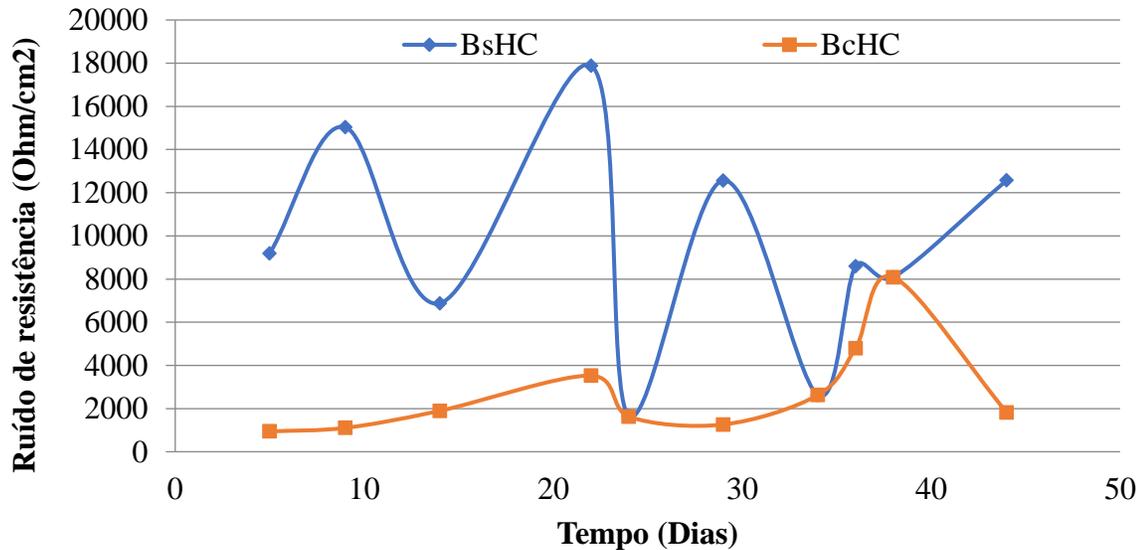


Figura 14. Resistência do ruído (R_n) das amostras de BsHC e BcHC ensaiadas em solução salina.

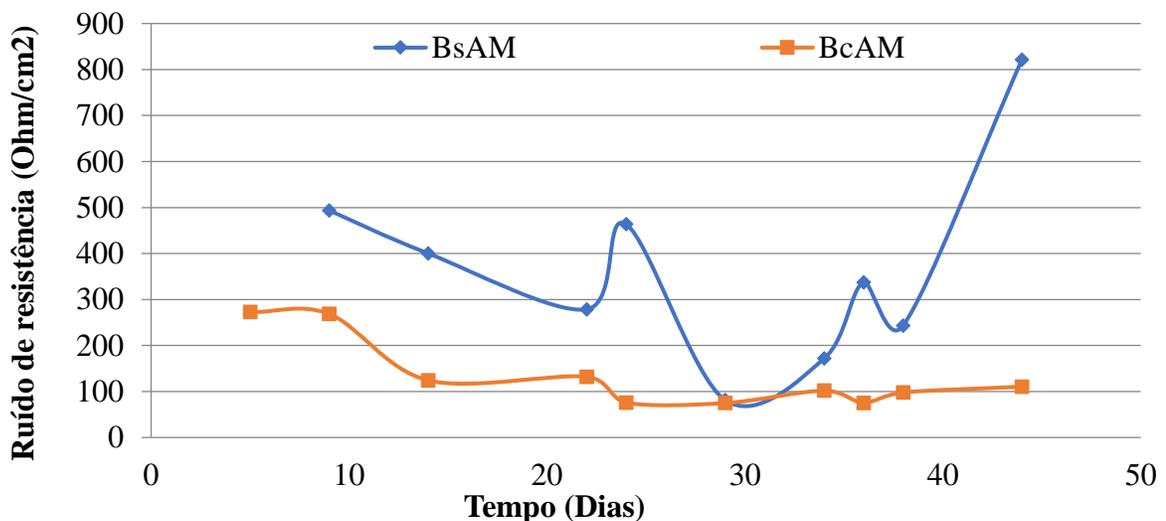


Figura 15. Valores de R_n para BsHC e BcHC ensaiados em hidróxido de cálcio.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho indicam que a reabilitação de estruturas de concreto usando aço inoxidável é viável, particularmente se o aço é passivado por um ambiente de entorno alcalino, ou

seja, por uma argamassa ou concreto “novo”. A construção ou reparo de uma estrutura de concreto deve ser realizada seguindo as normas aplicáveis, a fim de comprovar que a área reparada será passivada para reduzir o risco de corrosão futura.

Medições do potencial de corrosão foram úteis para determinar o comportamento de corrosão em dois ambientes diferentes para emendas de barras de aço carbono, com aço inoxidável e uma junta de metal dissimilar soldada entre os dois materiais com fusão de eletrodo tipo Inconel 182, comparativamente a juntas sem fusão de eletrodo. Descobriu-se que o aço carbono na água do mar é suscetível a corroer com 90% de probabilidade, enquanto o aço inoxidável está na faixa de incerteza. No entanto, resultados essencialmente opostos foram obtidos para um ambiente alcalino (solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$), onde a probabilidade de corrosão foi de 10%.

Ambas as juntas de soldagem dissimilares com e sem o uso de eletrodo fundido resultaram em uma probabilidade de 90% de corrosão na água do mar, enquanto nos meios alcalinos a probabilidade de corrosão para qualquer junta diminuiu para 10%. Isso foi explicado por uma camada passiva encontrada nas superfícies das amostras.

A taxa de corrosão da junta soldada com eletrodo fundido foi menor em meio alcalino (solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) do que na água do mar (solução de NaCl 3,5% em peso). Esses resultados também foram explicados pela formação de uma camada passiva sobre os defeitos superficiais das amostras no ambiente alcalino.

Os resultados do ruído eletroquímico foram úteis para descrever o comportamento eletroquímico na solução alcalina e na água do mar de juntas soldadas com e sem fusão de eletrodo. Os resultados indicaram que o tipo de corrosão em tais amostras foi a corrosão uniforme, menos grave, e eles correspondem aos resultados obtidos por medidas de resistência à polarização e por potencial de corrosão.

5. REFERÊNCIAS

Acosta, P., Matres, V., Pachón, A., Sánchez, J., Fulla, J., Picón, J. M. (2013). “*Armaduras de acero inoxidable expuestas en ambiente marino. Caracterización in-situ de la corrosión*”. DM Bastidas, E. Medina Sánchez, CEDINOX (Eds.), *Armaduras Acero Inoxidable*, CEDINOX, Madrid (España), 115-128.

American National Standards - American Welding Society (2005) *ANSI/AWS D1.4-M Structural Welding Code - Reinforcing Steel*.

ASTM International. (2014). *ASTM G59-97(2014) Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/G0059-97R14>

ASTM International. (2014). *ASTM G199-09(2014) Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/G0199-09R14>

ASTM International. (2015). *ASTM C876-15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0876-15>

ASTM International. (2015). *ASTM G102-89(2015)e1 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/G0102-89R15E01>

ASTM International. (2017). *ASTM E3-11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/E0003-11R17>

Balán-Ortiz, C. A., Luna Brito, M., Pérez López, T.; Camacho-Chab, R.J. (2017) “*Análisis estadístico de los registros de ruido electroquímico obtenidos del proceso de corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto*”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2017, 16 (1). ISSN 1665-2738, Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62049878028>

- 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*, 13 (36), 353- 357. Disponible en: <https://www.redalyc.org/html/849/84903663/>
- Bastidas, D. M., Zapico, C. (2014). “Comportamiento frente a la corrosión de armaduras de acero inoxidable dúplex en solución simulada de poros de hormigón con elevado contenido de cloruros”. *Industria química*, ISSN 2340-2113, N°. 17, 2014, págs. 68-74
- Bautista, A., Paredes, E. C., Velasco, F. (2013). “Influencia del corrugado en la durabilidad de las barras austeníticas en medios sin carbonatar y con cloruros”. *Armaduras de Acero Inoxidable*, ISBN 978-84-695-8183-4, págs. 105-114
- Bertolini, L., Gastaldi, M., Pastore, T., Pedferri, M. P., Pedferri, P. (1998). *Effects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcement in concrete*. International Conference on “Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures”, Federal Highway Administration, Orlando. December 7–11.
- Brown, B. L., Harrop, D., Treadaway, K.W.J. (1976) “*Corrosion Testing of Steels for Reinforced Concrete Corrosion Testing and Monitoring*”, Reprint.
- British Stainless Steel Association (BSSA) (2003) “*The Use of Stainless Steel Reinforcement in Bridges*”, Special BSSA Report - April 2003, Disponible en: <https://www.bssa.org.uk/cms/File/REBar%20report.pdf>
- Doddy, T. (1992), “*Intermediate mixed zones in dissimilar metal welds for sour service*”, *Welding Journal*, 71 (3), pp. 55-60.
- DURAR (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales Maracaibo, Venezuela, ISBN 980-296-541-3.
- Dirección General de Normas Mexicanas (1988). *NMX-H-121: Procedimiento de soldadura estructural acero de refuerzo*”.
- Eden, D. A., John, D. G., Dawson, J. L. (1987), *Corrosion monitoring. International Patent WO 87/07022*. World Intellectual Property Organization, 19.
- Evans, R. M. (1962). “*Joining of Nickel-Base Alloys*”, (No.181). DMIC Report 181, Battelle Memorial Institute, Columbus 1, Ohio
- García Fuentes, A., Centeno, L., Salas García, R., Velazquez Del Rosario, A. (2011). *Metalurgia de uniones soldadas de aceros disímiles (ASTM A240–A537) y comportamiento mecánico ante cargas monótonica y cíclica*, *Revista Latinoamericana De Metalurgia Y Materiales*, 2012, 32(1). Recuperado de <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/view/113>
- García, I. L. (2014). “*Caracterización electroquímica del acero al carbono e inoxidable en soluciones concentradas con extracto de cemento*”; Tesis que para obtener el Grado de: Maestría en Ciencias de Materiales.
- González Díaz, F. (2010). “*Recalcinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión*”. Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- González, J. A., Andrade, C., Escudero, M. L., (1984), “*Corrosión de las armaduras por carbonatación del hormigón*”. *Rev. Iberoamericana de corrosión y protección* 15 (4), 11-19.
- Kelly, R. G; M. E. Inman, J. L. Hudson, (1996) “*Analysis of Electrochemical Noise for Type 410 Stainless Steel in Chloride Solutions (STP 1277)*”, *STP 1277 Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications (ASTM International)*, pp. 101-113 DOI: <https://doi.org/10.1520/STP37954S>

- Kepler, J. L., Darwin, D., Locke Jr, C. E. (2000). *Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures* (No. K-TRAN: KU-99-6.). Kansas Department of Transportation
- Landmann, M. S., Fuentes, J. R., Bonaste, V., & Martínez, A. S. (2013). “*Rehabilitación con armaduras de acero inoxidable*”. In *Armaduras de acero inoxidable* (pp. 167-190). ISBN 978-84-695-8183-4
- Lundin, C. D. (1982). *Dissimilar metal welds-transition joints literature review*. Welding Journal, 61(2), 58-63. URL: http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1982_02_s58.pdf
- Mansfeld, F., Sun, Z. (1999), *Technical Note: Localization Index Obtained from Electrochemical Noise Analysis*. Corrosion Science, 55 (10) pp. 915-918 DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3283926>
- McDonald, D. B., Pfeifer, D. W., Sherman, M. R. (1998), *Corrosion evaluation of epoxy-coated, metallic-clad, and solid metallic reinforcing bars in concrete*, Report No. FHWA-RD-98-153, Federal Highway Administration, McLean, VA, December, 137 pp. URL: <https://trid.trb.org/view/496237>
- Medina, E., Cobo, A., Bastidas, D. M. (2012). “*Evaluación del comportamiento estructural y de resistencia a la corrosión de armaduras de acero inoxidable austenítico AISI 304 y dúplex AISI 2304 embebidas en morteros de cemento Portland*”. *Revista de Metalurgia*, 48(6), 445-458. DOI: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1203>
- Medina, E. D. B. (2013). “*Introducción a las Armaduras de acero inoxidable*”, 1-22. URL: <http://hdl.handle.net/10261/85075>
- Molina, F.J., Alonso, C., Andrade, C. (1993), “*Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2—Numerical model*”, *Materials and Structures* 26, 532. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472864>
- Nurnberger, U. (1996), “*Stainless steel in concrete*”. European Federation of Corrosion publications, No. 18. London, Institute of Materials.
- Ospina Lopez, R., Aguirre Corrales, H., Parra, H. (2007). “*Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles*”. *Scientia et technica*, 13(34). Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934046>
- Pedefferri, P., Bertolini, L., Bolzoni, Pastore, F. T. (1997), “*Behavior of Stainless Steels in Concrete*,” *Proceedings of the International Seminar: The state of the art of the repair and rehabilitation of reinforced concrete structures* Eds. W.F. Silva-Araya, O.T. DE RINCÓN, and L. P. O’Neill, (Reston, VA: ASCE, 1997): p.192.
- Pérez, L.T. (2002). “*Aplicación de la Técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en el Estudio de la Corrosión del Acero de Refuerzo Embebido en Concreto*”. Programa de Corrosión del Golfo de México.
- Pérez-Quiroz, J. T., Alonso-Guzmán, E. M., Martínez-Molina, W., Chávez-García, H. L., Rendón Belmonte, M., Martínez-Madrid, M. (2014), “*Electrochemical Behavior of the Welded Joint Between Carbon Steel and Stainless Steel by Means of Electrochemical Noise*”, *International Journal of Electrochemical Science*, pp. 6734 – 6750.
- Pérez Quiroz, J. T. (2009), “*Evaluación de acero inoxidable para la rehabilitación de estructuras de concreto reforzado*”. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Química.
- Pourbaix, M. (1966), *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. Pergamon Press, New York.
- Ramírez-Soto, J. C. I., Salgado-López, J. M., Pérez-Quiroz, J. T., Pérez-López, T., Terán-Guillén, J., & Martínez-Madrid, M. (2016). “*Effect of buttering in mechanical properties of dissimilar metal weld joints for reinforcement bars in concrete structures*”. *Revista ALCONPAT*, 6(3), 248-261.
- Schierloh, M., Rougier, V., Souchetti, R. (2010). “*Vigas de hormigón armado afectadas por corrosión y reparadas con materiales de matriz polimérica reforzados con fibras (PRFS)*”. IX Jornada “*Técnicas de restauración y conservación del patrimonio*”.

- Sánchez, E. M., Llorente, I., Fajardo, S., Bastidas, D. M. (2013), “*Comportamiento frente a la corrosión por cloruros de una nueva armadura de acero inoxidable dúplex de bajo contenido en níquel*”, Armaduras de acero inoxidable, ISBN 978-84-695-8183-4, págs. 91-103, Editores: CEDINOX, Centro para la investigación y desarrollo del acero inoxidable.
- Sistonen, E., Tukiainen, P., Peltola, S., Skriko, S., Lastala, M., Huovinen, S. (1998-2000), *Improving the durability of reinforced outdoor concrete structures by restricting cracks and protecting reinforcement*, part I & II. Project 1998–2002
- Soerensen, B., Jensen, P. B., Maahn, E. (1990), *The corrosion properties of stainless-steel reinforcement*. Corrosion of Reinforcement in Concrete. Ed. by C. L. Page, K. W. J. Treaday, P. B. Bamforth. Papers Presented at the Third International Symposium on "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction", Belfry Hotel, Wishaw, Warwickshire, May 21-24, 1990
- Terradillos, P. G., Llorca, M. Á. C., Gómez, E. Z. (2008). “*Corrosión de Armaduras en estructuras de Hormigón Armado*”. Editorial Club Universitario. ISBN: 978-84-8454-685-6, Sapin.
- Treadaway, K. W. J., Cox, R. N., Brown, B. L. (1989), *Durability of corrosion resisting steels in concrete*. Proceedings Institution Civil Engineers, 86, pp.13–27.
- Velasco Lopez, F. J., Alvarez Arboleda, S. M., Bautista Arija, M. A. (2013), *Comportamiento frente a la corrosión de corrugados dúplex de baja aleación en disoluciones simuladas de poros de hormigón*. In: Armaduras de acero inoxidable, pp. 81-90, ISBN: 978-84-695-8183-4