



Copyright 2019, ABINOX, ABRACO, IPT

Trabalho apresentado durante o INOXCORR 2019 - Seminário Brasileiro de Aços Inoxidáveis como Solução Contra Corrosão, em São Paulo no mês de agosto de 2019.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Aços inoxidáveis duplex em vergalhões para estruturas de concreto

Juliana L. Cardoso^a, Zehbour Panossian^b, Renata A. Brunelli^c,
Marcos V. da S. Braga^d

Resumo

Esse trabalho descreve ensaios de corrosão com barras de aço inoxidável *lean* duplex UNS S32304, embutidas em concreto e na presença de contaminação com íons cloreto. A configuração do corpo de prova de concreto teve como base nas normas ASTM A955:2015 e ASTM G109:2007. Como resultado, notou-se que as barras de aço *lean* duplex permaneceram íntegras, nas condições estudadas.

Palavras-chave: aço inoxidável, concreto armado, ambiente marinho, armadura, cloreto

Introdução

O aço inoxidável é utilizado na construção civil como material estrutural e, também, como armadura de concreto. As armaduras de aço inoxidável são utilizadas em estruturas expostas a ambientes de alta agressividade, como atmosferas marinhas, em regiões de uso intenso de sal de degelo e em indústrias químicas, principalmente na Europa (1,2,3).

Os aços inoxidáveis duplex (DSS) substituíram os aços inoxidáveis austeníticos na construção civil devido ao seu menor preço, propriedades mecânicas mais interessantes e alta resistência a corrosão (4). A alta resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex em meios contendo íons cloreto, de acordo com alguns autores, é decorrente da alta concentração de cromo, molibdênio e nitrogênio na liga (2,5,6).

O contínuo desenvolvimento dos aços inoxidáveis duplex permitiu o desenvolvimento de novas ligas com custo mais acessível, como os aços inoxidáveis *lean* duplex. Os *lean* duplex possuem concentrações mais baixas de Ni e Mo na liga. Com isso, os aços *lean* duplex ampliaram as opções de armaduras de concreto, permitindo um menor impacto econômico nas estruturas de concreto que o utilizam (6,7).

Neste trabalho, é demonstrada a resistência à corrosão do aço inoxidável *lean* duplex embutido em concreto quando submetido à intensa contaminação com íons cloreto.

^a Dra., Bacharela em Engenharia Elétrica – Pesquisadora no Laboratório de Corrosão e Proteção (LCP) do IPT pela Fundação de apoio ao IPT (FIPT) (jcardoso@ipt.br)

^b Dra., Bacharela em Física – Diretora de Inovação do IPT e Professora convidada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) – Departamento de Materiais e Metalurgia (zep@ipt.br)

^c Bacharela em Química, Técnica no LCP - IPT pela FIPT

^d Técnico em Análises Químicas, Técnico no LCP - IPT pela FIPT

Metodologia

Os ensaios com as barras embutidas em concreto foram baseados nas normas ASTM A955:2015 e ASTM G109:2007 (7,8), que descrevem a montagem de corpos de prova de concreto para estudos de pares galvânicos formados entre o mesmo material em contato com o concreto (Figura 1a) em diferentes condições, a saber: metal/concreto contaminado com íons cloreto e saturado (baixo teor de oxigênio); e metal/concreto sem contaminação e mais seco (alto teor de oxigênio) (9). Amostras de armaduras de *lean duplex* UNS S32304 foram adquiridas de um fornecedor europeu. Mais detalhes sobre a preparação dos corpos de prova podem ser encontrados em artigo de Araujo et al. (10).

Tabela 1 - Composição química (% massa, balanço em Fe)

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
UNS S32304 (<i>lean duplex</i>)	0,019	1,45	0,41	0,031	<0,002	23,4	0,25	4,30

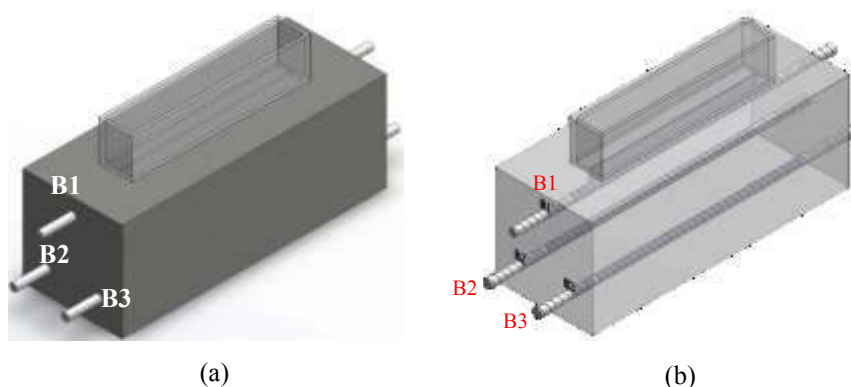


Figura 1: (a) Desenho opaco e (b) translúcido do corpo de prova de concreto.

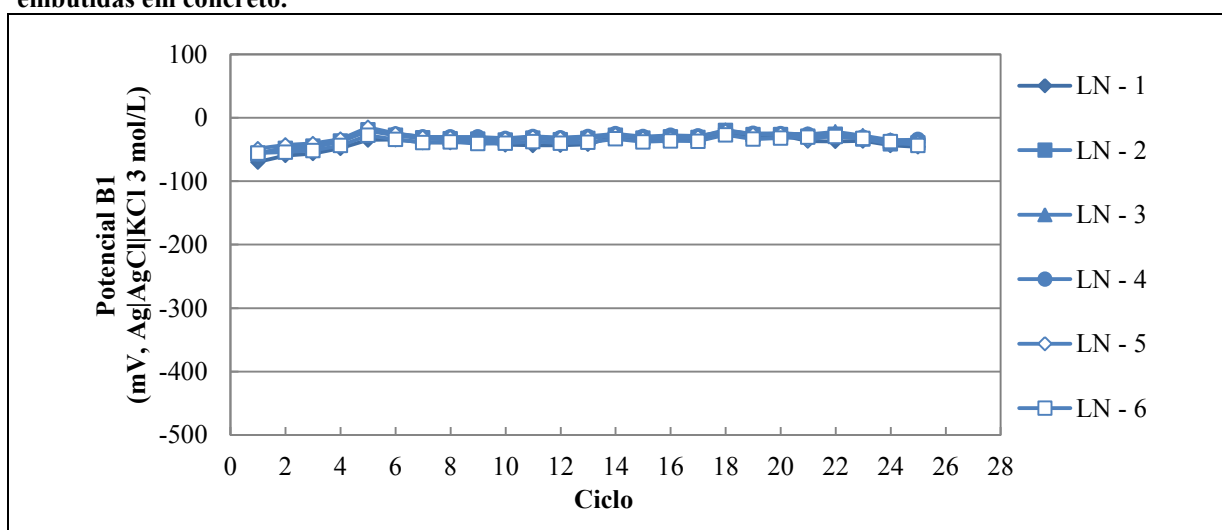
Os corpos de prova de concreto foram submetidos a ciclos de 28 dias de contaminação com íons cloreto e secagem. A etapa de contaminação consistiu em colocar 400 mL de solução NaCl no recipiente acrílico por duas semanas em temperatura ambiente. Ao final da segunda semana, a queda de potencial no resistor de 100 Ω foi medida utilizando um multímetro (com resistência interna de 10 M Ω). Em seguida, as barras foram desconectadas do resistor para a medida do potencial de circuito (PCA) de B1. A medida de potencial foi feita logo após a desconexão das barras, o que elimina o efeito de queda ôhmica decorrente da circulação de corrente galvânica. Após as medidas, a solução foi removida do recipiente e os corpos de prova permaneceram nessa condição (sem solução) por duas semanas em temperatura ambiente, totalizando um ciclo. Nesse trabalho, são apresentados os resultados de 28 ciclos de ensaios.

Curvas de polarização foram levantadas nos CPs para avaliação da condição ativa ou passiva de corrosão e, também, para estimar a taxa de corrosão, quando necessária. Foi aplicada uma sobretensão em relação ao PCA (despolarizado) variando -20 mV a +20 mV, com velocidade de varredura de 0,05 mV/s. Devido à natureza capacitiva do concreto, os valores de corrente foram medidos nos 50 % finais do tempo de duração de cada passo de potencial. Esse método é conhecido como método de polarização linear.

Resultados e discussões

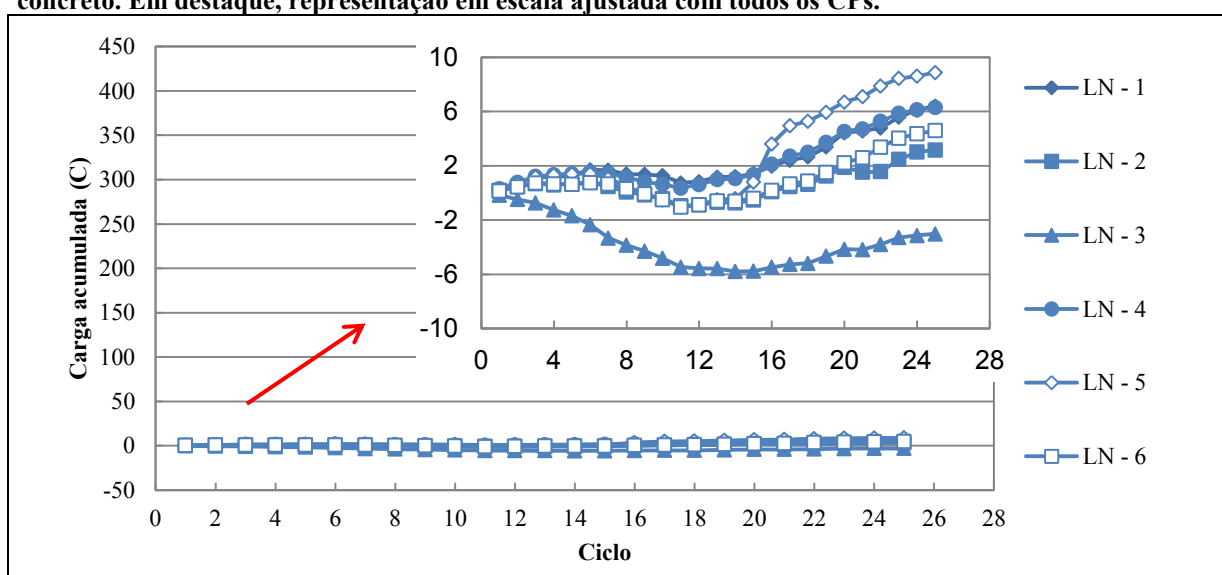
A Figura 2 apresenta os valores de PCA das barras **B1** do *lean duplex*, polarizadas (conectadas com as barras **B2/B3**, também de *lean duplex*). O PCA dos 12 CPs foi semelhante e se tornou menos negativo ao longo do ensaio, indicando um processo de passivação da barra **B1**. Segundo Mesquita (11) e Moser et al. (12) o potencial de pite do *lean duplex* é de +550 mV (EPCP3) em solução de água de poro com íons cloreto e $\text{pH} > 10$. Os valores de potencial dos 12 CPs estavam mais negativos que o valor citado na literatura. Sendo assim, pode-se afirmar que as barras estavam em seu estado passivo durante todo o ensaio.

Figura 2 – Potencial polarizado das barras B1 dos ensaios, em laboratório, com três barras de *lean duplex* embutidas em concreto.



Na Figura 3, são apresentados os valores de carga acumulada dos CPs com três barras de *lean duplex*.

Figura 3 – Carga acumulada dos ensaios em laboratório com três barras de *lean duplex* embutidas em concreto. Em destaque, representação em escala ajustada com todos os CPs.



Os baixos valores de carga acumulada apresentados na Figura 3 indicam que as barras se encontram em estado passivo. A oscilação dos valores de carga, observados no destaque da Figura 3, indica que os elétrons não mantiveram uma direção única ao longo dos ensaios. Os valores de carga negativos sugerem que houve predominância da movimentação das cargas das barras **B2/B3** para a barra **B1**. Os valores de carga positiva sugerem movimentação dos elétrons no sentido oposto. Observa-se que no ciclo 12 houve uma mudança no direcionamento dos elétrons (cargas). A partir do ciclo 12, a elevação da concentração dos contaminantes na barra **B1**, causado pelos ciclos de contaminação e secagem, provavelmente provocou a ocorrência de reações de oxidação, que, apesar de discretas, superaram a quantidade de elétrons provenientes de **B2/B3**, exceto no CP LN-3, que se manteve com carga acumulada negativa.

Os CPs LN-1, LN-2 e LN-3 foram rompidos no mês 26 para observação do estado das barras. Na Figura 4, são apresentadas as condições das barras **B1** desses CPs após o rompimento.

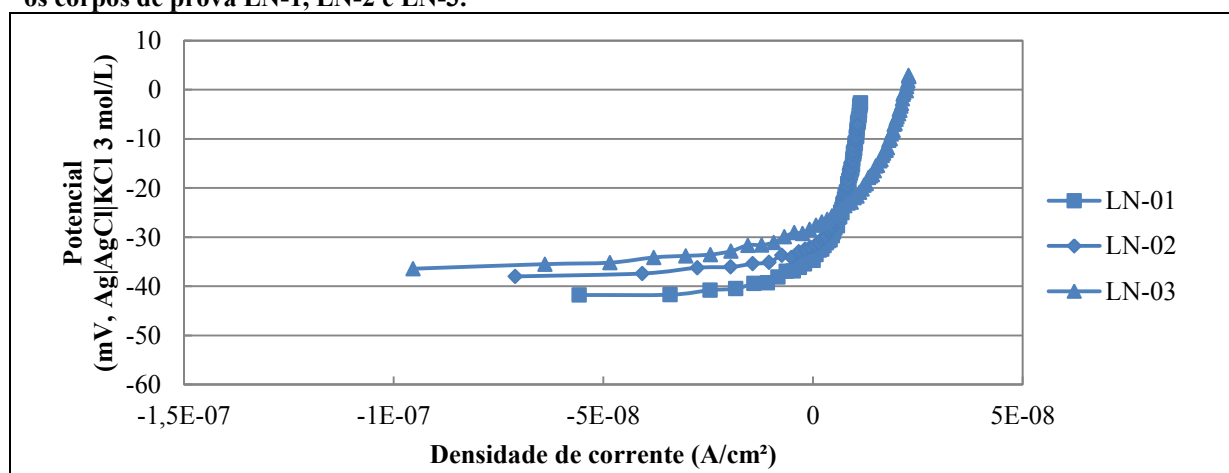
Nota-se que não foi verificada a ocorrência de corrosão ou qualquer outra alteração superficial. Amostras para determinação de íons cloreto foram extraídas do concreto adjacente à barra **B1** dos CPs LN-1 e LN-3, que foram ensaiados até o mês 25. Os valores obtidos de teor de íons cloreto no cimento são 0,11 % e 0,25 %, respectivamente.

Na Figura 5, são apresentadas as curvas de polarização da barra **B1** dos CPs LN-1, LN-2 e LN-3.

Figura 4 – Condição das barras B1 após o rompimento dos CPs LN-1, LN-2 e LN-3.



Figura 5 – Curvas de polarização da barra superior (B1), na escala linear, levantadas após o ciclo 25 para os corpos de prova LN-1, LN-2 e LN-3.



Pode-se verificar que os três CPs apresentaram um perfil de aço inoxidável passivo. Esses resultados estão de acordo com o resultado de carga acumulada (Figura 3) e com as avaliações visuais das condições das barras, mostradas na Figura 4.

Conclusões

Nesses ensaios, notou-se que as barras de aço *lean* duplex permaneceram íntegras em todas as condições estudadas (no contato com barras de mesmo material). Os valores de PCA indicaram o estado passivo das barras e baixos valores de carga acumulada confirmaram essa condição, junto com a inspeção visual feita após o rompimento dos CPs. As curvas de polarização corroboraram o estado passivo das barras, com densidade de corrente de até $2,4 \cdot 10^{-9} \text{ A/cm}^2$.

Referências

- 1 BERTOLINI, L. et al. **Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2004.
- 2 MARKESET, G.; ROSTAM, S.; KLINGHOFFER, O. **Guide for the use of stainless steel reinforcement in concrete structures**. BYGGFORSK - Norwegian Building Research Institute. Oslo, p. 68. 2006. (ISBN 82-536-0926-4/ ISSN 0801-6461).
- 3 NÜRNBERGER, U.; WU, Y. Stainless steel in concrete structures and in the fastening technique. **Materials and Corrosion**, v. 59, p. 144-158, 2008.
- 4 BADDOO, N. R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, p. 119-1206, 2008.
- 5 MAGEE, J. H.; SCHNELLI, R. E. Stainless steel rebar for concrete reinforcement: an update and selection guide. **Advanced Materials and Process**, v. 160, p. 43-45, 2002.
- 6 GEDGE, G. Structural uses of stainless steel: buildings and civil engineering. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, p. 1194-1198, 2008.
- 7 ALVAREZ-ARAMAS, I. Duplex stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys. **Recent Patents on Mechanical Engineering**, v. 1, p. 51-57, 2008.
- 8 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A955**. :Standard Specification for Deformed and Plain Stainless-Steel Bars for Concrete Reinforcement. West Conshohocken: ASTM International, 2015. 14 p.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G109**. : Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments. West Conshohocken: ASTM International, 2007. 6 p.
- 10 ARAUJO, A. D. et al. Definição e preparação de corpos de prova de concreto armado destinados a ensaios acelerados de corrosão de armaduras. **Revista IPT - Tecnologia e Inovação**, São Paulo, 1, n. 3, dezembro 2016. 22.
- 11 MESQUITA, T. J. et al. Lean duplex stainless steels—The role of molybdenum in pitting corrosion of concrete reinforcement studied with industrial and laboratory castings. **Materials Chemistry and Physics**, v. 132, p. 967-972, 2012.
- 12 MOSER, R. D. et al. Chloride-induced corrosion resistance of high-strength stainless steels in simulated alkaline and carbonated concrete pore solutions. **Corrosion Science**, v. 57, p. 241-253, 2012.
