

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

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

Estudo da influência do molibdênio na resistência à corrosão de aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos e dúplex em solução simulada de água de poro e em concreto
Thiago J. Mesquita^a, Adriana de Araujo^b, Zehbour Panossian^c, Ricardo P. Nogueira^d, Alberto S. Dias Junior^e, David R. Neves Filho^f, Sócrates C. S. Dias^g

Abstract

To ensure long service life of concrete structures, corrosion protection techniques of traditional carbon steel rebars or their replacement for greater corrosion resistant alloys are extensively used. The latter has been used abroad in concrete structures exposed to high aggressive environments, especially in the presence of chloride ions. In this paper, the use of stainless steel rebars is studied, focusing the influence of molybdenum on the pitting corrosion resistance in concrete contaminated with chloride ions. Stainless steel samples were prepared in a laboratory with and without the addition of molybdenum. The chemical composition of these steels was selected based on the chemical composition of commercial stainless steels. Ferritic, austenitic and lean duplex stainless steels were studied. The lean duplex stainless steels are today a cheap alternative for concrete rebars. Coupons were exposed to alkaline solutions simulating carbonated and noncarbonated concrete pore water both with an addition of 3.5 % sodium chloride. The performance of the steels was measured through anodic polarization curves. To validate the results obtained in pore solutions, tests with the steels embedded in carbonated concrete contaminated with chloride ions were also conducted. However, these tests were not successful because the occurrence of crevice corrosion between the stainless steel coupons and the resin used to delimit the coupon surfaces. The tests in chloride contaminated alkaline solutions clearly showed the positive influence of the Mo in the pitting corrosion resistance of the studied steels.

Keywords: reinforced concrete; pitting corrosion; stainless steel, molybdenum; carbonation, passivation

^a Doutor, engenheiro de pesquisa e desenvolvimento, Ugitech Research Center (e-mail: thiago-jose.mesquita@lepmi.grenoble-inp.fr).

^b Mestre, pesquisadora do LCP - Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT (e-mail: aaraujo@ipt.br).

^c Doutora, pesquisadora responsável pelo LCP – IPT e professora convidada do Departamento de Metalurgia e Materiais da EPUSP (e-mail: zep@ipt.br).

^d Doutor, diretor do LEPMI - Le Laboratoire d'Electrochimie et de Physicochimie des Matériaux et des Interfaces, L'Université de Grenoble (e-mail: ricardo.nogueira@lepmi.grenoble-inp.fr).

^{e f g} Técnico, técnico metalurgista do LCP - IPT (e-mail: albertojr@ipt.br, davidr@ipt.br, socrates@ipt.br).

Resumo

Para assegurar vida útil longa às estruturas de concreto, é cada vez mais frequente a adoção de técnicas de proteção contra corrosão das tradicionais armaduras de aço-carbono ou a substituição do próprio aço-carbono por outros de maior resistência à corrosão. Estes últimos vêm sendo usados, no estrangeiro, em estruturas de concreto expostas a elevada agressividade, especialmente na presença de cloretos. Neste trabalho, foi estudado o uso de aços inoxidáveis como armadura, sendo dado enfoque à influência do molibdênio na sua resistência à corrosão por pite em concreto contaminado com íons cloreto. Para tanto, amostras de aços inoxidáveis, com e sem adição de molibdênio, foram preparadas em laboratório. Aços inoxidáveis ferrítico, austenítico e dúplex, incluindo *lean* dúplex, foram estudados. Estes últimos são uma alternativa econômica para aplicação em concreto. Esses aços foram expostos a soluções alcalinas simulando água de poros de concreto carbonatado e não carbonatado, ambas com adição de 3,5 % de NaCl. O desempenho dos aços foi verificado por meio de curvas de polarização anódicas. Para validar os resultados, ensaios em concreto também foram realizados, no entanto, esses ensaios foram prejudicados pela ocorrência de corrosão em fresta entre as pastilhas dos aços e a resina usada para limitar a superfície de trabalho de amostra. Os ensaios em soluções alcalinas contaminadas com íons cloreto mostraram claramente a influência positiva da adição de Mo na resistência à corrosão por pite dos aços estudados.

Palavras-chave: concreto armado, corrosão por pite, aço inoxidável, molibdênio, carbonatação, passivação.

Introdução

A corrosão induzida por íons cloreto é quase sempre a causa principal da degradação prematura de estruturas de concreto armado e, conseqüentemente, da perda da sua estabilidade estrutural. Normalmente, o risco desta corrosão e a sua severidade são maiores em concreto carbonatado por dois motivos. Primeiro porque, com a carbonatação do concreto, o pH da solução aquosa dos poros de concreto, normalmente superior a 12, cai para valores abaixo de 9,5, o que por si só já acelera a corrosão do aço-carbono (1). Segundo porque, a carbonatação desestabiliza os compostos da pasta de cimento, o que promove a decomposição dos cloraluminatos, liberando os íons cloreto que se somam aos cloretos livres provenientes do meio de exposição do concreto (2,3).

O tempo para que os íons cloreto provenientes do meio de exposição atinjam a armadura depende, principalmente, da sua concentração no meio externo, da natureza do cátion que o acompanha, da temperatura e da qualidade do concreto (2). Além disso, citam-se a espessura de cobertura da armadura e a presença de patologias como fissuração (quantidade e abertura) e vazios (porosidade superficial e segregação) na superfície do concreto.

As construções de infraestrutura, como pontes, viadutos e píeres, são usualmente as mais afetadas pela corrosão por íons cloreto. Em países de clima frio, o uso de sal de degelo é a principal causa da contaminação do concreto da estrutura dessas construções. Outra fonte comum de contaminação do concreto com íons cloreto é a névoa salina presente em

atmosferas marinhas. No caso da estrutura estar à beira mar e no mar (*off shore*), há ainda a contaminação por exposição direta à água do mar e a suas ondas e respingos.

Segundo a NBR 6118 (4), o ambiente marinho é classificado como de agressividade forte, no entanto, quando há exposição aos respingos, a agressividade passa a ser classificada como muito forte, ou seja, há um risco elevado de deterioração da estrutura. Nessa condição, que pode ser considerada como condição adversa de exposição, a norma recomenda a adoção de medidas de proteção e conservação, o que pode ser feito, por exemplo, com o uso de armaduras mais resistentes à corrosão do que o aço-carbono.

No exterior, o aço inoxidável vem sendo usado em substituição à armadura de aço-carbono de estruturas de concreto expostas à ambiente de forte agressividade. Os aços inoxidáveis apresentam maior resistência à corrosão por pite do que o aço-carbono, sendo requerido um maior teor de íons cloreto para a sua despassivação (5). Com isso, o uso de armaduras de aço inoxidável pode assegurar a vida útil de estruturas expostas ao ataque de íons cloreto.

Explica-se que a corrosão por pite é um tipo de corrosão localizada que se caracteriza pelo ataque de pequenas áreas de uma superfície metálica. Esse tipo de corrosão ocorre em metais cuja resistência à corrosão é decorrente da formação e preservação de um filme protetor de óxidos na superfície do aço. Condições específicas para cada sistema podem causar a quebra desse filme. A quebra da passivação por pite ocorre em potenciais característicos denominados de potenciais de pite (E_p). Um pite formado, ou seja, nucleado, pode continuar ativo ou pode repassar-se. A repassivação é também caracterizada por um potencial denominado de potencial de repassivação ou potencial de proteção (E_{prot}) (6).

Dentre os elementos componentes dos aços inoxidáveis, o molibdênio (Mo) tem um importante papel na sua resistência à corrosão por pite e, também, na sua repassivação (7,8). Há uma extensa literatura sobre a participação do Mo na complexa eletroquímica das soluções internas dos pites considerando meios ácidos e neutros, entretanto, há um número bem menor de trabalhos em meios alcalinos, mais próximos das características da solução de poros do concreto (9).

A compreensão do papel do Mo na estabilidade e/ou regeneração das camadas passivas dos aços inoxidáveis em meio alcalino é importante para a crescente aplicação dos aços inoxidáveis ao Mo como armadura de estruturas de concreto. Tal conhecimento também é importante para as novas classes de aços inoxidáveis (*lean* dúplex), as quais apresentam baixa adição de Mo e de níquel (Ni).

Neste trabalho, será estudado o efeito da adição de Mo sobre a resistência à corrosão por pite de aços inoxidáveis austenítico, ferrítico e dúplex (convencional e *lean*) em meio alcalino, que é a condição verificada quando do uso do aço inoxidável como armadura de estruturas de concreto.

Para o estudo, amostras das três classes de aços inoxidáveis, produzidas em laboratório e com teores controlados de Mo, foram imersas em soluções simuladas dos poros do concreto carbonatado e não carbonatado, ambas com adição de cloreto de sódio. Além disso, as amostras foram embutidas em concreto que foi, posteriormente, carbonatado e contaminado com íons cloreto. A corrosão foi avaliada por medidas de potencial de circuito aberto e curva

de polarização potenciodinâmicas anódicas. Para verificar a ocorrência de corrosão localizada, ao término dos ensaios foi feito exame visual das amostras.

Metodologia

Aços inoxidáveis selecionados para o estudo

A composição dos aços inoxidáveis a serem produzidos em laboratório foi estabelecida tendo como base a composição dos aços inoxidáveis comerciais, a saber: AISI 304 e AISI 316 para os austeníticos; AISI 430 e AISI 434 para os ferríticos e SAF 2205 e SAF 2304 para os austenoferríticos (dúplex).

Todos os aços foram produzidos pelo centro de pesquisas da UGITECH *Company* em condições altamente controladas de modo a se obter, para cada classe de aço, a mesma composição base variando-se apenas o teor de Mo. Com isto foi possível estudar o efeito individual do Mo na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis.

Todos os aços em estudo foram forjados a quente, laminados a quente, recozidos e então laminados a frio. Para os ensaios, pastilhas 1,5 cm de diâmetro e 2 mm de espessura foram obtidas por estampagem. Algumas pastilhas foram polidas com lixa de grana 1200 (ensaios em solução) e outras com lixa de grana 120 (ensaios em concreto).

Nas pastilhas, foi soldado um fio de cobre revestido para ser estabelecido o contato elétrico necessário para a realização de medidas eletroquímicas (ver Figura 1). As pastilhas e parte do fio de cobre foram embutidas a frio em resina, ficando a área (1,77 cm²) da sua face inferior exposta ao meio. As pastilhas foram desengorduradas com álcool, lavadas com água destilada e secas com ar quente antes do início dos ensaios. Para os ensaios em concreto, as pastilhas preparadas foram embutidas em microconcreto (ver mais adiante).

Na Tabela 1, é apresentada a composição química de cada aço inoxidável juntamente com a codificação adotada. Nessa tabela, pode ser observada que a composição base de cada classe de aço inoxidável é praticamente a mesma, a menos do teor de Mo. Para a classe de aços austeníticos, quatro diferentes amostras foram produzidas: uma sem Mo e mais três com diferentes teores de Mo (cerca de 1 %, 2 % e 3 %). Para a classe dos aços ferríticos e austenoferríticos (dúplex), duas amostras foram produzidas: uma sem e outra com 3 % de Mo. Ressalta-se que o aço dúplex 23Cr4,6Ni apresenta baixo teor de níquel, além de ausência de Mo, o que o caracteriza como *lean* dúplex.

A Tabela 1 também apresenta o valor de PREn (*Number of Pitting Resistance Equivalent*) para cada aço. O PREn é o primeiro parâmetro para seleção de aços inoxidáveis em ambiente no qual a solicitação de resistência à corrosão por pite é importante. Este número é calculado com base na composição química que relaciona a resistência à corrosão com o teor dos elementos de liga de cada material. Quanto maior o PREn, mais resistente à corrosão por pite é o aço inoxidável. Na literatura, existem diversas fórmulas para se calcular o PREn (10, 11). A fórmula mais utilizada pelos pesquisadores na determinação do PREn é a seguinte:

$$\text{PREn} = \% \text{Cr} + 3,3 (\% \text{Mo}) + x (\% \text{N})$$

Nessa, x pode variar de 13 a 30. O valor 16 foi adotado por ser amplamente utilizado pela indústria metalúrgica. Pela Tabela 1, observa-se que o valor de PREn obtido é sempre maior (em torno de 10 pontos) para os aço com 3 % de Mo em relação aos sem Mo.

Tabela 1 – Codificação, composição química e PREn das amostras de aços de laboratório

Material		Elementos									PREn
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Al	S	
Austenítico	18Cr12Ni	0,025	0,594	1,012	12,067	17,999	0,004	0,023	0,0033	13	18,38
	18Cr12Ni1Mo	0,028	0,513	0,990	12,060	17,859	1,000	0,024	0,0031	13	21,54
	18Cr12Ni2Mo	0,020	0,515	1,048	12,080	17,879	1,968	0,019	0,0032	12	24,68
	18Cr12Ni3Mo	0,028	0,571	1,018	11,995	18,003	2,989	0,029	0,0036	15	28,33
Ferrítico	18Cr	0,028	0,492	1,056	0,003	18,108	0,004	0,029	0,0024	15	18,59
	18Cr3Mo	0,029	0,533	1,076	0,005	18,018	3,01	0,028	0,0023	14	28,39
Dúplex	23Cr4,6Ni (<i>lean</i>)	0,029	0,58	1,031	4,569	22,968	0,015	0,175	0,0024	12	25,82
	23Cr4,6Ni3Mo	0,029	0,559	0,981	4,56	22,97	3,004	0,186	0,003	13	35,86

Preparo das soluções salinas para ensaios de imersão e dos corpos de prova de concreto

Para os ensaio de imersão, foi preparada uma solução que simula a água de poros de concreto contaminado com íons cloreto e carbonatado (pH 10) e de concreto íntegro (pH 12). A solução usada para o pH 10 foi a seguinte: 0,025 mol/L de NaHCO₃ e de Na₂CO₃.H₂O + 0,6 mol/L de NaCl (35 g/L) (12, 13). Para pH 12, foi utilizada a mesma solução com o pH ajustado para 12 com adição de NaOH. A temperatura das soluções foi mantida em 25 °C, com exceção do aço dúplex que foi feita a 75 °C. A adoção da temperatura mais elevada visou acelerar a cinética de corrosão, pois, em trabalho anterior tinha sido verificado que a 25 °C, a corrosão do aço dúplex era incipiente (14).

Antes da imersão dos corpos de prova, a solução de ensaio foi saturada em oxigênio por meio de borbulhamento de ar atmosférico por uma hora. As medidas eletroquímicas foram iniciadas depois de uma hora de imersão dos corpos de prova na solução de ensaio, período este necessário para a estabilização do potencial de circuito aberto ou potencial de corrosão.

Para os ensaios em concreto, foram preparados dez corpos de prova de concreto (7 cm diâmetro e 3 cm de altura) para cada amostra de aço estudado. Esse número de corpos de prova foi definido conforme constatação em trabalho anterior (15) da elevada variação dos resultados eletroquímicos em amostras metálicas embutidos em concreto. Para a preparação desses corpos de prova foi executado um microconcreto (traço 1:1,75:3,5:1,75:0,6) de resistência à compressão axial de 12 MPa, conforme ensaio ABNT NBR 5739 (16). As características principais dos componentes do microconcreto executado estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características dos componentes do microconcreto

Componentes	Norma	Características
Areia fina	NBR NM 248 (17)	Módulo de finura 1,28 e dimensão máxima característica 0,6 mm.
Areia média	NBR NM 248 (17)	Módulo de finura 2,42 e dimensão máxima característica 4,8 mm.
Cimento CII E32	ABNT NBR 11578 (18)	Atende aos requisitos mínimos

Antes da concretagem, as pastilhas foram embutidas em resina (embutimento metalográfico), conforme mostra Figura 1a. Em seguida, essas pastilhas foram concretadas para a obtenção dos corpos de prova de concreto, conforme ilustrado na Figura 1b.

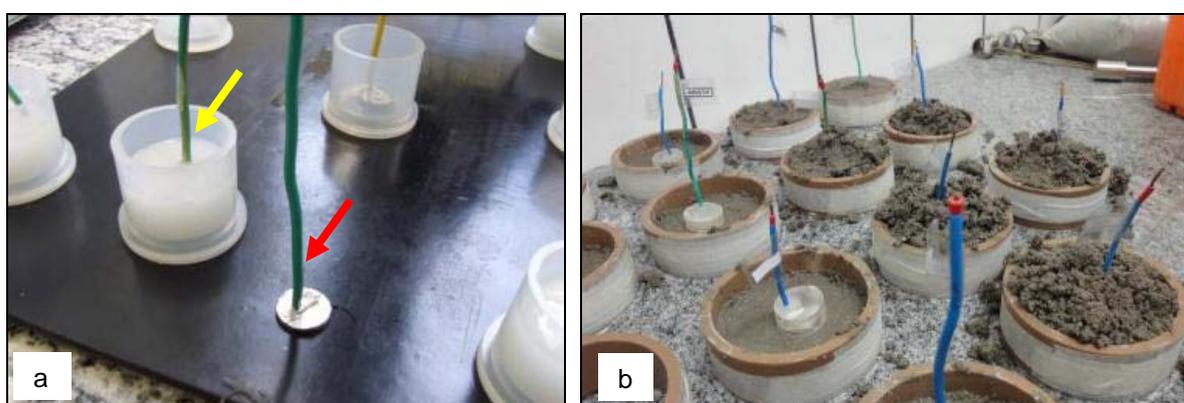


Figura 1 - Pastilha já com o fio de cobre soldado (indicada com seta vermelha em (a)) e pastilha sendo embutida em resina (indicada com seta amarela em (a)). Preparação dos corpos de prova de concreto (b).

Após a cura dos corpos de prova de concreto, estes foram expostos ao gás carbônico (CO_2) e a contaminação com íons cloreto. A etapa de exposição ao gás carbônico foi feita em uma câmara de condições climáticas controladas (temperatura de 25 °C, umidade relativa 65 % e insuflação de 2 % de CO_2) e, a etapa de contaminação do concreto com íons cloreto foi feita por imersão parcial dos corpos de prova em solução salina (35 g/L de NaCl em água destilada). Durante a etapa de imersão em solução salina, o potencial de corrosão dos aços embutidos em concreto foi monitorado.

A contaminação dos corpos de prova de concreto foi feito em dois ciclos. Primeiramente, os corpos de prova foram expostos ao gás carbônico por 8 dias seguido da exposição do íons cloreto por 114 dias (1º ciclo).

Após o 1º ciclo, um corpo de prova de cada aço foi fraturado e, em seguida, feito exame visual e ensaio de carbonatação por aspersão de fenolftaleína. Nos corpos de prova fraturados, não havia nenhum indício de corrosão na superfície exposta ao concreto das pastilhas. No entanto, no ensaio de carbonatação, foi verificada a não carbonatação total do concreto próximo às pastilhas, sendo visualizada a presença de manchas avermelhadas (vermelho carmim) no concreto. Com isso, um novo ciclo (ciclo 2) foi iniciado, sendo os corpos de prova expostos por 36 dias ao gás carbônico seguido da exposição aos íons cloreto, com

monitoração do potencial de eletrodo, até a obtenção de potenciais indicativos de estado ativo de corrosão.

A Figura 2 apresenta a etapa de exposição dos corpos de prova de concreto armado à câmara de carbonatação e à imersão na solução salina.

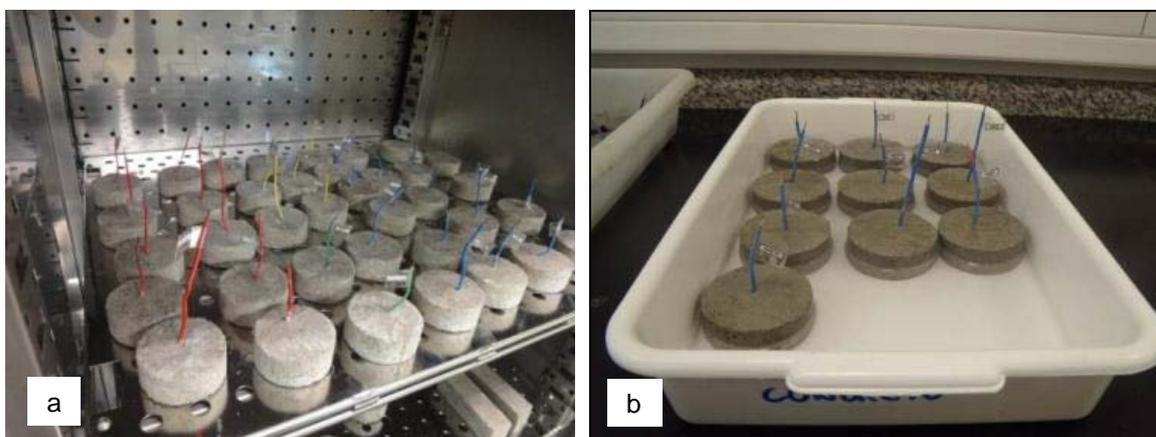


Figura 2 - Corpos de prova de concreto armado expostos ao gás carbônico em câmara de carbonatação (a). Imersão parcial dos corpos de prova de concreto armado em solução salina (b).

Medidas eletroquímicas

Para a avaliação do comportamento dos aços estudados imersos em soluções alcalinas que simulam água de poro foi aplicada a técnica de polarização potenciodinâmica anódica, sendo adotada a velocidade de varredura de 1 mV/s, iniciando em 0,03 mV abaixo do potencial de circuito aberto ou de corrosão (E_{corr}). O potencial de pites (E_p) foi medido quando a densidade de corrente atingiu $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, conforme usualmente aplicado em estudos de corrosão (7, 18-21).

No caso do ensaio dos aços embutidos em concreto, o comportamento dos aços foi acompanhado por medida de potencial de circuito aberto (potencial de corrosão) ao longo do ensaio. Além disso, também foram levantadas curvas de polarização anódica, sendo que, a varredura seria invertida quando a densidade de corrente atingisse $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Nos ensaios de polarização anódica, foi adotado o sistema convencional de três eletrodos, tendo-se o eletrodo de calomelano como referência e grafite como contraeletrodo. Como mencionado, a área do eletrodo de trabalho era de $1,77 \text{cm}^2$. Um multipotenciostato /galvanostato Solartron foi usado e, para o monitoramento do potencial dos aços embutidos em concreto, um multímetro Fluke.

Para o levantamento das curvas de polarização dos aços embutidos em concreto foram inicialmente selecionados dois corpos de prova de cada aço com os menores valores de potencial de corrosão. Se necessário, um terceiro, ou mais, era polarizado, quando as curvas obtidas eram diferentes entre si. Para comparação, dois corpos de prova não submetidos à polarização anódica foram fraturados. Um deles de potencial similar aos obtidos para os corpos de prova polarizados e outro de potencial diferenciado, de valor mais elevado.

Imediatamente após a fratura do concreto, o pH do concreto nas proximidades das pastilhas de aço foi medido com papel indicador ácido/base.

O potencial de equilíbrio da reação de oxirredução do oxigênio dissolvido em meio alcalino ($2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$) foi estimado para ajudar a interpretação dos resultados da polarização anódica. Esse potencial ($E_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}}$) foi estimado usando a correspondente equação de Nernst (a 25 °C), a saber (6):

$$E_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}} = 1,228 - 0,0591 \text{ pH}$$

Para a solução que simula água de poro com pH 10 e para o microconcreto carbonatado de mesmo pH, o potencial de equilíbrio estimado é de 400 mV (ECS). Para a solução que simula água de poro com pH 12, o potencial estimado é de 270 mV (ECS).

Ao término dos ensaios eletroquímicos, foi feito exame visual da superfície das pastilhas exposta ao concreto. Isso foi feito com uso de um estereoscópio com capacidade de aumento de 80 vezes e em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Em algumas pastilhas, também foi feita análise química por espectroscopia por dispersão de energia (EDS), juntamente com o MEV.

Resultados e discussão

Ensaio em solução que simula água de poro

A Figura 3 apresenta uma das curvas de polarização anódica dos aços inoxidáveis austeníticos para as soluções de pH 10 e pH 12. Nessa Figura, a linha horizontal pontilhada em vermelho indica a localização do potencial de equilíbrio da reação de oxirredução do oxigênio dissolvido em meio alcalino ($E_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}}$).

Na Figura 3, pode-se verificar que o ramo anódico das curvas de polarização dos aços austeníticos apontaram um efeito positivo do Mo na resistência à corrosão em ambas as soluções alcalinas. Nessas soluções, os aços com maior teor de Mo (18Cr12Ni3Mo e 18Cr12Ni2Mo) apresentaram faixa de potencial de estado passivo maior e potencial de quebra (potencial em que se inicia o aumento da densidade de corrente) ligeiramente superior ao obtido para o aço de baixo teor de Mo (18Cr12Ni1Mo) e para o aço sem Mo (18Cr12Ni).

Na solução de pH 10, todos os aços apresentaram potencial de quebra por volta de 300 mV (ECS), valor este inferior ao potencial oxirredução de oxigênio. Esse resultado indica que, na solução de pH 10 estudado, os aços austeníticos são suscetíveis à corrosão por pite. Como essa solução representa a condição de concreto carbonatado, pode-se concluir que caso este esteja também contaminado com íons cloreto, os aços inoxidáveis austeníticos embutidos no concreto estão suscetíveis à corrosão por pite.

Cabe mencionar que durante o ensaio em solução salina alguns corpos de prova dos aços inoxidáveis austeníticos, bem como de outros aços ferríticos e dúplex, apresentaram corrosão

na fresta formada entre a resina e a pastilha de aço. Os resultados obtidos para esses corpos de prova foram desprezados, não sendo apresentados neste trabalho.

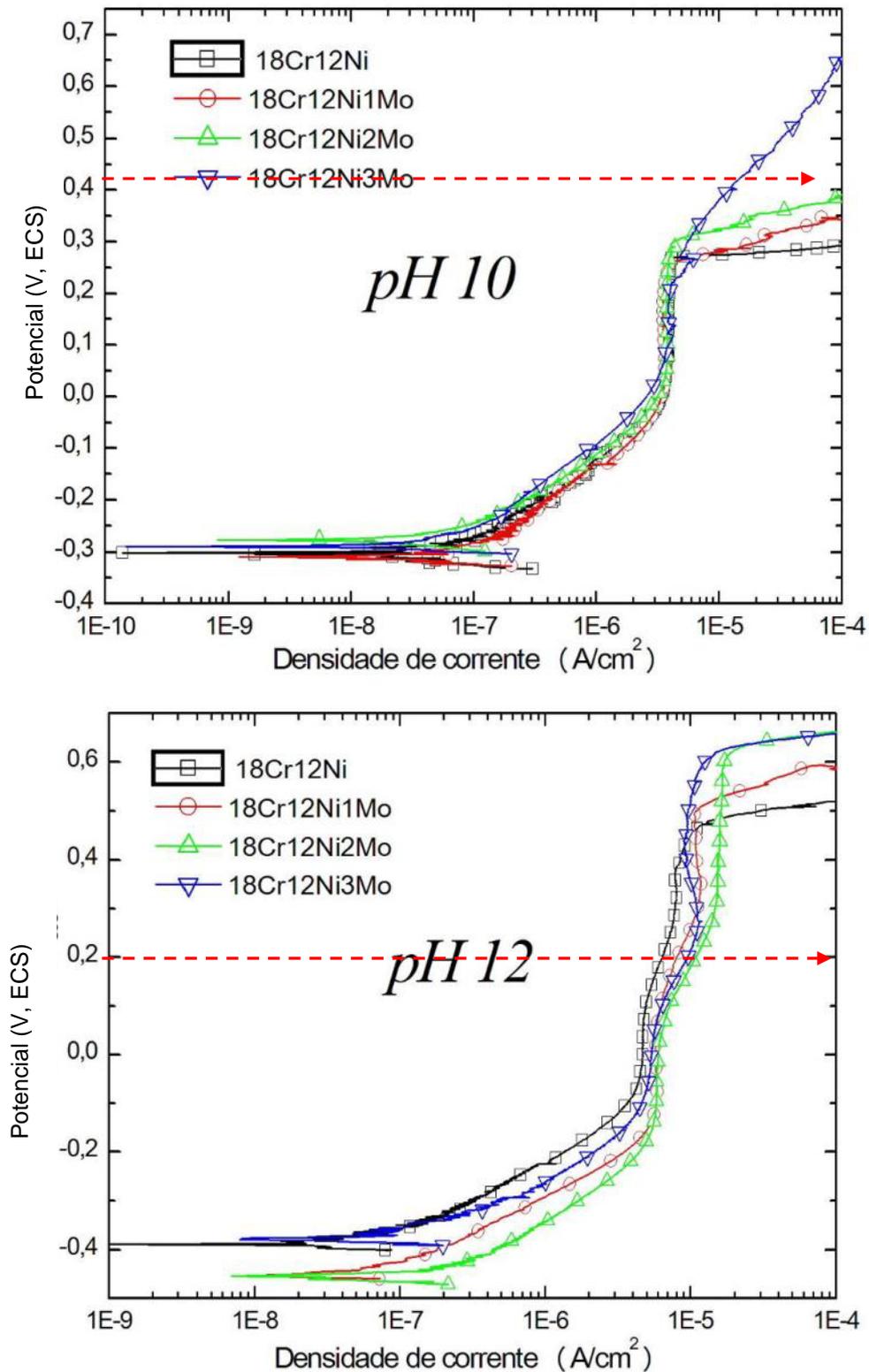


Figura 3 - Curva de polarização anódica dos aços austeníticos estudados em solução que simula água de poro de pH 10 e pH 12. Temperatura de 25 °C.

Para confirmar a ocorrência de corrosão, a superfície dos corpos de prova foi observada em microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 4 apresenta as imagens obtidas em MEV dos aços 18Cr12Ni e 18Cr12Ni3Mo ao término do ensaio. Pela Figura 4, pode-se verificar que, em ambos os aços ocorreu formação de pites. No aço 18Cr12Ni3Mo, são observados pites muito pequenos, sendo visíveis somente com grande aumento (2000 x). No aço 18Cr12Ni, são observados pites maiores, haja visto a sua visualização com aumento reduzido (200 x). Comparando essas imagens, pode-se afirmar que o aço austenítico com 3 % de Mo resistiu mais à corrosão do que o mesmo aço sem Mo.

Outro detalhe interessante visto na Figura 4b, é que os pites nucleiam envolta de uma inclusão de MnS, que é uma região empobrecida de elementos de liga. A Figura 5 apresenta a análise EDX da inclusão, que mostra o enriquecimento em S e Mn. Esse tipo de ocorrência foi verificado em estudo similar de Pardo e colaboradores (7).

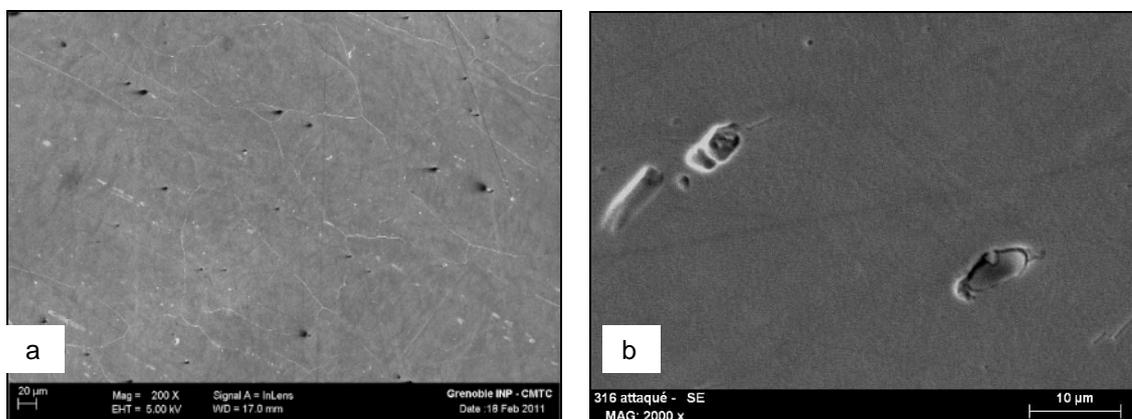


Figura 4 – Imagens obtidas em MEV da superfície dos aços austeníticos 18Cr12Ni (a) e 18Cr12Ni3Mo (b) após o levantamento de curva de polarização anódica em solução que simula água de poro de pH 10. Temperatura de 25 °C.

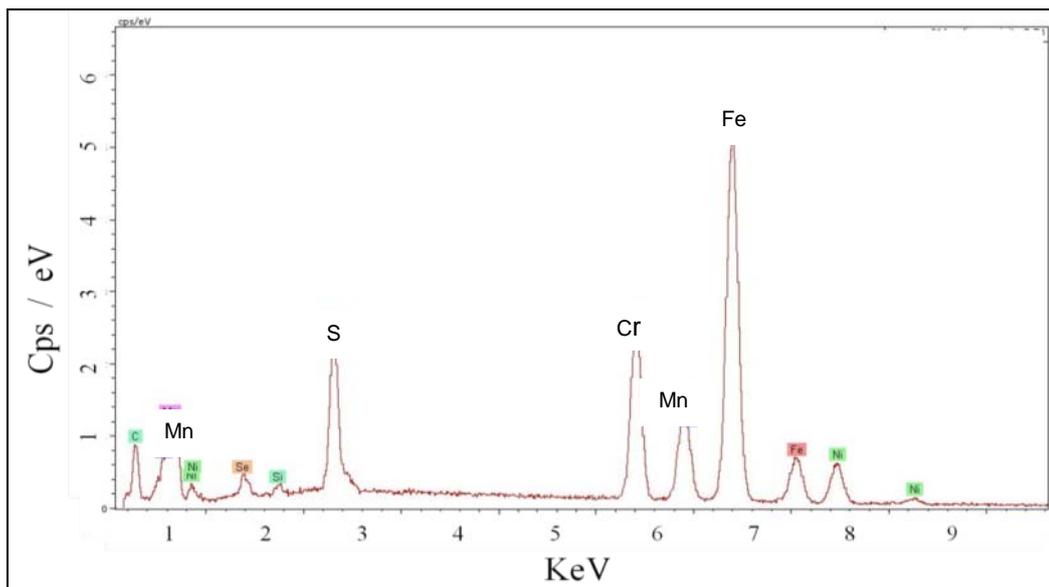


Figura 5 – Análise EDX da inclusão verificada no aço 18Cr12Ni3Mo, mostrando o enriquecimento em S e Mn.

Na solução de pH 12, todos os aços austeníticos apresentaram potencial de quebra acima do valor do potencial de oxirredução do oxigênio (E_{O_2/H_2O}). Isto indica que, nestas condições, os aços inoxidáveis austeníticos não são susceptíveis à corrosão por pite, visto que, na solução que simula água de poro, a espécie com o poder oxidante maior é o oxigênio. Portanto, na prática, não há condições de se ter um potencial de circuito aberto maior do que a da reação $2H_2O \Leftrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$.

Muito provavelmente, a quebra de passivação verificada nos aços expostos à solução de pH 12 é devido à acidificação do meio resultante da reação de evolução do oxigênio ($2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$) que se inicia quando o potencial assume valores acima do potencial de equilíbrio (E_{O_2/H_2O}) associada aos altos valores de potencial aplicado. Com base nos resultados apresentados, pode-se verificar a importância de incluir nos estudos de corrosão em concreto, ensaios contemplando a ocorrência simultânea de carbonatação e contaminação de íons cloreto.

A Figura 6 apresenta as curvas de polarização anódica representativa dos aços inoxidáveis ferríticos para as soluções de pH 10 e pH 12. Nessa Figura, a linha horizontal pontilhada em vermelho também indica o valor de E_{O_2/H_2O} .

Pela Figura 6, observa-se também o efeito positivo do Mo na resistência à corrosão em ambas as soluções alcalinas. Nessas soluções, o aço com Mo (18Cr3Mo) apresentou zona de passivação superior ao obtido para o aço sem Mo (18Cr) e conseqüentemente potencial de quebra de passivação também foi superior para o aço 18Cr3Mo.

Na solução de pH 10, o aço sem Mo (18Cr) apresentou potencial de pite por volta de 200 mV (ECS), valor este muito inferior ao E_{O_2/H_2O} que é de 400 mV (ECS). Já o aço com Mo (18Cr3Mo) apresentou potencial de quebra um pouco menor do que 400 mV (ECS). Esses resultados indicam que ambos os aços são susceptíveis à corrosão por pite na solução de pH 10, sendo o aço ferrítico sem Mo mais susceptível do que o aço com Mo.

A Figura 7 apresenta as imagens obtidas em MEV dos aços 18Cr e 18Cr3Mo ao término do ensaio. Observa-se que ambos os aços apresentaram pites de diâmetro superior a 20 μm . Esses pites propagaram-se com maior intensidade do que os formados na superfície dos aços austeníticos. Este fato pode ser associado à presença de níquel nos aços austeníticos e no entanto à maior resistência à corrosão intrínseca da estrutura austenítica.

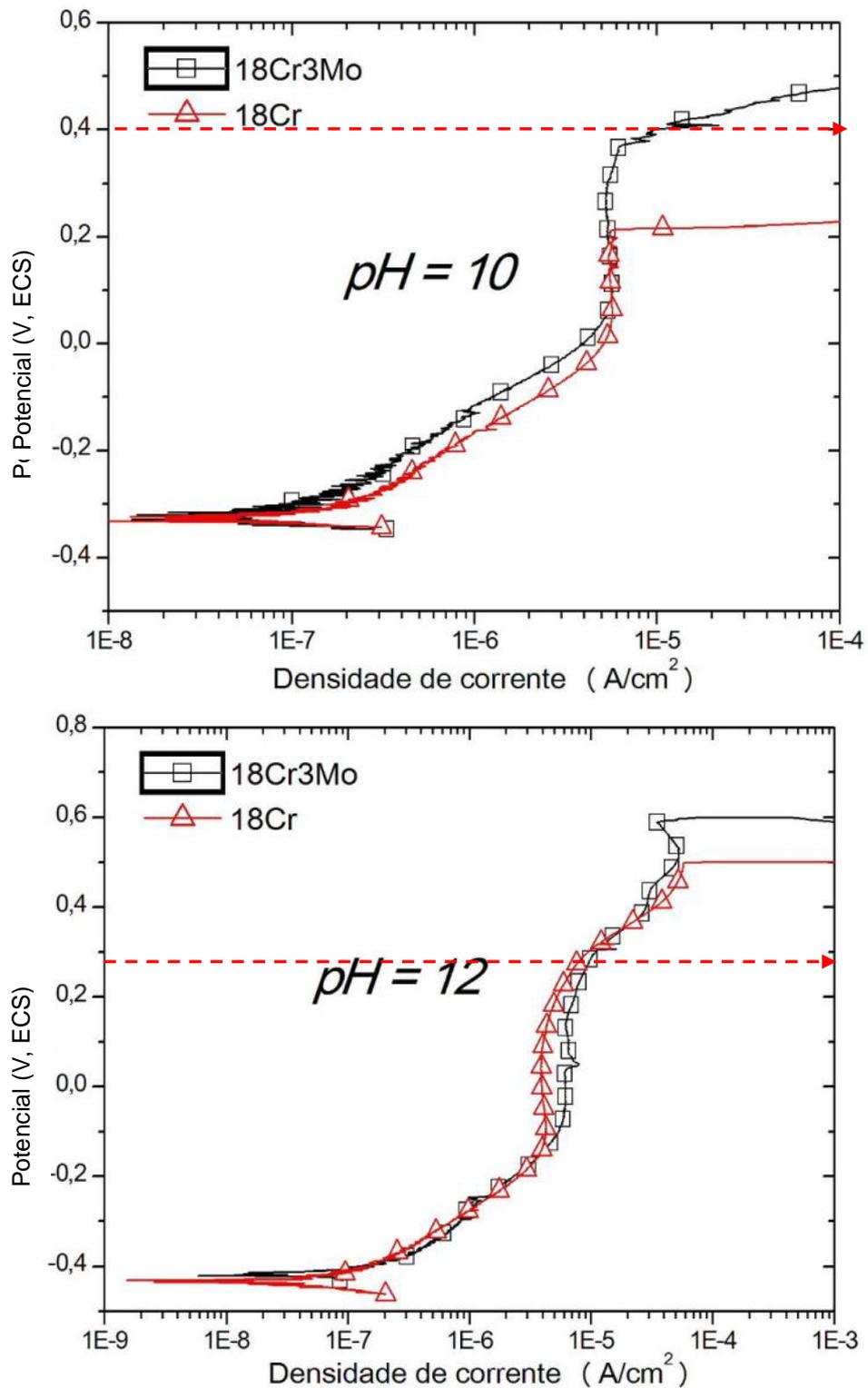


Figura 6 - Curva de polarização anódica dos aços ferríticos estudados em solução que simula água de poro de pH 10 e pH 12. Temperatura de 25 °C.

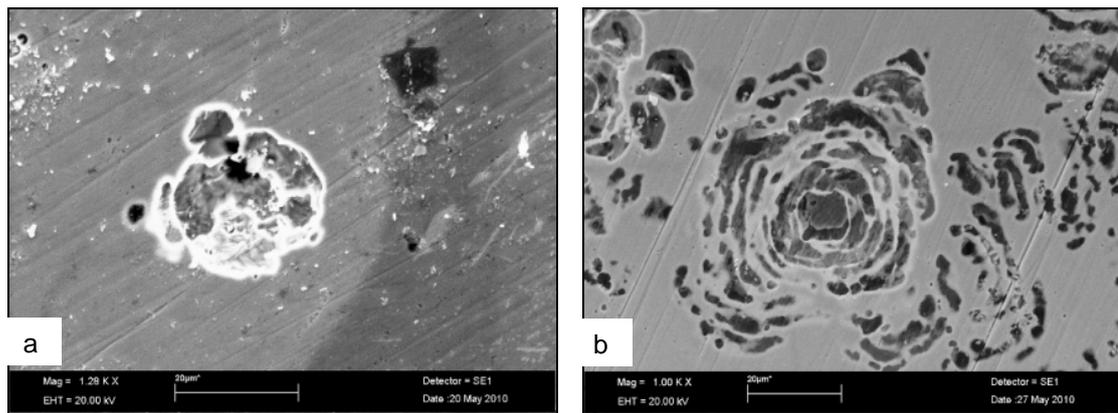


Figura 7 – Imagens obtidas em MEV da superfície dos aços ferríticos 18Cr (a) e 18Cr3Mo (b) após o levantamento de curva de polarização anódica em solução que simula água de poro de pH 10. Temperatura de 25 °C.

A Figura 8 apresenta as curvas de polarização anódica representativa dos aços inoxidáveis dúplex para as soluções de pH 10 e pH 12. Nessa Figura, novamente a linha horizontal pontilhada em vermelho indica o valor de E_{O_2/H_2O} .

Pela Figura 8, pode-se verificar que, para ambas as soluções, o potencial de quebra foi praticamente igual (para o aço 23Cr4,6Ni na solução de pH 10) ou superior (para os demais casos) ao E_{O_2/H_2O} . Esses resultados indicam que os aços inoxidáveis duplex estudados não são susceptíveis à corrosão por pite em solução de água de poros tanto carbonatado como não carbonatado. Mesmo com esse valor de potencial de pite superior ao do potencial de oxirredução do oxigênio, o aço 23Cr4,6Ni apresentou corrosão por pites o que caracteriza uma acidificação da solução nas proximidades da amostra. As mesmas considerações apresentadas para os aços austeníticos em solução de pH 12 valem para os aços dúplex em ambas as soluções.

Para a solução de poro de pH 10, apesar o potencial de quebra ter sido igual ou superior à de despreendimento de oxigênio, o efeito benéfico do Mo pôde ser percebido, visto que o aço com Mo (23Cr4,6Ni3Mo) apresentou maior faixa de potencial correspondente ao estado passivo e maior valor de potencial de quebra do que os obtidos para o aço sem Mo (23Cr4,6Ni - *lean* dúplex). No caso da liga 23Cr4,6Ni3Mo, o aumento na corrente em torno de 0,8 V ECS é associado ao despreendimento do oxigênio, pois nenhum traço de corrosão foi observado na superfície desse material.

A superfície dos corpos de prova ensaiados foi examinada no MEV para confirmar se o disparo de corrente observado nas curvas de polarização correspondem ao potencial de pite. Para o aço duplex 23Cr4,6Ni3Mo a temperatura da solução teve que ser aumentada até 75°C para que a corrosão por pites fosse iniciada. A Figura 9 apresenta as imagens obtidas para ambos os aços ao término do ensaio em solução de pH 10 (temperatura de 75°C).

Pela Figura 9, pode-se verificar a presença de pites em ambos os aços. No aço sem Mo (23Cr4,6Ni), os pites se formaram na fase ferrítica e, no aço com Mo (23Cr4,6Ni3Mo), os pites se formaram na fase austenítica. Esses resultados e os obtido em trabalho anterior (23)

mostram que o Mo tem um efeito muito importante na fase ferrítica. Ou seja, a adição de Mo aumenta a resistência à corrosão da ferrita, que era a fase fraca do aço 23Cr4,6Ni (Figura 9a), consequentemente no aço 23Cr4,6Ni3Mo esta fase será a mais resistente e então os pites ocorreram preferencialmente na fase austenítica (Figura 9b).

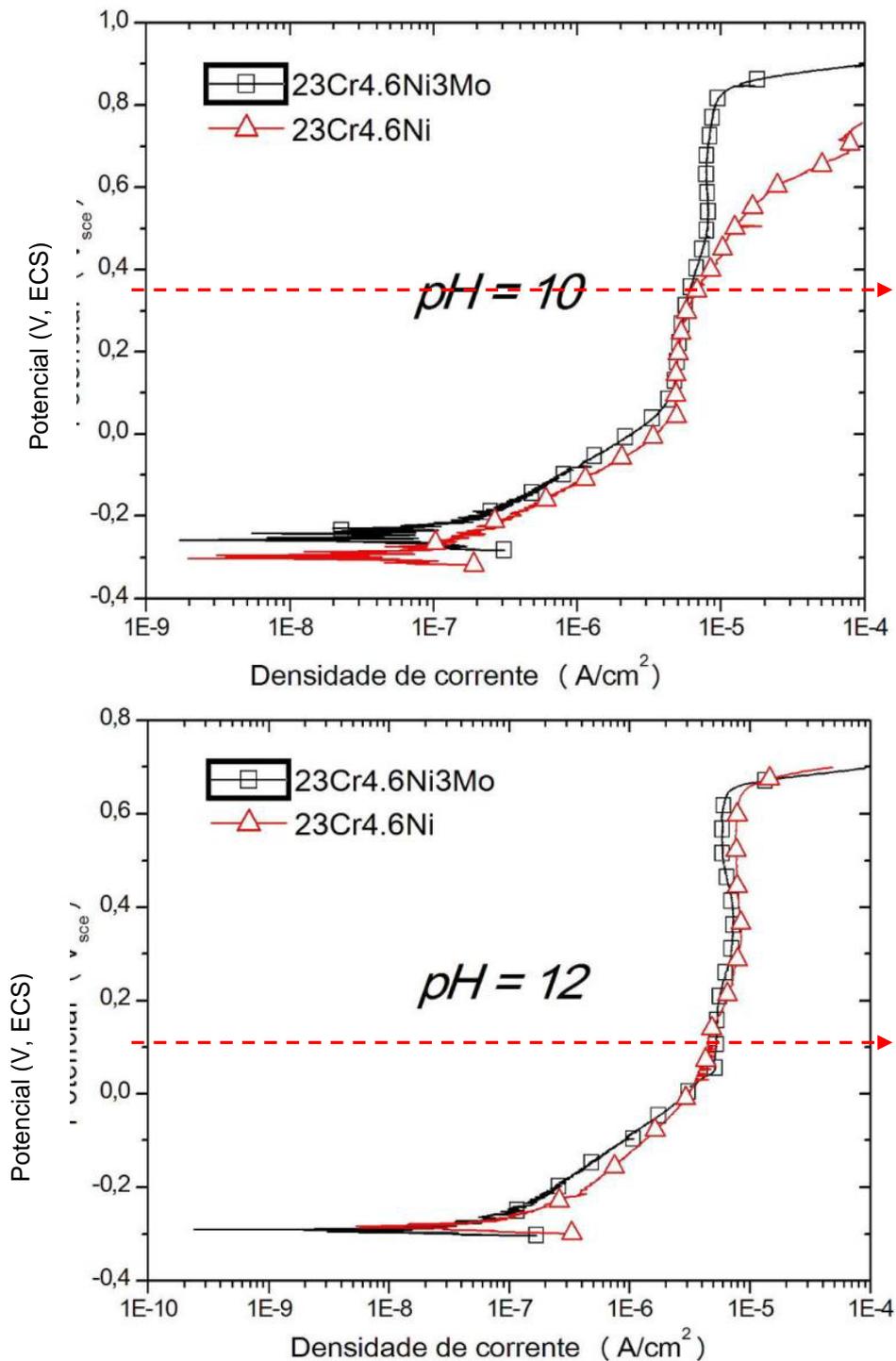


Figura 8 - Curva de polarização anódica dos aços dúplex estudados em solução que simula água de poro de pH 10 e pH 12. Temperatura de 75 °C.

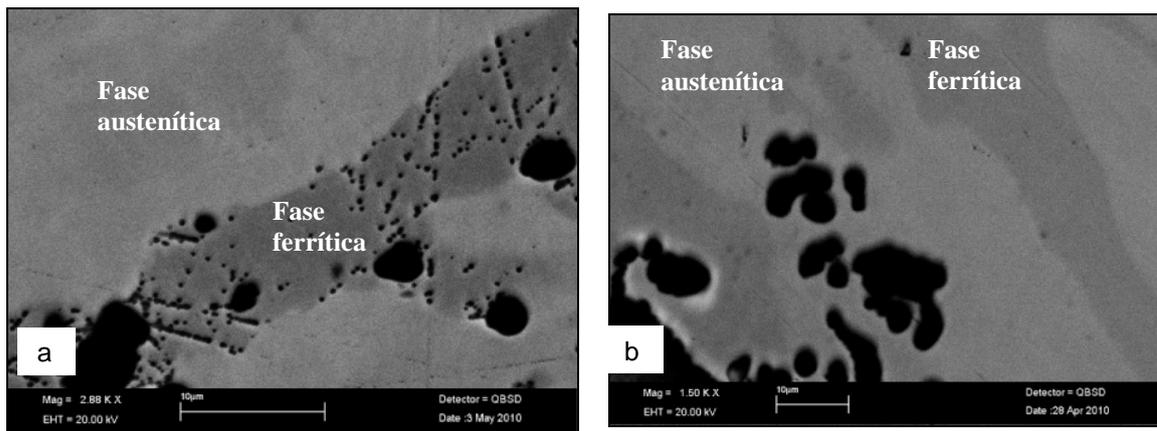


Figura 9 – Imagens obtidas em MEV da superfície dos aços dúplex 23Cr4,6Ni (a) e 23Cr4,6Ni3Mo (b) após o levantamento de curva de polarização anódica em solução que simula água de poro de pH 10.

Ensaios em corpos de prova de concreto

As Figuras 13 e 14 apresentam curvas representativas do monitoramento do potencial de corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos e as Figuras 15 e 16 apresentam curvas semelhantes dos aços ferríticos e dúplex, respectivamente. Nessas figuras, são apresentados os resultados de quatro corpos de concreto (dos dez monitorados) selecionados conforme metodologia descrita anteriormente. Nas figuras, o início do 2º ciclo do ensaio é indicado.

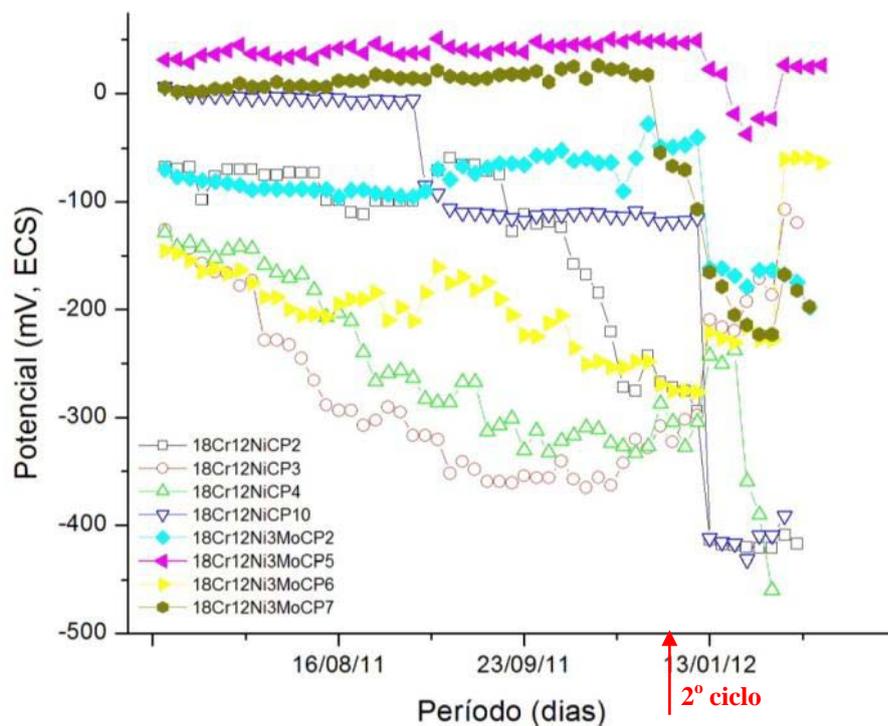


Figura 13 – Potencial de corrosão CP2, CP3, CP4 e CP10 do aço inoxidável 18Cr12Ni e CP2, CP5, CP6 e CP7 do aço inoxidável 18Cr12Ni3Mo durante a contaminação do concreto com íons cloreto.

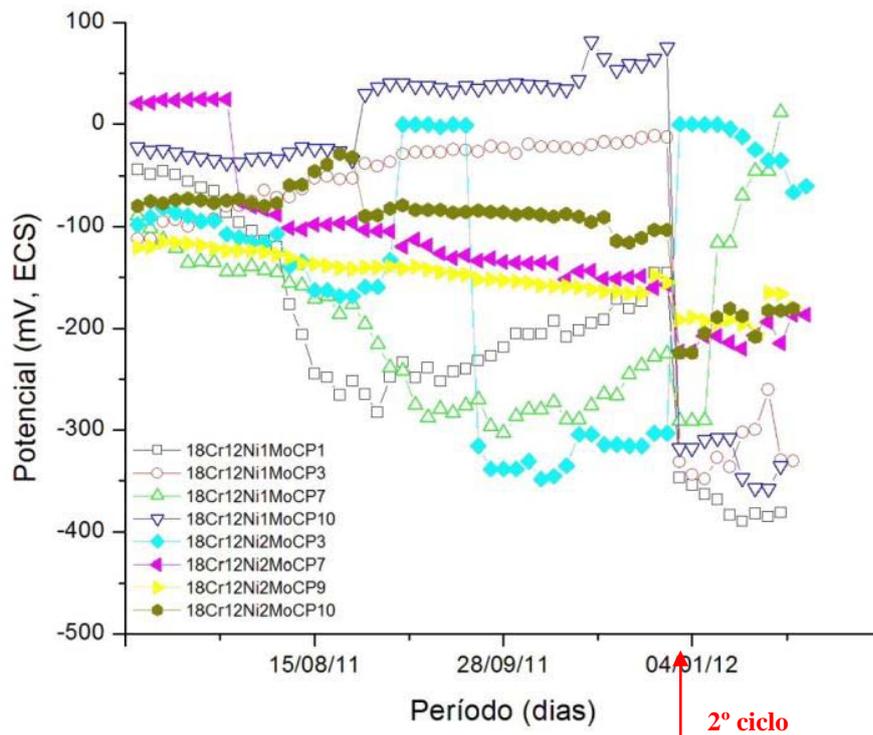


Figura 14 – Potencial de corrosão CP1, CP3, CP7 e CP10 do aço inoxidável austenítico 18Cr12Ni1Mo e CP3,CP7, CP9 e CP10 do aço inoxidável austenítico 18Cr12Ni2Mo durante a contaminação do concreto com íons cloreto.

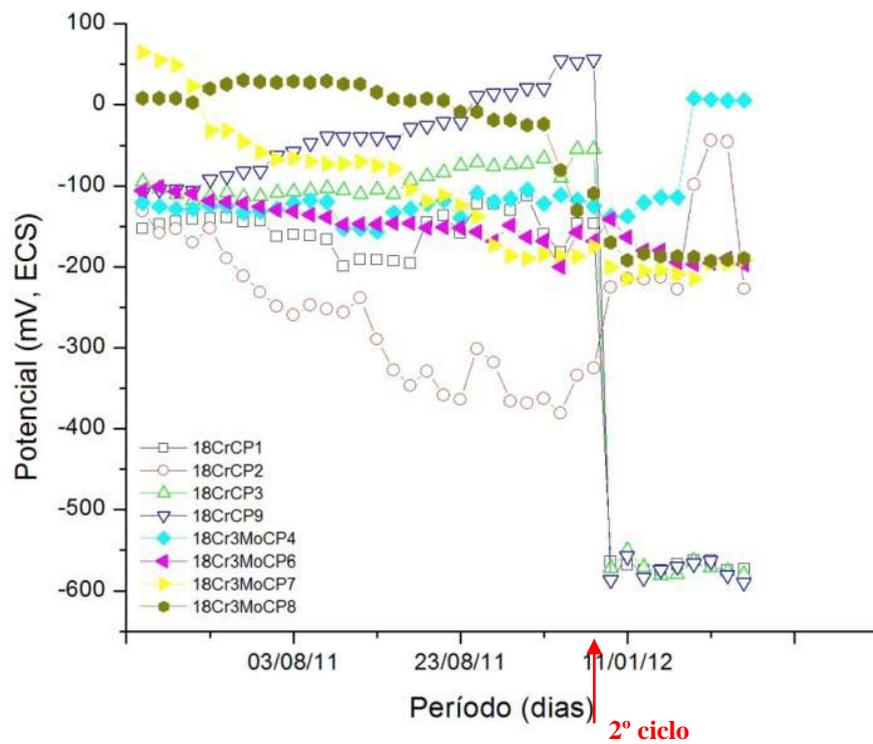


Figura 15 – Potencial de corrosão do CP1, CP2, CP3 e CP9 do aço inoxidável ferrítico 18Cr e CP4, CP6, CP7 e CP8 do aço inoxidável ferrítico 18Cr3Mo durante a contaminação do concreto com íons cloreto.

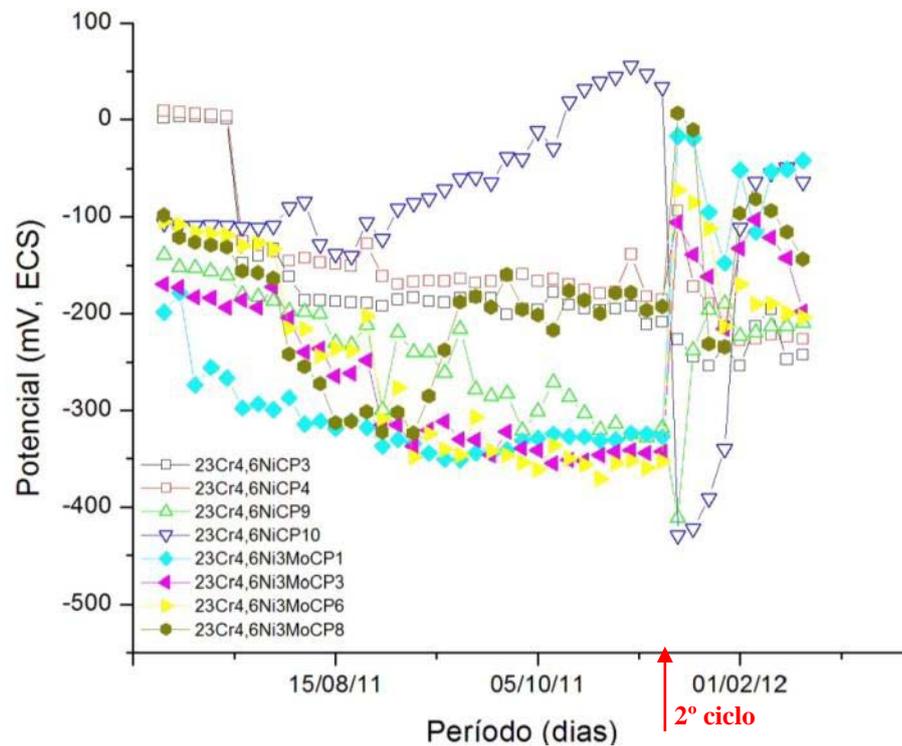


Figura 16 – Potencial de corrosão CP3, CP4, CP9 e CP10 do aço inoxidável duplex 23Cr4,6Ni e CP1, CP3, CP6 e CP8 do aço inoxidável duplex 23Cr4,6Ni3Mo durante a contaminação do concreto com íons cloreto.

Pela Figura 13, observa-se uma tendência mais expressiva na diminuição do potencial de corrosão (para valores mais negativos) do aço inoxidável 18Cr12Ni do que para o aço inoxidável 18Cr12Ni3Mo. Para esse último aço (com 3 % de Mo), observa-se que no primeiro ciclo há uma clara tendência de manutenção de valores elevados (mais positivos), sendo somente no segundo ciclo, observado uma tendência de abaixamento do potencial de corrosão. Dentre os corpos de prova, destaca-se o CP5 por ter mantido ao longo do ensaio valores de potenciais bem elevados, mais positivos do que muitos dos obtidos para os demais corpos de prova.

Pela Figura 14, observa-se para o aço inoxidável 18Cr12Ni1Mo, que houve uma variação expressiva de potencial de corrosão logo no primeiro ciclo para o CP1 e o CP7, enquanto o CP3 e CP10 apresentaram uma variação expressiva somente no segundo ciclo. Para o aço inoxidável 18Cr12Ni2Mo, o CP3 apresentou uma variação expressiva de potencial de corrosão no primeiro ciclo, enquanto, o CP7, o CP9 e o CP10 apresentaram uma variação expressiva somente no segundo ciclo.

Pela Figura 15, observa-se que a grande maioria dos corpos de prova dos aços inoxidáveis ferríticos, sem e com Mo, apresentaram potenciais elevados. No entanto, no segundo ciclo do ensaio, foi observada uma tendência mais expressiva de abaixamento do potencial de corrosão (para valores mais negativos) do aço inoxidável 18Cr do que para o aço inoxidável 18Cr3Mo. Isso pode ser observado claramente no CP1, no CP3 e no CP9. Para o aço inoxidável 18Cr3Mo não se observou uma tendência de comportamento.

Pela Figura 16, referente aos aços inoxidáveis dúplex, observa-se que no primeiro ciclo do ensaio, uma tendência maior de abaixamento do potencial de corrosão (para valores mais negativos) para o aço com Mo (23Cr4,6Ni3Mo) do que para o aço inoxidável sem Mo (23Cr4,6Ni). No segundo ciclo, o inverso ocorre, sendo mais elevados os potenciais de corrosão do aço 23Cr4,6Ni3Mo. Para o aço 23Cr4,6Ni, destacam-se o CP3 e o CP4 por terem mantido ao longo do ensaio valores de potenciais bem elevados, mais positivos do que muitos dos obtidos para os demais corpos de prova.

Pelos resultados expostos, pode-se verificar que o monitoramento do potencial de corrosão não deu subsídios seguros para apontar o comportamento dos aços estudados quanto à tendência à corrosão. Isto porque, os valores de potencial oscilaram expressivamente com o tempo de imersão e, ainda, corpos de prova do mesmo tipo de aço apresentaram comportamentos distintos entre si. Apesar disso, levantaram-se as curvas de polarização seguindo a metodologia pré-estabelecida: dois corpos de prova que apresentavam potenciais mais negativos e, conforme a necessidade, mais um ou dois corpos de prova. As curvas de polarização obtidas apresentaram comportamentos distintos para cada corpo de prova de difícil interpretação, razão pelo qual não foram apresentadas neste trabalho. Cita-se que as curvas obtidas não apresentavam nenhuma correlação com as curvas obtidas em soluções simuladas de água de poros. Diante disso, resolveu-se fraturar e inspecionar todos os corpos de prova, os polarizados e os não polarizados.

As Tabelas 3 a 10 mostram, para todos os corpos de prova dos aços em estudo, o valor de potencial de corrosão ao término do ensaio de imersão, imagens (obtidas em estereoscópio) da face exposta (ao concreto) das pastilhas e a descrição sucinta do estado da superfície ensaiada. As Tabelas 3 a 6 referem-se aos aços inoxidáveis austeníticos, as Tabelas 7 e 8 aos aços inoxidáveis ferríticos e, as Tabelas 9 e 10, aos aços inoxidáveis dúplex. Observando todas essas tabelas, verifica-se que na grande maioria dos casos, houve ocorrência de corrosão nas frestas formadas entre a resina de embutimento e a pastilha de aço, em maior ou menor grau. Além disso, nessas tabelas não se verificou nenhuma correlação clara da ocorrência da corrosão em fresta com o valor do potencial de corrosão apresentado. Isso explica a diferença de comportamento das curvas de potencial em função do tempo, comentada anteriormente.

É importante informar que logo após a fratura dos corpos de prova, os produtos de corrosão formados na região das frestas apresentavam coloração esverdeada, típica de íons ferrosos, e os quais, passados alguns minutos, assumiam coloração avermelhada típica de íons férricos.

Pelas Tabelas 3 a 10, pode-se observar que somente para o aço inoxidável austenítico com 3 % de Mo (18Cr12Ni3Mo, Tabela 6) algumas pastilhas (CP5, CP6 e CP7) não apresentaram indícios de corrosão em fresta. Comportamento semelhante foi observado para o aço inoxidável ferrítico com 3 % de Mo (18Cr3Mo, Tabela 8), com três pastilhas (CP5, CP6 e CP7) não apresentando indícios de corrosão em fresta. Esse ocorrido pode ser um indício do efeito benéfico do Mo na resistência à corrosão dos aços austeníticos e ferríticos em concreto.

Quanto ao aço inoxidável dúplex (Tabela 9 e 10), duas pastilhas sem Mo (23Cr4,6Ni, CP3 e CP9) e cinco pastilhas com Mo (23Cr4,6Ni3Mo, CP1, CP3, CP4, CP5 e CP6) não apresentaram corrosão nas frestas formadas entre a resina e a pastilha. Esses resultados podem ser considerados um indicativo da maior resistência dos aços dúplex à corrosão em concreto do que os aços austeníticos e ferríticos em estudo.

Tabela 3 – Resultados obtidos para o aço inoxidável 18Cr12Ni ao término do ensaio em concreto

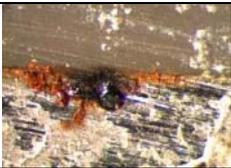
Corpo de prova (CP)	Potencial (mV, ECS)	Imagens da pastilha embutida na resina		Descrição sucinta do estado da superfície
		Vista geral	Detalhe da corrosão	
CP1	-176,34			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP2	-417,13			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP3	-119,31			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP5	-284,10			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP6	-302,49			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP9	-404,65			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP4	-204,16			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP7	+102,61			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP10	-391,15			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.

Tabela 4 – Resultados obtidos para o aço inoxidável 18Cr12Ni1Mo ao término do ensaio em concreto

Corpo de prova (CP)	Potencial (mV, ECS)	Imagens da pastilha embutida na resina		Descrição sucinta do estado da superfície
		Vista geral	Detalhe da corrosão	
CP2	-13,68			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP3	-330,57			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP4	+24,33			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP5	-250,01			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP6	-143,06			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP7	+11,31			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP1	-381,37			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP9	-154,94			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP10	-335,51			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.

Tabela 5 – Resultados obtidos para o aço inoxidável 18Cr12Ni2Mo ao término do ensaio em concreto

Corpo de prova (CP)	Potencial (mV, ECS)	Imagens da pastilha embutida na resina		Descrição sucinta do estado da superfície
		Vista geral	Detalhe da corrosão	
CP1	+13,81			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP3	-60,45			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP4	-8,26			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP5	+24,23			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP7	-186,46			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP8	-164,45			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP2	-148,42			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP9	-180,25			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP 10	-180,76			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.

Tabela 6 – Resultados obtidos para o aço inoxidável 18Cr12Ni3Mo ao término do ensaio em concreto

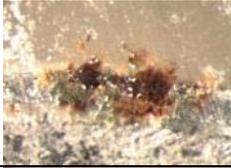
Corpo de prova (CP)	Potencial (mV, ECS)	Imagens da pastilha embutida na resina		Descrição sucinta do estado da superfície
		Vista geral	Detalhe da corrosão	
CP1	-96,11			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP5	+26,18		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP6	-63,39		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP9	-141,36			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP10	-63,26			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP2	-198,06			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP3	+11,17			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP4	-121,97			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP7	-197,30		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.

Tabela 7 – Resultados obtidos para o aço inoxidável 18Cr ao término do ensaio em concreto

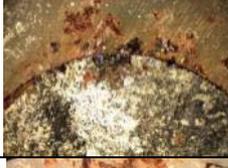
Corpo de prova (CP)	Potencial (mV, ECS)	Imagens da pastilha embutida na resina		Descrição sucinta do estado da superfície
		Vista geral	Detalhe da corrosão	
CP2	-227,10			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP5	-588,00			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP6	-442,60			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP8	-513,90			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP9	-589,60			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP10	-581,30			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP1	-572,30			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP3	-579,50			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP7	-600,20			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.

Tabela 8 – Resultados obtidos para o aço inoxidável 18Cr3Mo ao término do ensaio em concreto

Corpo de prova (CP)	Potencial (mV, ECS)	Imagens da pastilha embutida na resina		Descrição sucinta do estado da superfície
		Vista geral	Detalhe da corrosão	
CP1	-194,10			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP2	-44,90			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP3	-253,20		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP4	+5,00			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP8	-189,44		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP10	-28,74			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP6	-196,65			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP7	-191,43			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP9	-172,40			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.

Tabela 9 – Resultados obtidos para o aço inoxidável 23Cr4,6Ni ao término do ensaio em concreto

Corpo de prova (CP)	Potencial (mV, ECS)	Imagens da pastilha embutida na resina		Descrição sucinta do estado da superfície
		Vista geral	Detalhe da corrosão	
CP2	-424,97			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP5	-295,90			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP8	-124,45			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP9	-209,58		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP10	-63,45			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP1	-222,85			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP3	-242,50		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha
CP4	-226,14			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP7	-173,96			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.

Tabela 10 – Resultados obtidos para o aço inoxidável 23Cr4,6Ni3Mo ao término do ensaio em concreto

Corpo de prova (CP)	Potencial (mV, ECS)	Imagens da pastilha embutida na resina		Descrição sucinta do estado da superfície
		Vista geral	Detalhe da corrosão	
CP2	-40,45			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP4	+9,89		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP8	-143,44			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP1	+63,49		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP3	-146,50		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP5	-233,41		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP6	-177,30		-	Corpo de prova preservado, sem presença de corrosão entre a resina e a pastilha.
CP7	-203,66			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.
CP10	+131,96			Corrosão na fresta formada entre a resina e a pastilha.

Algumas das pastilhas dos corpos de prova polarizados foram submetidas a exames no microscópio eletrônico de varredura (MEV) juntamente com análise química por espectroscopia por dispersão de energia (EDS). As Figuras 17 a 19 mostram as imagens obtidas para os três diferentes tipos de aços, com e sem molibdênio e, a Tabela 11, mostra resultados de análise química. Pelas Figuras 17 a 19, pode-se verificar nitidamente a ocorrência de corrosão na interface resina/aço e, na Tabela 11, a presença de cloretos e de oxigênio em alta concentração em algumas das frestas.

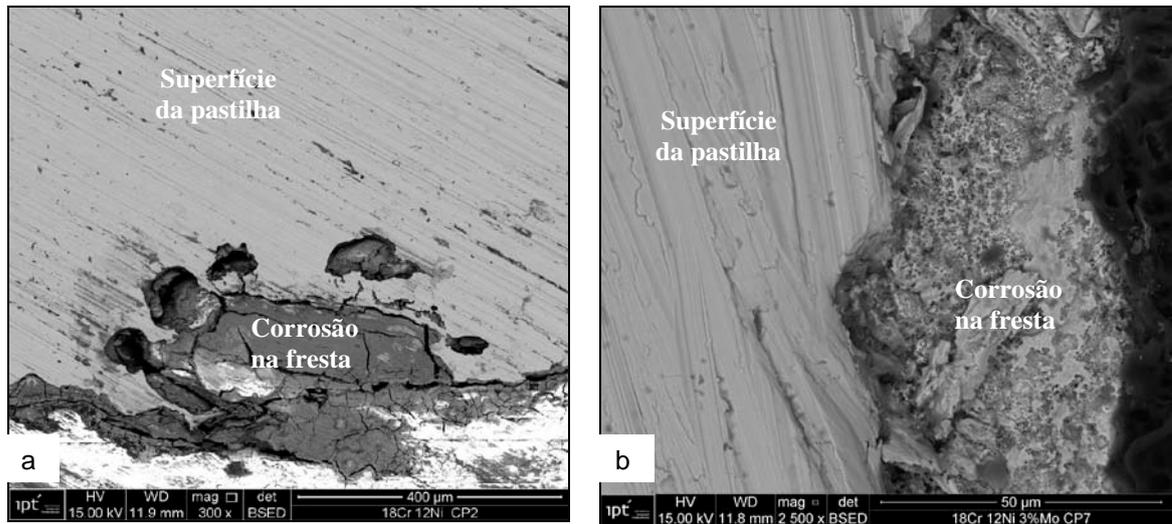


Figura 10 – Imagens da corrosão na fresta formada entre a resina de embutimento e a superfície da pastilha dos aços austeníticos 18Cr12Ni, CP2 (a) e 18Cr12Ni3Mo, CP7 (b) ao término do ensaio, após o levantamento de curva de polarização anódica.

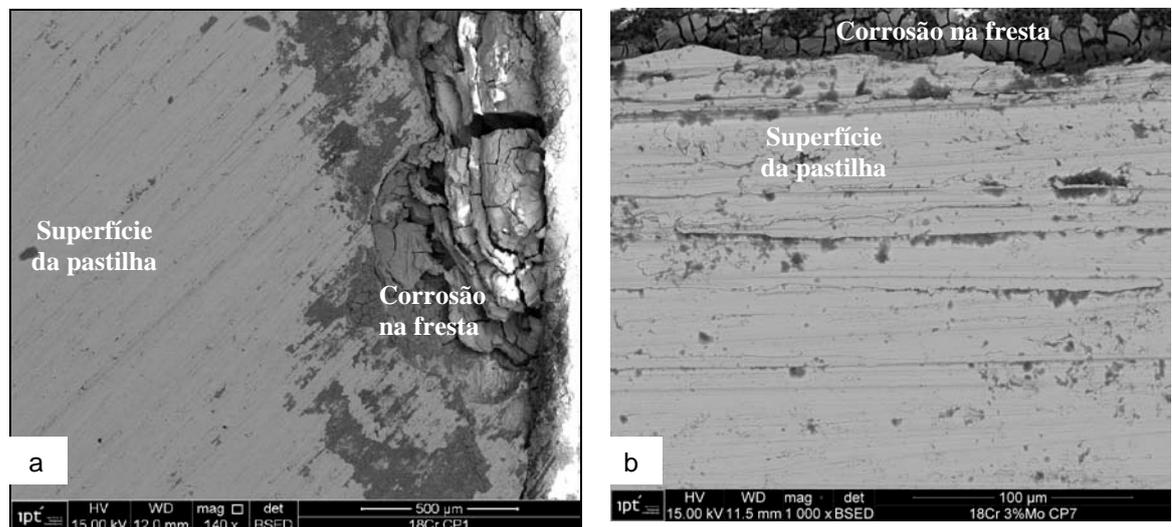


Figura 11 – Imagens da corrosão na fresta formada entre a resina de embutimento e a superfície da pastilha dos aços ferríticos 18Cr, CP1 (a) e 18Cr3Mo, CP7 (b) ao término do ensaio, após o levantamento de curva de polarização anódica.

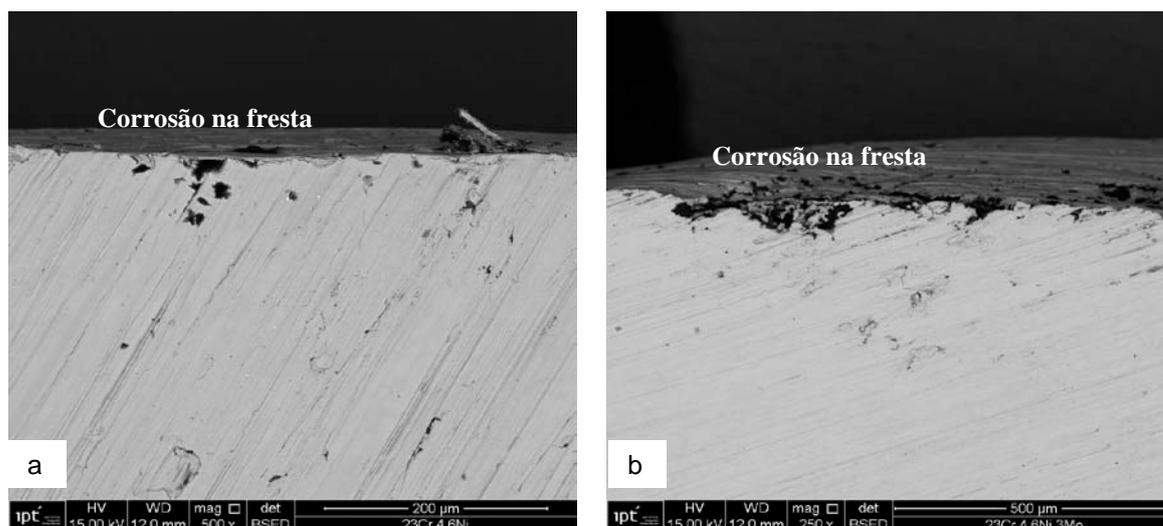


Figura 12 – Imagens da corrosão na fresta formada entre a resina de embutimento e a superfície da pastilha dos aços dúplex 23Cr4,6Ni, CP7 (a) e 23Cr4,6Ni3Mo, CP10 (b) ao término do ensaio, após o levantamento de curva de polarização anódica.

Tabela 3 – Principais elementos detectados na região de fresta formada entre pastilhas dos aços em estudo aço e a resina de seu embutimento

Aço	C	N	O	Al	Si	S	Cl	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
Concentração (% em massa)												
18Cr (CP1)	12,13	7,65	75,31	-	0,19	0,45	1,24	2,49	-	0,54	-	-
18Cr3Mo (CP7)	5,25	18,34	58,89	-	0,19		0,13	0,26	-	0,6	-	-
18Cr12Ni (CP2)	8,82	-	62,92	0,13	0,75	2,35	1,98	14,12	-	6,87	2,05	-
18Cr12Ni3Mo (CP7)	22,94	-	7,51	-	0,39	-	0,38	15,54	1,76	44,22	5,53	1,73
23Cr4,6Ni (CP7)	18,6	-	2,11	0,31	0,75	0,06	0,13	18,8	1,02	51,55	2,93	-
23Cr4,6Ni3Mo (CP10)	41,21	-	4,96	0,28	0,45	-	-	14,73	0,71	34,18	2,17	1,31

Conclusões

Os ensaios de imersão em soluções alcalinas de pH 10, que é representativo de água de poro de concreto carbonatado, mostraram claramente a influência positiva da adição de Mo nos aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e dúplex de laboratório. Os aços sem Mo, ou com baixo teor de Mo, apresentaram menores valores de potencial de quebra de passivação, com incidência de pites de corrosão. Neste pH, houve uma diferença do potencial de pite entre os aços austeníticos, ferríticos e dúplex, com e sem Mo, da ordem de torno 100 mV (SCE), 200 mV (SCE), 400 mV (SCE), respectivamente. Para soluções alcalinas de pH 12, o efeito do Mo não foi tão evidente.

Nos corpos de prova de concreto, a ocorrência de corrosão preferencial nas frestas formadas entre a resina e as pastilhas dos aços inoxidáveis em estudo impossibilitou a sua avaliação quanto à resistência à corrosão por pite. Com isso, os resultados dos corpos de prova em concreto não puderam ser comparados com os obtidos em soluções de água de poros. No

entanto, a avaliação da corrosão em fresta entre os diferentes tipos de aço em estudo, possibilitou verificar uma tendência de maior resistência à corrosão dos aços com adição de Mo. Além disso, verificou-se uma tendência de maior resistência à corrosão dos aços dúplex 23Cr4.6Ni3Mo em relação aos austeníticos e ferríticos.

A presença de caminhos preferências e, conseqüentemente, a ocorrência de corrosão em fresta em ambos os ensaios (em solução e em concreto) indicou a necessidade de estabelecimento de uma metodologia de preparo de corpos de prova para os ensaios eletroquímicos de aços inoxidáveis, especialmente de corpos de prova embutidos em resina. Esta necessidade é maior para os estudos do comportamento destes aços em concreto, pois neste meio a ocorrência de corrosão em frestas só é percebida após o término do ensaio, quando da fratura dos corpos de prova. Esses ensaios serão realizados em paralelo ao desenvolvimento de uma nova norma europeia para caracterização de aços inoxidáveis para aplicação em concreto. Esta nova norma esta em fase de desenvolvimento.

Referências bibliográficas

- (1) NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE RP0187**: design considerations for corrosion control of reinforcing steel in concrete. Houston, 2008. 22 p.
- (2) CARMONA, A.; ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução de Antonio Carmona; Paulo Roberto do Lago Helene. São Paulo: Pini, 1992. 103 p.
- (3) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 222R-01**: protection of metals in concrete against corrosion. Michigan, 2010. 41p.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: projetos de estruturas de concreto: procedimentos. Rio de Janeiro, 2003. 170 p.
- (5) ABBOTT, C. J. Corrosion-free concrete structures with stainless steel. **Concrete**, London, v.31, n.5, p. 28-37, 1997.
- (6) PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo: IPT, 1993. v. 1. 280 p.
- (7) PARDO, A. et al. Pitting corrosion behavior of austenitic stainless steels: combining effects of Mn and Mo additions. **Corrosion Science**, Oxford, v. 50, n. 6, p. 1796-1806, 2008.
- (8) HALADA, G. P.; CLAYTON, C. R.; HERMAN, H. An X-Ray Photoelectron Spectroscopic Study of the Passive Film Formed on Pure Mo and MoSi₂ in 4M HCl. **Journal of the Electrochemical Society**, Pennington, v. 142, n. 1, p. 74-81, 1995.
- (9) ADDARI, D.; ELSENER, B.; ROSSI, A. Electrochemistry and surface chemistry of stainless steels in alkaline media simulating concrete pore solutions. **Electrochimica Acta**, New York, v. 53, n. 27, p. 8078-8086, 2008.
- (10) NILSSON, J. O. Overview super duplex stainless steels. **Materials Science Technology**, London, v.8, p. 685-699, Aug. 1992.
- (11) PERREN, R. et al. Corrosion resistance of super duplex stainless steels in chloride ion containing environments: investigations by means of new microeletrochemical method I. precipitation-free states. **Corrosion Science**, Oxford, v. 43, p. 707-726, 2000.

-
- (12) BERTOLINI, L. F. et al. Behavior of stainless steel in simulated concrete pore solution. **British Corrosion Journal**, London, v. 31, n. 3, p. 218-225, 1996.
 - (13) MORENO, M. et al. Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: effect of carbonation and chloride content. **Corrosion Science**, Oxford, v. 46, n. 11, p. 2681-2699, 2004.
 - (14) MESQUITA, Thiago José. **Stainless steel in alkaline media: the role of molybdenum on pitting and crevice corrosion resistance**, 2010. 58 f. These – INP Grenoble, [S. l.], 2010.
 - (15) ARAUJO, A.; PANOSSIAN, Z. Avaliação de desempenho de vernis acrílico e verinix poliuretano anti antipichação como revestimentos de proteção às estruturas de concreto aparente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 28º 2008, Recife. **Anais...São Paulo**, 2008. 1 CD-ROM
 - (16) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.
 - (17) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248: agregados: determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
 - (18) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11578: cimento portland composto: especificação**. Rio de Janeiro, 1997. 5 p.
 - (19) ZHANG, Fan; PAN, Jinshan; LIN, Changjian. Localized corrosion behavior of reinforcement steel in simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, Oxford, v.51, n. 9, p. 2130-2138, 2009.
 - (20) DENG, Bo. et al. Critical pitting and repassivation temperatures for duplex stainless steel in chloride solutions. **Electrochimica Acta**, New York, v. 53, n. 16, p. 5220-5225, 2008.
 - (21) GAO, Juan. et al. Investigation of selective corrosion resistance of aged lean duplex stainless steel 2101 by non-destructive. **Electrochimica Acta**, New York, v. 54, n. 24, p. 5830-5835, 2009.
 - (22) MESQUITA, Thiago J. et al. Anomalous corrosion resistance behavior of Mo-containing SS in alkaline media: the role of microstructure. **Materials Chemistry and Physics**, Lausanne, v. 126, n. 3, p. 602-606, 2011.

Agradecimentos

A empresa Ugitech Company pelo suporte técnico e produção dos aços inoxidáveis estudados, a Pedro C. Bilesky do LMCC/Agrupamento de Materiais de Construção Civil do IPT pela execução e caracterização dos corpos de prova de concreto e a Andreza Milham e Ana Lúcia A. de Souza do DAIT/Biblioteca IPT pela recuperação de artigos.