



EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DAS ARMADURAS DE AÇO CARBONO E GALVANIZADAS¹

Vanessa de Freitas Cunha Lins²
Maria das Mercês Reis de Castro²
Carlos Roberto Araujo³
Gelmo Chiari Costa⁴
Elbia Starling Pessin⁴
Anna Rachel Leite⁵

Resumo

O objetivo do trabalho é o estudo do efeito da adição de cal na resistência à corrosão das armaduras de aço carbono e galvanizadas. Na pesquisa, utilizou-se argamassa sem cal e com teor de cal de 26,3%, 13,3%, e 6,7% (p/p) e foram medidos os potenciais de corrosão das amostras de aço em argamassa umedecida, antes e após um ciclo de imersão em solução de NaCl 3,5% (p/p). Foi usada a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica para medida da resistência à polarização das armaduras em contato com argamassa com diferentes teores de cal. Nas amostras úmidas, de maneira geral, foi identificado o efeito benéfico da adição de cal à argamassa, elevando o potencial de corrosão e aumentando o valor da resistência à polarização das armaduras de aço carbono e galvanizadas. Nas amostras de argamassa, com e sem adição de cal, reforçadas com armaduras de aço carbono e aço galvanizado, após 1 ciclo de imersão em solução aquosa de NaCl 3,5% (p/p), foi verificada uma tendência de redução do potencial de circuito aberto.

Palavras-chave: Corrosão de armaduras; Argamassa; Cal; Impedância.

EFFECT OF LIME ADDITION ON CORROSION RESISTANCE OF REINFORCED MORTAR WITH CARBON STEEL AND GALVANIZED STEEL

Abstract

The aim of this work is to study the effect of lime addition on corrosion resistance of reinforced mortar with galvanized and carbon steel wires. The contents of lime of 26.3%, 13.3% and 6.7% (wt) were added in mortar, and the corrosion potentials of reinforced mortar, with and without lime addition, were measured before and after the corrosion test of immersion in saline solution 3.5% (wt) of NaCl. Measurements of polarization resistance of steels in reinforced mortar with different contents of lime were performed using electrochemical impedance spectroscopy. The beneficial effect of lime addition was observed, increasing the corrosion potential and the polarization resistance of carbon steel, and galvanized carbon steel. After the immersion of samples in saline solution, a reduction of the corrosion potential of galvanized and carbon steels was identified.

Keywords: Corrosion of reinforcing steel; Mortar; Lime; Impedance.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² SC.D, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais.

³ M.Sc, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

⁴ Engineer, Belgo Bekaert

⁵ Graduanda, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem crescido o número de edificações cujas estruturas de concreto armado têm apresentado manifestações patológicas, principalmente relacionadas com a corrosão das armaduras.⁽¹⁾

Uma vez que a Indústria da Construção Civil no Brasil é uma das grandes responsáveis pelo crescimento do país, sendo o concreto armado largamente utilizado nas construções brasileiras, faz-se necessário a consideração da sua durabilidade na avaliação de um projeto.⁽²⁾ A corrosão de metais no concreto, especialmente do aço, tem recebido atenção crescente nos últimos anos devido a essa ocorrência difundida em certos tipos de estruturas e ao elevado custo para reparos.⁽³⁾

O estudo sobre a corrosão das armaduras do concreto é de grande importância, pois a corrosão das armaduras de aço pode ser considerada uma das principais causas da deterioração do concreto armado.⁽¹⁾ A corrosão provoca não somente a deterioração do material, mas também pode afetar a estabilidade e a durabilidade das estruturas⁽²⁾. Diversos fatores podem ser apontados como responsáveis pela ocorrência desta manifestação patológica: deficiências de projeto, espessura de cobertura insuficiente, especificações e características inadequadas do concreto e de seus materiais constituintes, falhas de execução e manutenção e a ação agressiva do meio ambiente na qual a estrutura está inserida.⁽⁴⁾

O concreto é constituído principalmente de cimento, areia, água e agregados de diferentes tamanhos. Além desta constituição, no concreto armado vem sendo empregado também os inibidores de corrosão. E este emprego está crescendo gradativamente, década após década, sendo estes utilizados como medidas preventivas, incorporados ao concreto no momento de sua fabricação, ou como medida de reparo, aplicados na superfície do concreto.⁽⁵⁾ Vários são os estudos sobre o emprego e desempenho de inibidores de corrosão, entre os quais pode-se citar: Freire,⁽⁵⁾ Andrade,⁽⁶⁾ Alonso,⁽⁷⁾ Alonso e Andrade,⁽⁸⁾ entre outros.

É geralmente aceito que, devido à elevada alcalinidade do concreto, é formada uma camada de óxidos passivantes sobre o aço das armaduras, que fornece uma adequada resistência contra a corrosão. Estes óxidos possuem um componente principal: $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Esta camada é mantida e, em muitos casos, recuperada pela própria reserva alcalina do concreto, cuja natureza porosa permite reter água com pH acima de 12.⁽⁵⁾ Este ambiente passivante pode ser rompido principalmente por dois mecanismos, a partir dos quais a corrosão do aço pode ser iniciada: por ação eletroquímica dos íons cloretos na presença de oxigênio; e/ou por redução da alcalinidade devido à lixiviação das substâncias alcalinas pela ação da água ou devido à neutralização parcial por reação com dióxido de carbono.

No Brasil, são utilizados vários tipos de argamassa na indústria da construção civil: a convencional, constituída de cimento, areia, e água, a argamassa de cal, areia e água, e a argamassa mista, composta de cimento, cal, areia e água, além da industrial, feita de cimento, areia, água e adesivos.

Na utilização de argamassa mista, uma questão que surgiu dentre os construtores é relativa ao efeito da adição de cal na resistência à corrosão das armaduras. Assim, neste trabalho, será avaliada a influência da adição de cal na resistência à corrosão de armaduras de aço carbono e de aço galvanizado, usando-se a técnica eletroquímica de espectroscopia de impedância eletroquímica para medição do valor da resistência à polarização das amostras de aço. O efeito de íons cloreto introduzidos através de imersão parcial de corpos-de-prova em soluções salinas de



NaCl será avaliado, num estudo preliminar, usando-se a medida do potencial de corrosão das amostras. As argamassas estudadas são de cimento, cal e mista.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A produção dos corpos-de-prova foi realizada na empresa PRECON, utilizando-se as seguintes matérias-primas: Cimento CPIII 40 RS – Holcim, Cal Hidratada CHI e Areia quartzosa – processo Precon.

A composição das argamassas é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição das argamassas

Tipo de Argamassa	Traço (proporções massa, cimento: areia)	em cal: p/p)	Concentração de cal (% p/p)
Teor elevado de cal	1:2,5:6		26,3
Teor médio de cal	1:1:6		13,3
Teor mínimo de cal	1:0,5:6		6,7
Sem cal	1:0,0:6		0

O corpo de prova moldado é prismático, de acordo com as dimensões do molde, e o diâmetro do arame é 5,00 mm, tanto da armadura de aço carbono quanto da de aço galvanizado.

Foi realizada a verificação da razão água/cimento por testes de consistência de acordo com a Norma NBR13276.⁽⁹⁾

Foi realizado o procedimento de mistura das matérias-primas de acordo com a Norma NBR13276.⁽⁹⁾ Determinou-se a razão água/cimento para a consistência de (260 ± 5) mm, iniciando os testes com a água a 16% da massa total de sólidos, para cada mistura.

Na moldagem dos corpos de prova, foi feito o preparo dos moldes e a inserção da armação. Vedou-se as extremidades expostas das armaduras com fita isolante; e foi feito o preparo das massas de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Composição das massas

Tipo de Argamassa	Concentração de cal (% p/p)	Cimento (g)	Cal CHI (g)	Areia (g)	Água (g)
Teor elevado de cal	26,3	550,0	1375,0	3.300,0	1.470,0
Teor médio de cal	13,3	650,0	650,0	3.600,0	1.054,0
Teor mínimo de cal	6,7	700,0	350,0	4.200,0	945,0
Sem cal	0	750,0	0,0	4.500,0	985,0

Foi feito o preenchimento de 6 moldes para cada mistura descrita acima (3 com armação galvanizada e 3 com armação sem galvanização), com o total de 24 moldes.

Para cada mistura preparada, procedeu-se aos ensaios de teor de ar incorporado, NBR13278,⁽¹⁰⁾ retenção de água, NBR13277,⁽¹¹⁾ e moldagem dos corpos-de-prova (CP) para ensaios de resistência à compressão (idades: 3, 7 e 28 dias).

A identificação dos moldes de acordo com a mistura e o tipo de armação foi feita considerando-se o teor de cal: Teor: E (elevado), M (médio), B (baixo), S (sem cal) e o tipo de armadura: G (galvanizado), A (aço carbono)

Após a produção dos corpos de prova, realizou-se a medição do potencial de corrosão das amostras antes e após o teste de imersão parcial em solução de NaCl 3,5% (p/p) analisando-se o efeito da adição de cal na resistência à corrosão das armaduras de aço.

O potencial de circuito aberto foi medido nas amostras úmidas como recebidas; e após um ciclo de imersão em solução de NaCl 3,5% (p/p).

Para a medida do potencial de corrosão foi utilizado o potenciostato Omnimetra PG-29, acoplado a um microcomputador para a aquisição de dados. Como eletrodo de referência foi utilizado o eletrodo de Ag/AgCl. Uma chapa de aço inoxidável foi usada como contra-eletrodo. O eletrodo de referência é posicionado na face superior do corpo-de-prova, no centro do mesmo.

O equipamento utilizado para a realização dos testes de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica foi o potenciostato AUTOLAB 30, acoplado ao microcomputador, controlado pelo software FRA for Windows v. 2.3 da Eco Chemie B. V. A faixa de frequência empregada foi de 100 kHz até 1 mHz, com uma amplitude de 20 mV AC, no potencial de circuito aberto (E_{corr}). O eletrodo de referência foi Ag/AgCl, e o contra-eletrodo foi uma chapa de aço inoxidável austenítico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinou-se a razão água/cimento para a consistência de (260 ± 5) mm, iniciando os testes com a água a 16% da massa total de sólidos, para cada mistura, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado da razão água/cimento por mistura

Tipo de Argamassa	Concentração de cal (% p/p)	Razão Água/Cimento
Teor elevado de cal	26,3	2,67
Teor médio de cal	13,3	1,62
Teor mínimo de cal	6,7	1,35
Sem cal	0	1,31

Deve-se ressaltar que uma maior razão água/cimento, como a observada para a amostra com teor elevado de cal, tende a gerar maior porosidade e a beneficiar a entrada de agentes agressivos ao aço da armadura e ao próprio cimento.

A Tabela 4 fornece os valores do percentual de ar incorporado e retenção de água, para cada tipo de argamassa.

Tabela 4 – Teor de ar incorporado e retenção de água

Tipo de Argamassa	Teor de ar incorporado (%)	Retenção de Água (%)
Teor elevado de cal	3,4%	96,6%
Teor médio de cal	4,2%	98,3%
Teor mínimo de cal	5,8%	98,8%
Sem cal	6,1%	91,4%

A princípio, um maior teor de ar incorporado pode significar uma maior facilidade da entrada de agentes gasosos agressivos à armadura como o oxigênio e o gás carbônico. A reação catódica dominante no caso da corrosão de armaduras é a reação entre a água e o oxigênio, assim, um maior teor de ar incorporado facilitaria o processo corrosivo. Entretanto, a análise deve ser feita levando-se em conta a estrutura de poros da amostra.

A Tabela 5 fornece os valores da resistência à compressão de acordo com o tipo de argamassa.

Tabela 5 – Resistência à compressão das amostras de argamassa

Tipo de Argamassa	Resistência à compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
Teor elevado de cal	0,68	1,48	2,67
Teor médio de cal	2,07	4,58	7,14
Teor mínimo de cal	2,39	6,10	8,56
Sem cal	2,28	4,94	7,86

Os maiores valores da resistência à compressão, obtidos após o período de cura de 28 dias, foram para as amostras sem adição de cal ou com o menor teor de cal, demonstrando a tendência da adição de cal reduzir a resistência à compressão das amostras.

A Figura 1 mostra os valores de potencial de circuito aberto das armaduras galvanizadas em argamassa com e sem adição de cal, medidos antes e após a imersão de 2 dias em solução de NaCl 3,5% (p/p) seguidos de um período de secagem de 5 dias em ambiente de laboratório.

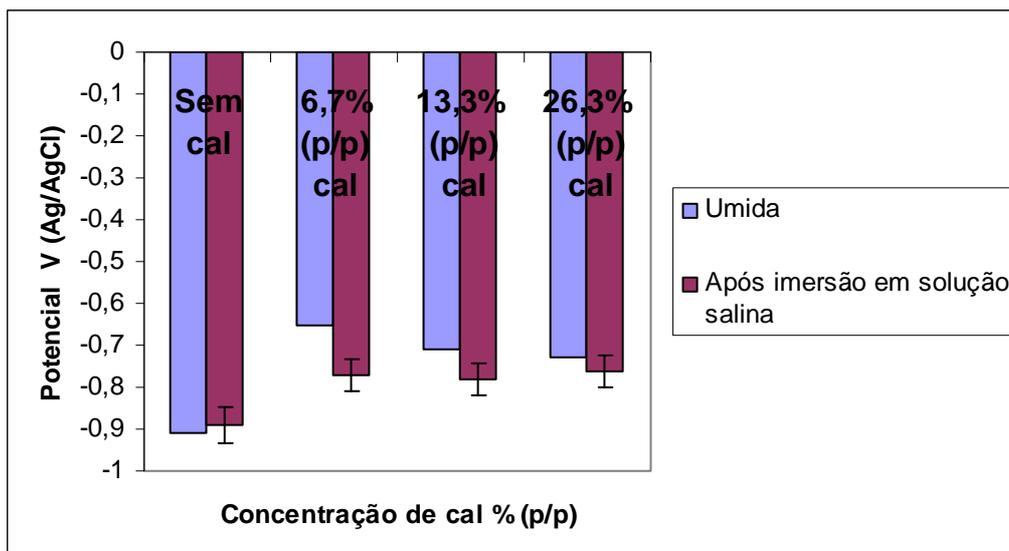


Figura 1 – Potencial de circuito aberto das armaduras galvanizadas em argamassa com e sem adição de cal.

De maneira geral, a adição de cal elevou o potencial de corrosão das armaduras galvanizadas, como apresentado na Figura 1. No caso da argamassa com cal, o gás carbônico, CO₂, é necessário para a cura da argamassa com óxido de cálcio nas alvenarias. O gás carbônico, CO₂, aumenta a região de passivação do zinco.

Existem três principais mecanismos de corrosão de arames galvanizados, ou do zinco, em contato com materiais de construção como concreto ou argamassa⁽¹²⁾. O primeiro mecanismo ocorre no início quando o sistema se encontra umedecido ou quando o processo de endurecimento não atingiu 95% da matriz, num período de até 48 horas. Quando o sistema é alcalino, o zinco reage com os íons hidroxila e o cálcio de acordo com a equação 1.



A formação de zincato de cálcio ocorre devido ao caráter anfótero do zinco. O zincato de cálcio contribui para melhorar a adesão entre o zinco e a matriz. Entretanto, se a reação de formação do zincato de cálcio ocorre de forma muito rápida, o hidrogênio produzido reduz a resistência do compósito na medida em que uma camada esponjosa é formada em torno do arame.

Após a solidificação, a taxa de corrosão do zinco é baixa devido a passivação no meio alcalino. Em meios contendo CO₂, a área de passivação do zinco no Diagrama de Pourbaix aumenta. Assim, inicialmente, o efeito da entrada de dióxido de carbono na argamassa é benéfico. Entretanto, quando o dióxido de carbono promove a redução do pH a valores inferiores a 6, o efeito do CO₂ se torna prejudicial com relação a resistência à corrosão do zinco.

Uma terceira fase do processo corrosivo do zinco em argamassa se inicia quando existe a degradação do meio e a entrada de agentes agressivos como sais e dióxido de carbono, além da água e oxigênio. Assim, o zinco se torna exposto ao ambiente externo. A entrada de dióxido de carbono promove a carbonatação do concreto ou argamassa, provocando a redução do pH do meio. Quando o pH atinge valores inferiores a 6, a taxa de corrosão do zinco aumenta significativamente. No caso das



armaduras de aço, o início da corrosão ocorre em valores de pH superiores, iguais a 10. Neste aspecto, o zinco apresenta um comportamento superior ao do aço. A Figura 2 apresenta a curva do potencial em função do tempo para a amostra de aço carbono em argamassa sem cal, antes do teste de corrosão. No caso das armaduras de aço carbono, o efeito benéfico da cal foi mais pronunciado para médio (13,3% p/p) e alto (26,3% p/p) teor de cal. A adição de 6,7% p/p de cal na argamassa não alterou significativamente o potencial de corrosão da armadura, no caso da amostra úmida, como mostrado na Figura 3. Após o teste de imersão em solução salina por 2 dias, os valores dos potenciais de circuito aberto já apresentaram uma tendência de redução.

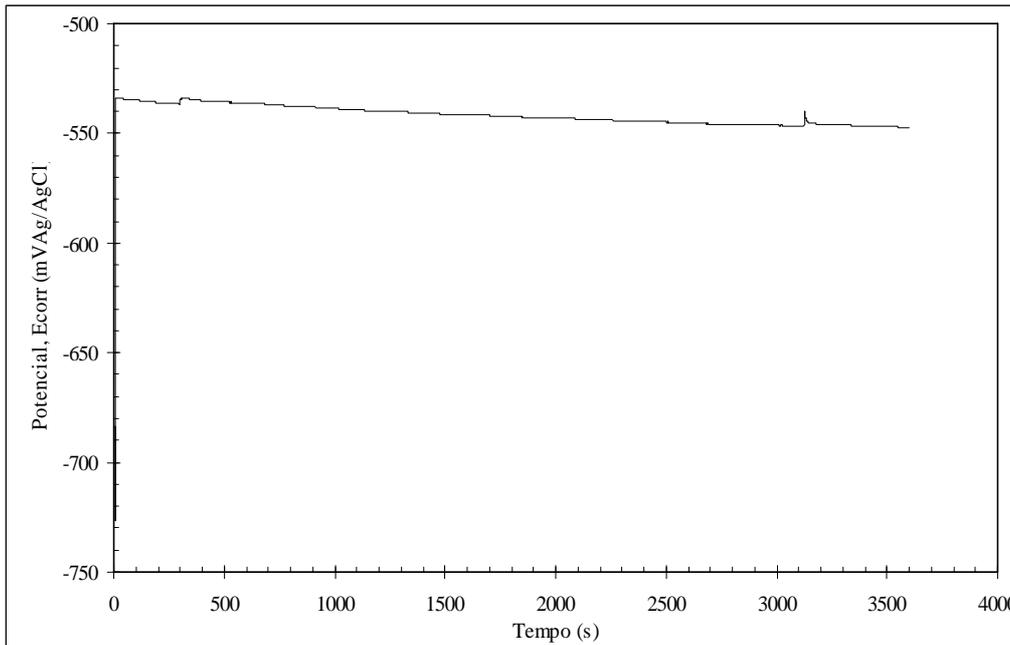


Figura 2 – Curva potencial em função do tempo para a amostra e aço carbono em argamassa sem adição de cal, antes do teste de corrosão.

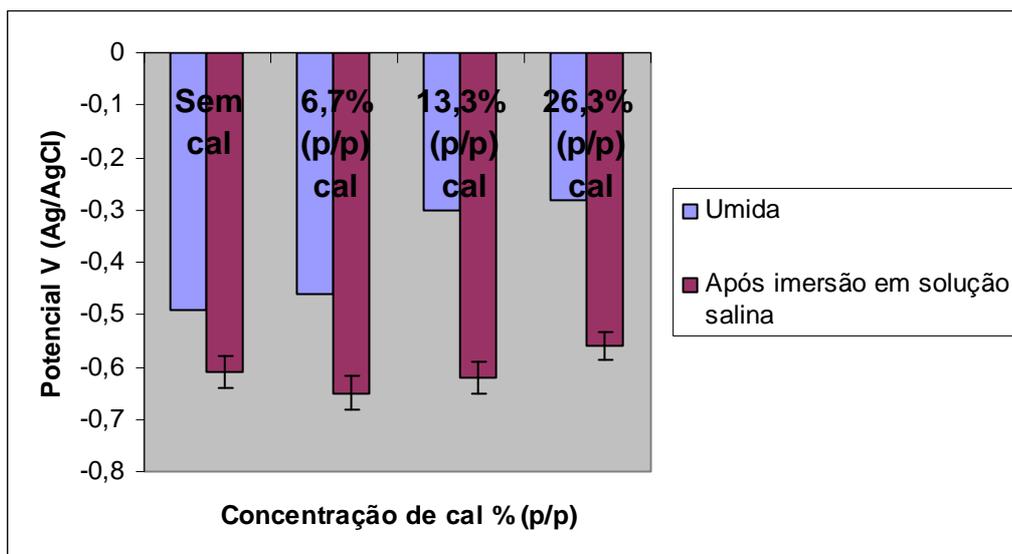
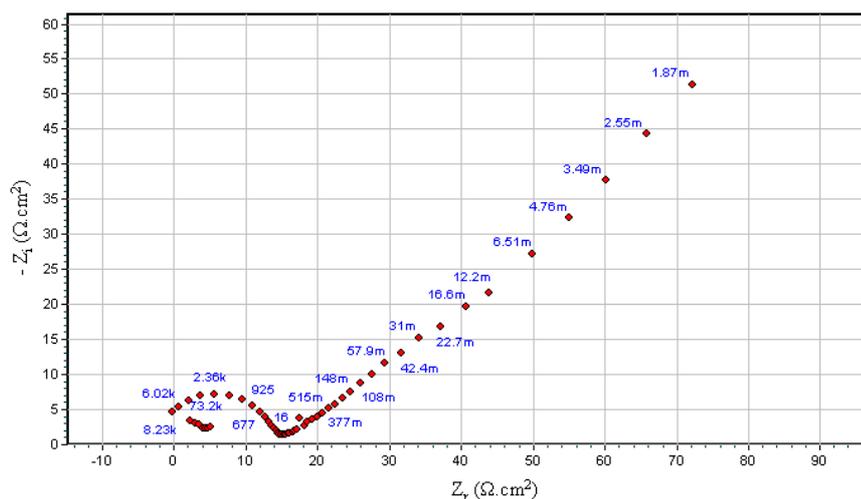


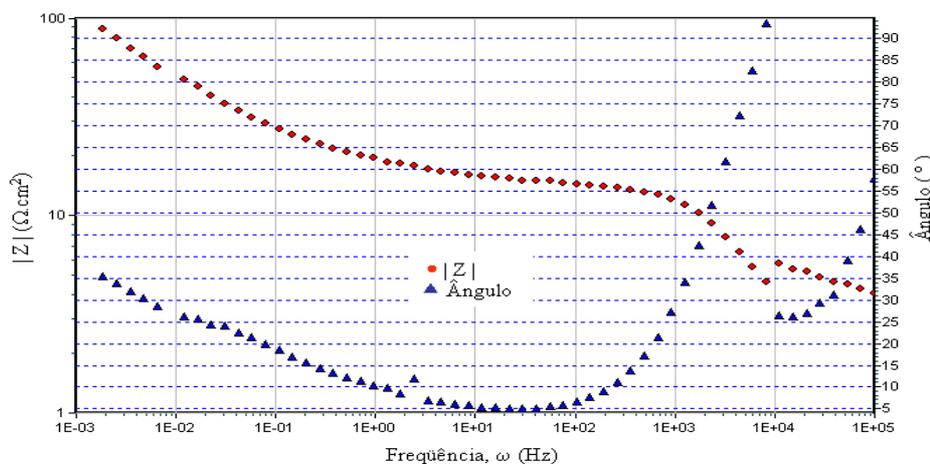
Figura 3 – Potencial de circuito aberto das armaduras de aço carbono em argamassas com e sem adição de cal, antes e após o teste de imersão em solução salina.



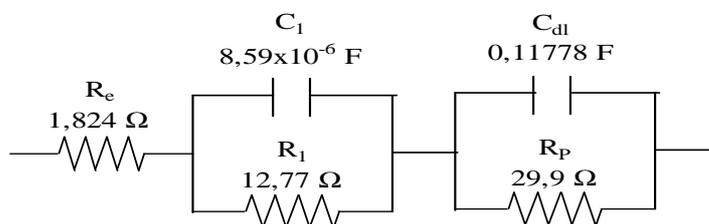
A Figura 4 apresenta os resultados da análise de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica para a armadura de aço carbono galvanizado em argamassa sem cal, em eletrólito de NaCl 3,5% (p/p). Foram observados dois semi-círculos para todas as amostras analisadas. A intersecção do primeiro semi-círculo com a abscissa no Diagrama de Nyquist fornece os valores da resistência do eletrólito na região de mais alta frequência e a resistência à transferência de carga. A intersecção do segundo semi-círculo com a abscissa na região de baixa frequência fornece o valor da resistência à polarização.



(a)



(b)



(c)

Figura 4 - Resultado da análise usando-se Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para armadura de aço carbono galvanizado em argamassa sem cal, em eletrólito de NaCl 3,5% (p/p): (a) Nyquist, (b) Bode e (c) Circuito equivalente.

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos, usando-se a técnica de EIE, de resistência à polarização para as amostras de aço carbono e aço carbono galvanizado em argamassas com e sem adição de cal.



Tabela 6 – Valores da resistência à polarização para as amostras de aço carbono e aço carbono galvanizado em argamassas com e sem adição de cal, em eletrólito de NaCl 3,5% (p/p), à temperatura ambiente

AMOSTRA	E_{corr} (mV _{Ag/AgCl})	R_p ($\Omega \cdot cm^2$)
AÇO CARBONO		
Argamassa sem cal	- 549,0	6,51
Adição de 6,7% (p/p) de cal	- 548,4	18,34
Adição de 13,3% (p/p) de cal	- 530,7	13,08
Adição de 26,3% (p/p) de cal	- 493,5	17,75
AÇO AO CARBONO GALVANIZADO		
Argamassa sem cal	- 557,0	29,9
Adição de 6,7% (p/p) de cal	- 503,85	24,49
Adição de 13,3% (p/p) de cal	- 543,82	56,8
Adição de 26,3% (p/p) de cal	- 666,20	68,13

Para as armaduras de aço carbono, a adição de cal na argamassa elevou os valores da resistência à polarização das amostras, sendo benéfico para a resistência à corrosão das armaduras. A adição de 13,3% e 26,3% (p/p) de cal à argamassa elevou a resistência à polarização das armaduras de aço galvanizado. A adição do teor de 6,7% (p/p) de cal na argamassa não alterou significativamente a resistência à polarização da armadura galvanizada, mas aumentou o potencial de circuito aberto. Um resultado contrário à tendência de aumento do potencial de corrosão com a adição de cal à argamassa foi encontrado para a armadura de aço galvanizado em argamassa com adição de 26,3% (p/p) de cal, antes do teste de impedância eletroquímica. Entretanto, os resultados médios dos valores obtidos para o potencial de corrosão das amostras galvanizadas em argamassa com cal foram superiores à média do potencial de corrosão das armaduras galvanizadas em argamassa sem cal.

4 CONCLUSÕES

Foi observado o efeito benéfico da adição de cal à argamassa de cimento em relação à resistência à corrosão das armaduras de aço carbono e aço carbono galvanizado.

Foi identificada uma tendência de aumento do potencial de corrosão e da resistência à polarização das armaduras de aço carbono e galvanizado com a adição de cal na argamassa em teores de 6,7%, 13,3% e 26,3% (p/p).

Após o teste de imersão parcial das amostras em solução de cloreto de sódio foi verificada a redução do potencial de corrosão das armaduras.

Agradecimentos

Os autores agradecem as Empresas Belgo Bekaert e PRECON pelo suporte técnico e fornecimento das amostras e às agências Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e Conselho Nacional de Desenvolvimento



Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte à pesquisa e financiamento para a participação no congresso.

REFERÊNCIAS

- 1 GENTIL, V. *Corrosão*. 5ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- 2 TAVARES, L. M. *Estudo do processo de corrosão por íons cloreto no concreto armado utilizando armaduras comuns e galvanizadas*. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2006.
- 3 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 222R-96, Corrosion of metals in concrete. Detroit, 1997.
- 4 BICZOK, I. *Corrosión y protección del hormigón*. España: Urno S. A. De Ediciones, 1968.
- 5 FREIRE, Karla R. R. *Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto*. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/Paraná. 2005.
- 6 ANDRADE, C.. Nueva técnica eletroquímica de medida de La velocidad de corrosion de armaduras em hormigones armados y pretensados. Empleo de aditivos inibidores como método de protección. Tese de doutorado. Universidad Complutense de Madri. Madrid, 1973.
- 7 ALONSO, C. *et al.* Na₂PO₃F as inhibitor of corroding reinforcement in carbonated concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 3, p. 405-415, 1996.
- 8 ALONSO, C.; ANDRADE, C.. Effect of nitrite as a corrosion inhibitor in contaminated and chloride-free carbonated mortars. *ACI Materials Journal*, v. 87 n. 2, p. 130-137, mar/apr, 1990.
- 9 NBR13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão - Método de ensaio, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- 10 NBR13278. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação de densidade de massa e do teor de ar incorporado - Método de ensaio, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- 11 NBR13277. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação de retenção de água - Método de ensaio, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- 12 YEOMANS, S.R. *Galvanized Steel Reinforcement in Concrete*. Amsterdam: Elsevier, 2004.