

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).

## REFEITO DA ADIÇÃO DE CAL NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DAS ARMADURAS DE AÇO CARBONO E GALVANIZADAS

Michele C. C. Oliveira<sup>1</sup>, Vanessa F. C. Lins<sup>2</sup>, Cíntia G. F. Costa<sup>3</sup>, Maria M. R. Castro<sup>4</sup>, Bruno S. Santos<sup>5</sup>, Carlos R. Araujo<sup>6</sup>, Gelmo C. Costa<sup>7</sup>, Elbia S. Pessin<sup>8</sup>, Ana. R. Leite<sup>9</sup>

### 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, electrochemical impedance spectroscopy

### Resumo

Este trabalho tem como objetivo o estudo do efeito da adição de cal na resistência à corrosão das armaduras de aço carbono e galvanizadas. Com este intuito, 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

1 Mestranda, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais

2 Doutor, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais

3 Pós-doutoranda, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais

4 Doutor, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais

5 Graduando, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Viçosa

6 Mestre, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

7 Engenheiro, Belgo Bekaert

8 Engenheiro, Belgo Bekaert

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

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, espectroscopia de impedância eletroquímica.

## **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). A corrosão das armaduras em concreto tem sido reconhecida como um problema grave em todo o mundo. Além das perdas econômicas, a segurança pública também é afetada devido às perdas de vidas humanas associadas ao colapso de pontes e estruturas de concreto armado (2).

Uma vez que o concreto armado vem sendo largamente utilizado nas construções civis em todo o mundo, faz-se necessário à consideração da sua durabilidade (3).

A utilização de estruturas de concreto armado é baseada no princípio que o concreto é um ambiente ideal para o aço, uma vez que o mesmo apresenta elevada alcalinidade. O meio altamente alcalino do cimento Portland é o responsável pela passividade do ferro em pH 12,6 - 13,5 (2). De acordo com CARNEIRO, LOURENÇO, YEOMANS, FREIRE (4-7), dentre outros, tal passividade é geralmente descrita como a formação de uma camada protetora constituída principalmente de óxidos passivantes sobre o aço das armaduras, que fornece uma adequada resistência contra a corrosão. No entanto, quando o concreto armado é exposto continuamente a um ambiente agressivo, esta camada passivante pode ser rompida 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 (1).

No Brasil, a Indústria da Construção Civil é uma das grandes responsáveis pelo crescimento do país. Nas construções, são utilizados três tipos de argamassa: a convencional constituída de cimento, areia, e água, a argamassa de cal, areia e água; a mista, composta de cimento, cal, areia e água, e a 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, este trabalho tem por finalidade investigar o efeito da adição de cal em argamassa, buscando, desta forma, uma maior resistência à corrosão de armaduras de aço carbono e galvanizadas associadas a uma viabilidade econômica. A técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica foi utilizada para medição do valor da resistência à polarização das amostras de aço.

## **Metodologia**

---

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.

<b>Tipo de Argamassa</b>	<b>Traço (proporções em massa, cimento: cal: areia)</b>	<b>Concentração de cal (% p/p)</b>
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 (8).

Foi realizado o procedimento de mistura das matérias-primas de acordo com a Norma NBR13276. Determinou-se a razão água/cimento para a consistência de  $(260 \pm 5)$  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.

<b>Tipo de Argamassa</b>	<b>Concentração de cal (% p/p)</b>	<b>Cimento (g)</b>	<b>Cal CHI (g)</b>	<b>Areia (g)</b>	<b>Água (g)</b>
Teor elevado de cal	26,3	550,0	1375,0	3300,0	1470,0
Teor médio de cal	13,3	650,0	650,0	3600,0	1054,0
Teor mínimo de cal	6,7	700,0	350,0	4200,0	945,0
Sem cal	0	750,0	0,0	4500,0	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 (9), retenção de água (10) 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 foi 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 (EIE), 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  $(260 \pm 5)$  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.

<b>Tipo de Argamassa</b>	<b>Teor de ar incorporado (%)</b>	<b>Retenção de Água (%)</b>
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

<b>Tipo de Argamassa</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>		
	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>
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.

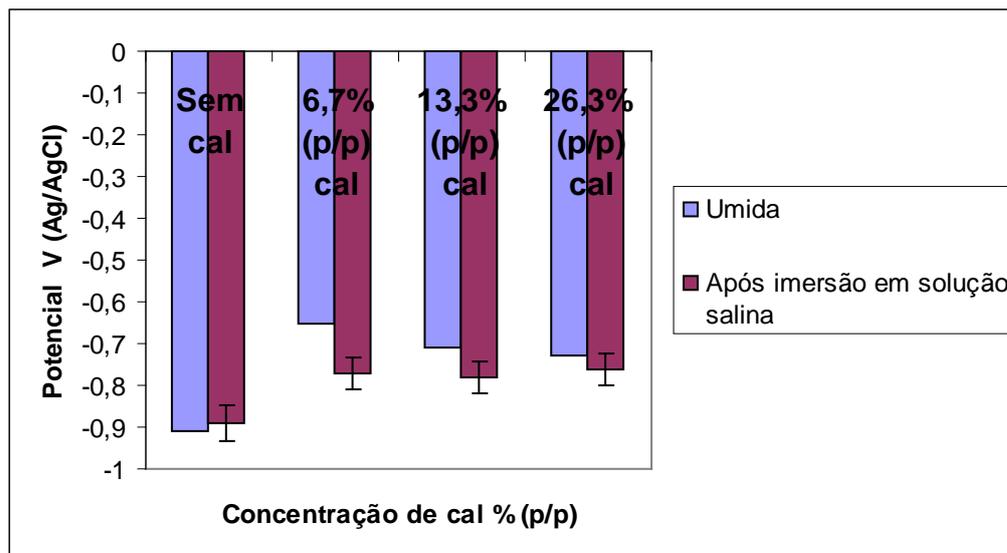


Figura 1 – Potencial de circuito aberto das armaduras galvanizadas em argamassa com e sem adição de cal

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,  $\text{CO}_2$ , é necessário para a cura da argamassa com óxido de cálcio nas alvenarias. O gás carbônico,  $\text{CO}_2$ , 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 (6). 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  $\text{CO}_2$ , 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  $\text{CO}_2$  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.

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 2. Após o teste de imersão em solução salina por 2 dias, os valores dos potenciais de circuito aberto já apresentaram uma tendência à redução.

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

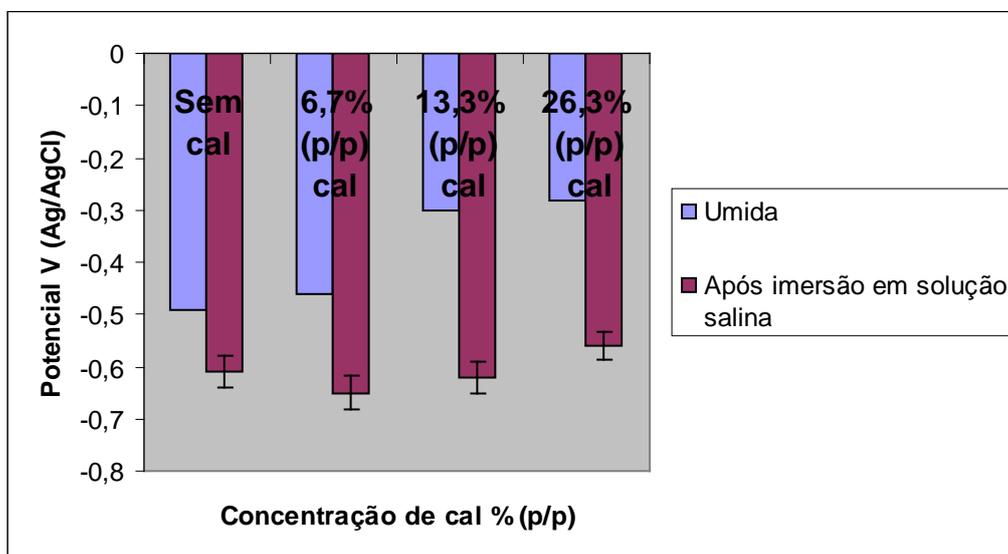


Figura 3 – Potencial de corrosão das armaduras de aço carbono em argamassas com e sem adição de cal, antes e após o teste de imersão em solução salina.

A Figura 3 apresenta os resultados da análise de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para a armadura de aço carbono galvanizado em argamassa sem cal, em eletrólito de NaCl 3,5% (p/p). Foi observado um semi-círculo que, na região de alta frequência analisada, pode-se verificar apenas o seu final e um Warburg, correspondente a um elemento de difusão para todas as amostras analisadas. A intersecção do 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 polarização na região de baixa frequência.

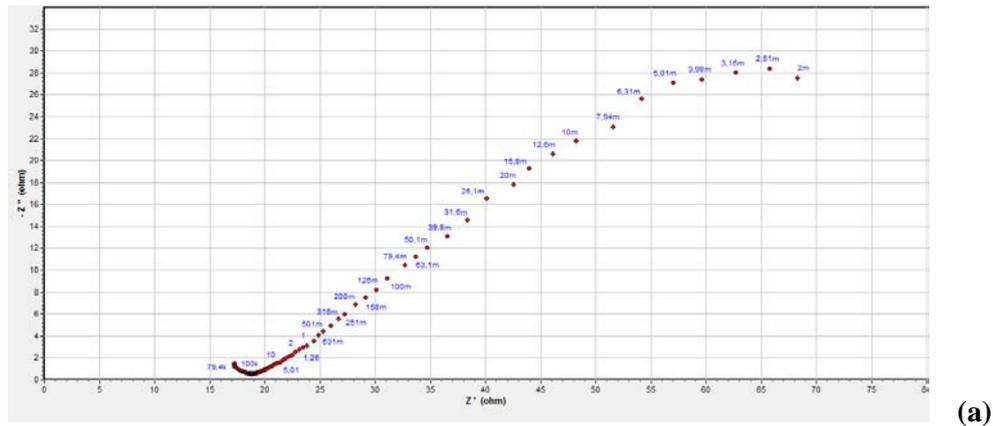


Figura 3 - Resultado da análise usando-se Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para armadura de aço carbono galvanizado em argamassa sem cal, em eletrólito de NaCl 3,5% (p/p): (a) Nyquist, (b) Circuito equivalente

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.

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.

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)	Rp ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
<b>AÇO CARBONO</b>		
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
<b>AÇO AO CARBONO GALVANIZADO</b>		
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

#### 4. Conclusões

Os resultados experimentais, para as amostras avaliadas, permitem concluir que:

- A substituição do aço ao carbono para aço galvanizado aumenta a resistência à corrosão da armadura de concreto;
- O aumento do teor de cal aumenta a resistência à corrosão do material, sendo, portanto, o efeito da adição de cal à argamassa de cimento benéfico em relação à resistência à corrosão das armaduras de aço carbono e aço carbono galvanizado;
- 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);
- A redução do potencial de corrosão das armaduras foi verificada, após o teste de imersão parcial das amostras em solução de cloreto de sódio.

## 5. Referências Bibliográficas

- (1) GENTIL, V. **Corrosão**. 5ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- (2) KELESTEMUR O.; YILDIZ S. Effect of various dual-phase heat treatments on the corrosion behavior of reinforcing steel used in the reinforced concrete structures. **Science Direct, Construction and Building Materials**, v.23. p. 78–84, 2009.
- (3) 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.
- (4) CARNEIRO, C. et al. Revestimento acrílico monocomponente de base aquosa para proteção de betão por pintura. **Corros. Prot. Mater.**, v. 28, n. 3, p.92-97, 2009.
- (5) LOURENÇO, Z. Protecção catódica de estruturas de betão armado. **Corros. Prot. Mater.**, v.26, n.3, p.79-85, 2007.
- (6) YEOMANS, S.R. **Galvanized Steel Reinforcement in Concrete**. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- (7) FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/Paraná. 2005.
- (8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2005.
- (9) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2005.
- (10) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro. 2005.

## Agradecimentos

Os autores agradecem as Empresas Belgo Bekaert e PRECON pelo suporte técnico e fornecimento das amostras e às agencias 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.