

## COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, DA PERDA DE MASSA E VISUAL ENTRE INIBIDORES DE CORROSÃO PARA PRISMAS DE CONCRETO ARMADO

*COMPARISON OF STRENGTH COMPRESSION, MASS LOSS AND VISUAL AMONG CORROSION INHIBITORS FOR REINFORCED CONCRETE PRISMS*

**Bernardo Tutikian<sup>1</sup>, Vinícius Ortolan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Professor Dr. do Curso de Engenharia Civil da UNISINOS, RS. E-mail: btutikian@terra.com.br

<sup>2</sup>Engenheiro Civil, Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS, RS.  
E-mail: viniortolan@sinos.net

### RESUMO

A corrosão das barras de aço inseridas nas estruturas de concreto armado é um dos maiores problemas enfrentados para garantir a durabilidade de construções durante longo período de tempo. Uma das alternativas para prevenir a corrosão das barras de aço é com o uso de inibidores de corrosão: anódicos, catódicos ou mistos. O objetivo deste artigo é realizar uma comparação de resistência à compressão, perda de massa e visual entre prismas referência, sem proteção contra a corrosão, e prismas com três tipos de inibidores: dois mistos, um por impregnação no concreto endurecido e outro com a colocação de aditivo no concreto fresco; e um inibidor por ânodo de sacrifício, por pintura prévia das barras de aço com cromato de zinco. Os resultados demonstraram que a pintura com cromato de zinco foi a mais eficiente, com redução de até 99,9% da perda de massa no traço com maior consumo de cimento, em comparação com o prisma referência. Foi observado, ainda, que os três inibidores diminuíram a corrosão das barras de aço, o que pode aumentar a durabilidade de estruturas, obtendo um ganho ambiental e econômico para a sociedade.

**Palavras-chave:** inibidor de corrosão; corrosão acelerada; durabilidade.

### ABSTRACT

The corrosion of the steel bars embedded in concrete structures is an important problem faced to ensure durability of constructions for a long period of time. One alternative to prevent corrosion of the steel bars is with the use of corrosion inhibitors: anodic, cathodic or mixed. The aim of this paper is to perform a comparison of strength compression, mass loss and visual between reference prisms, without protection against corrosion, and prisms with three types of inhibitors: two mixed, one by impregnation of hardened concrete and other by putting an additive in fresh concrete; and an inhibitor for sacrificial anode, by previous painting the steel bars with zinc chromate. The results showed that the zinc chromate paint was more efficient, reducing up to 99.9% of mass loss, in rich composition, compared with the prism reference. It was also observed that the three inhibitors decreased the corrosion of steel bars, which can increase the durability of structures, obtaining an environmental and economic gain to society.

**Keywords:** corrosion inhibitors; accelerated corrosion; durability.

### 1 – INTRODUÇÃO

Com a chegada da revolução industrial, o homem entra na era do aço. Com isso, a corrosão passa a ser uma constante preocupação e motivação para estudos das maneiras de imunizar este material da ação destruidora da natureza e aumentar sua vida útil. Este fato é importante uma vez que a presença do aço é constante na maioria das estruturas construídas atualmente pelo homem, sejam de concreto armado ou de aço (BERTOLINI *et al.*, 2013).

Visando proteger os materiais metálicos, dentre as diversas maneiras conhecidas, a proteção catódica é a solução que melhor imuniza a espontânea deterioração.

Graças à proteção catódica que milhares de quilômetros de tubulações enterradas ou submersas, instalações portuárias, construídas em aço operam com segurança. A proteção

catódica é a técnica que consiste na transformação da estrutura metálica que se deseja proteger, de modo a tornar as reações de corrosão termodinamicamente impossíveis e, conseqüentemente, evitar a deterioração do material (DUTRA; NUNES, 2011).

Nos Estados Unidos, um estudo realizado pelo *CC Technologies Laboratories, Inc.*, entre os anos de 1999 a 2001, chegou à quantia de 276 bilhões de dólares, aproximadamente 3,1% do PIB, gasto com a corrosão. No Brasil, o custo anual estimado da corrosão, aplicando o índice de Hoar, corresponde a aproximadamente 67 bilhões de reais, ou seja, 3,5% do PIB (DOTTO, 2006).

Segundo Gentil (2003), quanto mais avançado tecnologicamente for um país, mais elevado será o seu gasto com corrosão, portanto, as medidas para sua prevenção e combate não podem ser relegadas ao plano secundário.

Como a corrosão é uma reação química espontânea, os metais e minérios estão constantemente sendo consumidos, assim há necessidade de uma produção adicional destes materiais para reposição do que é deteriorado.

Na Rússia, por exemplo, um terço da produção de aço tem a finalidade de reposição, onde 2/3 do material substituído retorna às usinas sob forma de sucata, e o restante é definitivamente transformada em ferrugem (TOMASHOV, 1966).

As estruturas de concreto têm potencial para apresentar vida útil muito superior a 50 anos, porém, observa-se que estão deteriorando-se precocemente (HILGERT; TUTIKIAN; HOWLAND, 2014). Já aos dez, quinze anos exigem intervenção corretiva significativa por razões de corrosão das armaduras (GROCHOSKI; HELENE, 2008).

A corrosão de armadura tem sido um dos principais problemas patológicos responsável pela redução da vida útil das estruturas de concreto armado. Seus mecanismos e causas já foram compreendidos. Segundo Trocónis de Rincón (2006), várias soluções já estão disponíveis e a cada dia novos produtos surgem no mercado e outros tantos estão em estudo, seja para a prevenção ou para terapia da falha. Porém, a proteção catódica é a única técnica que interrompe efetivamente a corrosão, utilizando princípios da eletroquímica.

As primeiras aplicações de proteção catódica em estruturas de concreto armado foram realizadas pelo Departamento de Transporte da Califórnia (EUA), nos anos 70, para controlar a corrosão das armaduras nos tabuleiros de pontes. Em 1982, o *Federal Highway Administrator*, nos EUA, reconheceu a proteção catódica como a única técnica de reabilitação capaz de eliminar a corrosão de estruturas deterioradas, independentemente do teor de cloretos (LOURENÇO, 2007). A aplicação de revestimentos, como pinturas, reduz a corrente necessária para a proteção catódica, mas não elimina a necessidade da sua utilização.

A proteção catódica é uma técnica que está sendo aplicada em todo o mundo, e seu uso no Brasil tem crescido a cada dia, para combater a corrosão em estruturas metálicas enterradas, submersas e em contato com eletrólitos (MAZZINI, 2009).

O princípio da proteção catódica se baseia em levar o potencial de corrosão do equipamento a proteger para valores correspondentes à imunidade do material. Pode-se optar por um dos seguintes métodos para atingir este objetivo:

- proteção por ânodos de sacrifício;
- proteção por corrente impressa.

Com isso, este artigo tem como objetivo avaliar métodos de proteção da corrosão, por meio de ensaios de corrosão acelerada pelo método CAIM, que é um método que vem sendo testado e aprovado por muitos pesquisadores (GRAEFF, 2007; TORRES, 2006; LIMA, 2005). Serão realizadas comparações entre o concreto sem proteção e os protegidos com ânodo de sacrifício e proteção mista.

## 2 – MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste artigo, os prismas confeccionados com os quatro tipos de concreto foram: referência (referência), aspergido o inibidor misto no prisma de concreto endurecido (impregnado), misturado o inibidor misto no concreto fresco (aditivo), e a pintura com cromato de zinco nas barras de aço inseridas no concreto (pintura), abrangendo opções disponíveis para as construções. Todos os prismas foram submetidos à corrosão acelerada por meio do método “CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada”, que se enquadra em um ensaio eletroquímico, onde se avalia diretamente a corrosão da barra de aço por meio da medição da perda de massa das barras de aço após o ensaio. A medição da perda de massa foi realizada aos 28 dias. Esse método permite, além disso, acompanhar a evolução da corrente de corrosão. Além disso, foi realizado o ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias para correlacionar com a perda de massa de cada um dos tipos de prisma e para determinar as equações de comportamento e o diagrama de dosagem dos concretos.

Os corpos de prova (cp) prismáticos para avaliação da corrosão foram confeccionados com três relações água/cimento (0,35; 0,50 e 0,65), ou seja, três traços, um com maior consumo de cimento, outro intermediário e com menor quantidade de cimento, respectivamente 1:3,5, 1:5 e 1:6,5.

Foi feita, inicialmente, uma caracterização dos materiais envolvidos nos ensaios, a fim de alcançar uma melhor precisão nos resultados esperados. Os materiais utilizados foram o cimento, os inibidores de corrosão, os agregados miúdos e graúdo e água.

### 2.1 Caracterização física e química dos materiais

As características dos materiais empregados no concreto estão diretamente relacionadas ao desempenho e propriedades da mistura. Para a caracterização dos materiais, foram realizados ensaios de acordo com as normas da ABNT.

#### 2.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi o CP V ARI. Foi especificado por se tratar de um cimento com menor índice de adições, entre os comercialmente disponíveis. A massa específica do cimento Portland utilizado foi de  $\rho = 3120$  kg/m<sup>3</sup>, determinada conforme ABNT NBR NM 23:2001, enquanto que as propriedades mecânicas e químicas são detalhadas na Tabela 1.

Comparação da resistência à compressão, da perda de massa e visual entre inibidores de corrosão para prismas de concreto armado

Tabela 1 – Composição química do cimento (CPV ARI)

Propriedades Mecânicas	Ensaio cimento
Finura #200 (75.mm)	0,19
Finura #325 (45.mm)	1,69
Finura Blaine (g/cm <sup>2</sup> )	4.351
Início de tempo de pega (min)	163
Fim de tempo de pega (min)	212
Resistência à compressão aos 1 dia (MPa)	20,2
Resistência à compressão aos 3 dias (MPa)	34,2
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	40,3
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	49,3
Propriedades Químicas	Ensaio cimento
Resíduo insolúvel (%)	0,76
Perda ao fogo (%)	3,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,04
SiO <sub>2</sub> (%)	19,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,63
CaO (%)	60,56
MgO (%)	4,70
SO <sub>3</sub> (%)	2,16

Tabela 2 – Análise granulométrica do agregado miúdo e graúdo

Abertura das peneiras (mm)	agregado miúdo		agregado graúdo	
	massa retida (%)	massa retida acumulada (%)	massa retida (%)	massa retida acumulada (%)
# 19	0	0	0	0
# 12,5	0	0	4	4
# 9,5	0	0	44	48
# 6,3	0	0	41	89
# 4,8	5	5	8	97
# 2,4	12	17	3	100
# 1,2	17	34	0	100
# 0,6	19	53	0	100
# 0,3	28	81	0	100
# 0,15	17	98	0	100
Fundo (< 0,075)	2	100	0	100
Módulo de finura	2,88		6,45	
Dimensão máxima	4,8 mm		12,5 mm	
Massa específica	2.560 kg/m <sup>3</sup>		2.470 kg/m <sup>3</sup>	
Massa unitária no estado solto	1.550 kg/m <sup>3</sup>		1.360 kg/m <sup>3</sup>	

### 2.1.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi areia extraída de rio, que apresentou massa unitária de  $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$ , determinada conforme o preconizado pela ABNT NBR NM 45:2006, e massa específica de  $\rho = 2.560 \text{ kg/m}^3$ , determinada conforme ABNT NBR NM 52:2003. Já o agregado graúdo é constituído por rocha basáltica britada, apresentando a massa unitária de  $\rho = 1.360 \text{ kg/m}^3$ , realizada conforme ABNT NBR NM 45:2006. A massa específica foi determinada em  $\rho = 2.470 \text{ kg/m}^3$ , por meio do método da balança hidrostática.

O ensaio de análise granulométrica dos agregados foi realizado conforme a ABNT NBR NM 248:2003, que prevê a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concreto. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

### 2.1.3 Inibidores de corrosão

As especificações dos inibidores de corrosão foram repassadas pelos fabricantes.

O inibidor de corrosão misto que deve ser impregnado no concreto endurecido apresenta densidade de  $1,04 \text{ kg/dm}^3$ , é um líquido transparente e deve ser impregnado com pincel, rolo ou borrifador de baixa pressão, até a saturação da superfície e não necessita ser diluído. É uma solução aquosa de amino alcoóis e sais de amino álcoois, com pH 10. O inibidor foi impregnado nas amostras após a cura, com pincel, saturando a superfície.

O inibidor de corrosão misto que deve ser adicionado ao concreto fresco apresenta densidade de  $1,06 \text{ kg/dm}^3$ , é um líquido verde transparente e deve ser misturado na água de amassamento do concreto. Sua composição é de nitrogênio contendo substâncias orgânicas. O produto foi misturado à água de amassamento dos concretos, sendo, portanto, incorporado durante a mistura dos materiais.

O cromato de zinco deve ser aplicado diretamente nas barras de aço, com pincel ou ferramenta semelhante, em duas demãos. Possui densidade de  $1,39 \text{ kg/dm}^3$  e é um líquido inflamável de cor vermelha. Sua composição básica é resina acrílica e cromato de zinco. O cromato de zinco foi aplicado, manualmente, com duas demãos, nas barras das amostras determinadas.

### 2.1.4 Água

Água proveniente da rede pública de abastecimento foi utilizada para execução dos concretos.

## 2.2 Dosagem do concreto

Para elaboração dos concretos estudados, utilizou-se uma mistura de cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água, além dos inibidores de corrosão, quando era especificado. As dosagens foram elaboradas de acordo com o método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1993), para dosagens de concreto convencional. Os traços adotados foram o com maior consumo de cimento (1:3,5); intermediário (1:5,0); e com menor consumo de cimento (1:6,5); com teor ideal de argamassa fixado em 54%, com tempo de mistura de cinco minutos e abatimento de 100 mm +/- 20mm.

Os traços foram definidos para obter um diagrama de dosagem, que permite interpolar resultados dentro da faixa estudada, permitindo a comparação das propriedades entre os métodos de proteção. Na Tabela 3 são apresentados os traços unitários para cada relação a/c, de acordo com o proposto pelo método.

Tabela 3 – Traços unitários

Família	Traço			Rel. a/c	Teor de umidade H (%)	Slump (mm)
	C	Agr. m.	Agr. gr.			
1:3,5	1	1,43	2,07	0,35	7,78	100
1:5,0	1	2,24	2,76	0,50	8,33	90
1:6,5	1	3,05	3,45	0,65	8,67	100

Foram moldados, depois, os corpos de prova de 10x20 cm (diâmetro versus altura), em duas camadas com 12 golpes de adensamento da mistura. Depois de entrar em pega, as amostras foram acondicionadas em câmara úmida até a data do ensaio.

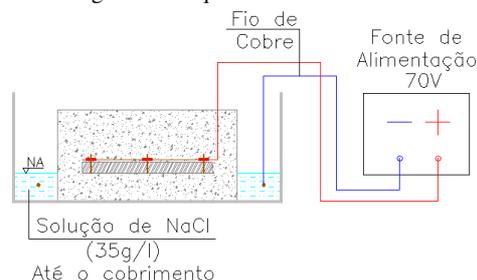
## 2.3 Ensaio de corrosão acelerada – Método CAIM

Para atingir o objetivo da pesquisa foram moldados os corpos de prova (cp) de concreto para ensaios de resistência à compressão nas idades estipuladas e os prismas de concreto armado para realização do ensaio de corrosão acelerada CAIM.

Para o ensaio CAIM, foram adotadas a diferença de potencial (d.d.p.) impressa no sistema e o tempo de ensaio, conforme os resultados de Torres (2006). Segundo a autora, os maiores graus de corrosão foram com tensões de 70 V e tempo de ensaio de 40 h. Então como se procurava um pior cenário de corrosão, optou-se por adotar a d.d.p. de 70 V e um tempo de ensaio de 48 h.

Os equipamentos utilizados para obtenção da constante tensão de 70 V foram fontes de corrente contínua. Os corpos de prova foram ligados à fonte de alimentação, conforme mostrado na Figura 1, formando um circuito elétrico.

Figura 1 – Esquema do ensaio CAIM



A solução onde o prisma ficou parcialmente imerso é composta por 35 g/l de NaCl, concentração similar a encontrada no Oceano Atlântico. A altura de imersão corresponde ao cobrimento do concreto, a fim de simular o acesso da umidade e do oxigênio.

O fio de cobre é posicionado na superfície da barra sem que esta esteja em contato com o fio. No momento do ensaio o fio que está sobre a barra é conectado ao polo positivo da fonte, atuando como ânodo no processo eletroquímico, já o polo negativo da fonte de alimentação é conectado no outro fio e este fica ligado submerso na solução, atuando como cátodo no processo eletroquímico. Na Tabela 4 são mostradas as variáveis analisadas pelo ensaio CAIM.

Tabela 4 – Variáveis analisadas

Rel. a/c	Tensão (V)	Tempo (h)	Variável	n. de cp
0,65	70	48	referência	3
			impregnação	3
			aditivo	3
0,5	70	48	pintura	3
			referência	3
			impregnação	3
0,35	70	48	aditivo	3
			pintura	3
			referência	3

## 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de resistência à compressão dos concretos e a perda de massa das barras de aço dentro dos prismas, após o ensaio de corrosão acelerada, são apresentados a seguir:

### 3.1 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios para caracterização da resistência à compressão axial das amostras nos 7 e 28 dias são apresentados na Tabela 5.

*Comparação da resistência à compressão, da perda de massa e visual entre inibidores de corrosão para prismas de concreto armado*

Tabela 5 – Resultados de resistência à compressão axial potencial das amostras

Idade	Traço	Resistência potencial (MPa)
7 dias	1:3,5	30,7
	1:5,0	20,5
	1:6,5	17,2
28 dias	1:3,5	47,4
	1:5,0	32,0
	1:6,5	25,3

Todos os traços apresentaram um crescimento de resistência à compressão entre os 7 e 28 dias, que é o esperado, além da evolução natural dos traços com menor para os com maior consumo de cimento. Portanto, os resultados de resistência à compressão das amostras foram satisfatórios.

### 3.2 Perda de massa

O valor da perda de massa é baseado no grau de corrosão, cuja fórmula é apresentada pela Equação (1).

$$GC(\%) = \frac{m_{\text{cons}}}{m_{\text{inic}}} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

GC = grau de corrosão (%)

$m_{\text{cons}}$  = massa consumida no processo de corrosão (gramas)

$m_{\text{inic}}$  = massa inicial da barra de armadura (gramas)

Os resultados de perda de massa, para cada traço, para cada tipo de proteção estão na Tabela 6.

Nota-se que a perda de massa diminui quanto menor for a relação água/cimento, mostrando que quanto melhor a qualidade do concreto menor a possibilidade de oxidação das armaduras. Esse fato já é sabido e esperado, inclusive salientado em normas que consideram a durabilidade no dimensionamento das estruturas, como a ABNT NBR 6118:2007 (ABNT NBR 6118:2007; CECCONELLO; TUTIKIAN, 2012), que determina a diminuição da relação água/cimento quando a agressividade ambiental for maior. É possível, então, relacionar a perda de massa com a resistividade, pois a diminuição da relação a/c resulta em uma melhor compactidade do concreto, consequentemente reduzindo o eletrólito presente nos vazios do concreto, diminuindo assim o processo corrosivo.

Observou-se que o método que melhor protegeu a barra de aço no interior do concreto foi a pintura prévia das barras com cromato de zinco. Apenas ressalta-se que este método é manual e demorado, dificultando sua implantação em uma grande obra, por exemplo. Porém, ainda pode ser usado em situações pontuais ou a critério do usuário. Os métodos de proteção mista, com impregnação da estrutura depois de pronta, e com a incorporação de aditivo inibidor de corrosão no concreto fresco são os mais práticos e apresentaram

reduções de perda de massa expressivas, em relação aos prismas referência, chegando a 56,8% de redução da perda de massa para o prisma com aditivo. Certamente a adoção de um destes métodos aumentaria de forma significativa a vida útil de uma estrutura de concreto armado, sem acarretar em grande aumento de trabalho ou custo envolvido.

Tabela 6 – Resultados de perda de massa dos prismas

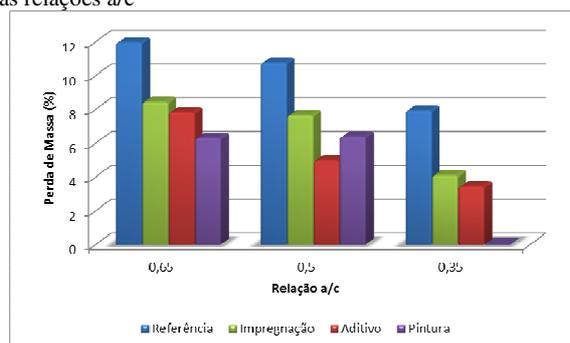
Prisma	Rel. a/c	Perda de massa (%)	Perda potencial (%)	Redução da perda de massa em relação ao prisma referência (%)
Referência	0,65	5,43	11,95	-
		11,95		
	0,5	9,77	10,76	-
		8,23		
		10,76		
		7,06		
0,35	5,67	7,92	-	
	5,99			
	7,92			
	7,92			
Impregnação	0,65	8,43	8,43	29,5
		4,58		
	0,5	7,58	7,63	29,1
		6,40		
		7,63		
		6,35		
0,35	0,58	4,09	48,4	
	0,32			
	4,09			
	4,09			
Aditivo	0,65	3,82	7,81	34,6
		7,81		
	0,5	5,60	4,96	53,9
		4,96		
		3,36		
		4,17		
0,35	1,26	3,42	56,8	
	0,72			
	3,42			
	3,42			
Pintura	0,65	6,30	6,30	47,3
		5,07		
	0,5	5,12	6,38	40,7
		6,38		
		0,38		
		6,23		
0,35	0,00	0,01	99,9	
	0,01			

Foi observado, além disso, que as reduções de perda de massa dos métodos, em relação aos prismas referências, são mais expressivas nas relações água/cimento menores. Para a pintura com cromato de zinco, na relação a/c de 0,65, a perda de massa praticamente zerou, diminuindo em 99,9% em relação ao referênci. E mesmo o sistema de proteção menos eficientes, dentre estes estudados, que foi por impregnação do concreto endurecido, as reduções chegaram próximos a 30% nos traços com maiores consumos de cimento e praticamente a 50% no traço com menor quantidade de cimento, em relação ao referênci, mostrando a eficácia de usar um procedimento destes em estruturas reais.

Entre os métodos de proteção, pode-se afirmar que o com pintura de cromato de zinco foi o mais eficiente, após foi o inibidor misto que foi aplicado no concreto fresco e por último o inibidor misto impregnado no prisma de concreto endurecido.

Para uma melhor visualização da perda de massa com as relações a/c e com os métodos de proteção, a representação gráfica dos resultados é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Perda de massa (%) em função dos métodos de proteção e das relações a/c

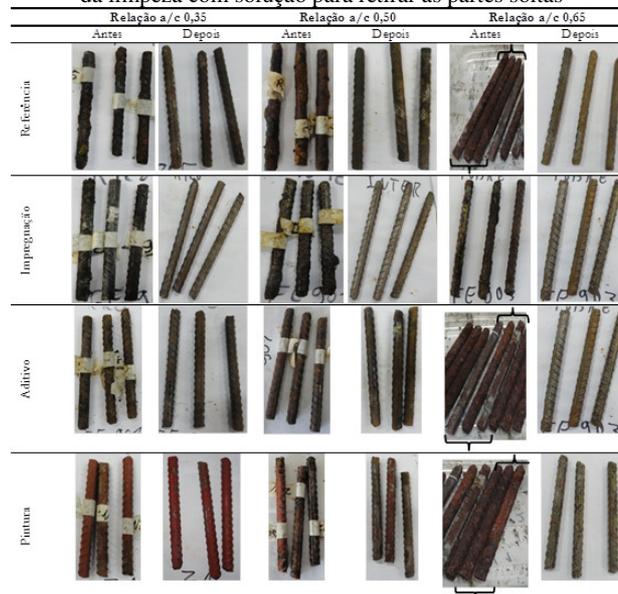


Observa-se que a perda de massa do concreto referênci com relação a/c de 0,35 foi similar ao prisma com impregnação de relação a/c 0,50 e ao prisma com aditivo inibidor de relação a/c de 0,65. Portanto, é possível obter uma boa proteção contra corrosão, seja diminuindo a relação a/c das misturas ou utilizando opções de métodos de proteção. Sempre que possível, a combinação de ambas as opções é a melhor alternativa.

### 3.3 Análise visual

Na Figura 3 são ilustradas as barras de aço depois do ensaio CAIM, mostrando as barras antes e depois da limpeza dos óxidos soltos, para efetuar as medições da perda de massa. A limpeza foi realizada manualmente.

Figura 3 – Barras de aço após a corrosão acelerada, antes e depois da limpeza com solução para retirar as partes soltas



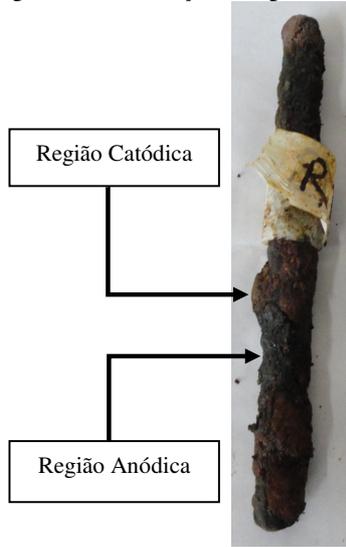
Pode-se visualizar a formação de óxi-hidróxidos de ferro nas armaduras após o ensaio acelerado, com evidências claras que o produto da corrosão ocupa volumes de 3 a 10 vezes superiores ao volume original do aço da armadura, principalmente nas barras dos prismas referências. É este material que produzirá as pressões internas no concreto ocasionado nas fissuras.

Observa-se que as barras inseridas nos prismas referênci foram as mais danificadas. As barras dos prismas com impregnação da proteção e com o uso de aditivo inibidor de corrosão apresentaram menor deterioração. E, por fim, as barras com pintura prévia de cromato de zinco praticamente não sofreram alterações.

Na presença de íons cloretos a forma de corrosão é localizada, com a formação de pites. É possível notar a evidência desta forma de corrosão na Figura 7. Também há evidências do mecanismo eletroquímico, com a presença das duas reações parciais, a reação catódica e a reação anódica. Observa-se a reação anódica onde há perda de elétrons, evidenciada pela presença de pites; já a reação catódica, onde há ganho de elétrons, é evidenciada pelo acúmulo de material de corrosão. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 4, após limpeza das barras.

Comparação da resistência à compressão, da perda de massa e visual entre inibidores de corrosão para prismas de concreto armado

Figura 4 – Visualização da região catódica e anódica nas barras



3.4 Diagrama de dosagem

Por fim, com os resultados obtidos, para correlacionar as propriedades, foram determinadas as equações de comportamento com os coeficientes de correlação e o diagrama de dosagem, que permite a correlação entre as propriedades.

As equações de comportamento, com os respectivos coeficientes de correlação, estão expressas na Tabela 7.

Observa-se que os coeficientes de correlação foram elevados, acima de 0,90 na maior parte das vezes, o que aumenta a confiabilidade dos ensaios. Apenas nos resultados de perda de massa houve coeficientes de correlação menores, mas isto se deve a variabilidade natural deste ensaio.

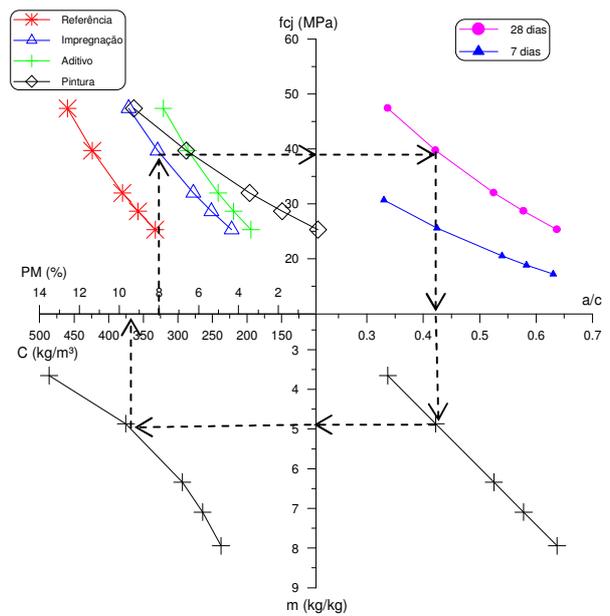
Com as equações de comportamento calculadas pode-se elaborar o diagrama de dosagem, correlacionando a resistência à compressão aos 28 dias com a perda de massa e com a relação a/c, esta com o traço unitário 1:m e este, por fim, com o consumo de cimento por metro cúbico de concreto. O diagrama de dosagem é uma forma rápida de para determinar traços de concreto, a partir de determinadas propriedades requisitadas. Deve-se usar o diagrama no sentido horário, com a perda de massa sendo o ponto inicial. Pode-se utilizar no sentido anti-horário, mas com o consumo de cimento como ponto inicial.

O diagrama de dosagem está ilustrado na Figura 5. Há, na Figura 5, um pontilhado mostrando como exemplo a determinação de um traço com a especificação de uma perda de massa de 8% aos 28 dias para o inibidor por impregnação. Se for realizado o cálculo preciso, por meio das equações de comportamento, se obterá, para este traço os seguintes parâmetros: perda de massa para o inibidor com impregnação de 8%; resistência à compressão aos 28 dias de 39,4 MPa; relação a/c de 0,43; traço unitário 1:m de 1:4,92; e consumo de cimento por metro cúbico de 371,7 kg/m<sup>3</sup>. Observa-se que os valores foram próximos aos encontrados graficamente, mostrando a eficácia desta ferramenta.

Tabela 7 – Equações de comportamento e coeficientes de correlação

Propriedades	Equação de comportamento	r <sup>2</sup>
Lei de Abrams	7 dias $fc7 = \frac{58,10}{6,90^{a/c}}$	0,95
	28 dias $fc28 = \frac{96,03}{8,11^{a/c}}$	0,98
Lei de Lyse	$m = 14,298 * a/c - 1,1684$	1,00
Lei de Molinari	$C = \frac{1952,1}{m + 0,3335}$	1,00
Perda de Massa	Referência $PM_{ref} = \frac{\ln\left(\frac{fc28}{7,8751}\right)}{0,1425}$	0,87
	Impregnação $PM_{imp} = \frac{\ln\left(\frac{fc28}{14,971}\right)}{0,1209}$	0,78
	Aditivo $PM_{adt} = \frac{\ln\left(\frac{fc28}{15,644}\right)}{0,1424}$	1,00
	Pintura $PM_{pint} = \frac{\ln\left(\frac{fc28}{25,347}\right)}{0,0676}$	0,61

Figura 5 – Diagrama de dosagem com exemplo de traço com especificação de perda de massa de 8% aos 28 dias para o inibidor por impregnação



## CONCLUSÕES

É possível concluir que todas as proteções das armaduras testadas foram eficientes, devido à diminuição da perda de massa, após ensaio de corrosão acelerada pelo método CAIM. A proteção com maior destaque foi o da pintura prévia das barras de aço com cromato de zinco, que é um tipo de proteção por ânodo de sacrifício. Esse método, apesar de que foi o que melhor protegeu as barras, é de difícil aplicação, exigindo muitas horas de serviço, sendo mais apropriado para pequenas áreas que justifiquem o emprego.

Os métodos de proteção mista, com impregnação de aditivo com o concreto endurecido e com a incorporação de aditivo no concreto fresco apresentaram resultados satisfatórios, reduzindo em até 50% a perda de massa em comparação aos prismas referência. Os métodos são de aplicação mais fácil, com maior produtividade, permitindo o emprego em grandes áreas. Assim, o tomador de decisão pode optar por determinado método, em função das características locais que encontra.

A diminuição da perda de massa foi obtida por meio da redução da relação  $a/c$  e do uso de inibidores de corrosão, sendo assim, a melhor opção é o uso simultâneo das técnicas, aumentando a durabilidade das estruturas e reduzindo manifestações patológicas devido a corrosão.

Foi possível determinar, ainda, as equações de comportamento e o diagrama de dosagem, que se tornaram ferramentas eficazes para dosagens mais eficientes.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Sika S.A., em especial ao Michel Haddad, coordenador técnico, pela doação dos inibidores de corrosão, como o Ferrogard 901 (aditivo líquido) e o Ferrogard 903, colocado por impregnação.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e de volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; REDAELLI, E.; POLDER, R. B. **Corrosion of steel in concrete, prevention, diagnosis, repair**. Second Edition.

Wiley – VCH, Weinheim, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527651696>.

CECCONELLO, V.; TUTIKIAN, B. The Influence of low Temperature on the Evolution of Concrete Strength. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 5, n. 1. p. 68-83, 2012.

DOTTO, J. **Corrosão do aço induzida por íons cloretos – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com e sem pozolana**. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2006.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. **Proteção catódica, técnica de combate à corrosão**. Coedição, Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2011.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

GRAEFF, A. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2007.

GROCHOSKI, M.; HELENE, P. R. L. **Sistemas de reparo para estruturas e concreto com corrosão de armaduras**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2008.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1993.

HILGERT, T.; TUTIKIAN, B.; HOWLAND, J. J. Adherence comparison of concrete with unprotected steel and hot dip galvanized steel. In: **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 7, n. 2, 2014.

LIMA, R. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2005.

LOURENÇO, Z. Proteção catódica de estruturas de betão armado. **Corrosão e Protecção de Materiais**, v. 26, n. 3, 2007.

MAZZINI, C. E. **Comparação de métodos de inspeção de integridade de dutos: método PIG e CIS/DCVG**. Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Estado do Espírito Santo, 2009, 119 p.

TOMASHOV, N. D. **Theory of corrosion and protection of metals**. New York: The Macmillan Company, 1966.

TORRES, A. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão em armaduras de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2006.

TROCÓNIS DE RINCÓN, O. Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. **Building and Environment**, v. 41, issue 7, p. 952-962, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.005>.