

Análise da eficiência de inibidores frente à corrosão do aço induzida por cloretos

C. Bolina, N. P. Hasparyk, R. Ferreira, O. Cascudo

Resumo - Este trabalho apresenta parte do estudo desenvolvido dentro do Programa de P&D da ANEEL, ciclo 2004-2005 (código 0394-004/2005), contemplando a eficiência preventiva dos inibidores na resistência à corrosão frente ao ataque por cloretos. Ensaios exploratórios foram realizados para seleção dos aditivos em seus teores otimizados com base na eficiência de inibição determinada por medidas eletroquímicas. Após, análise estatística de variância dos resultados da taxa instantânea de corrosão, procedeu-se à escolha dos inibidores que apresentavam inibição no meio de estudo, e que eram técnica e economicamente viáveis. As barras de aço tiveram suas perdas de massa e taxas de corrosão gravimétrica determinadas. Ao final do experimento, as barras foram avaliadas visualmente e por meio de lupa estereoscópica. Os inibidores analisados no presente trabalho foram: nitrito de sódio e cálcio, molibdato de sódio, amina e tanino. Os resultados finais mostraram que o nitrito de sódio apresentou níveis satisfatórios de proteção.

Palavras Chave - Agressividade - Corrosão - Cloretos - Durabilidade - Inibidores

I. INTRODUÇÃO

Os inibidores de corrosão têm sido utilizados nos mais diversos segmentos industriais, petrolífero, metalúrgico e mecânico nos últimos cem anos, porém sua utilização em estruturas de concreto armado começou tão somente entre as décadas de 50 e 60 [14], [16], [17], [22] e [23].

Os estudos sobre inibidores de corrosão no Brasil só começaram a intensificar-se na década de 90. O primeiro

estudo foi publicado pelo Professor Luís R.M. de Miranda, do Instituto Nacional de Tecnologia, no Rio de Janeiro, em conjunto com a COPPE/UFRJ, utilizando nitrito de sódio na prevenção da corrosão [15]. Posteriormente, foram formando-se vários outros grupos de estudos preocupados com a ação de inibidores de corrosão adicionados à massa de concreto, visando caracterizar sua ação no sentido de prevenir ou estancar processos de corrosão instalados em estruturas de concreto.

A utilização de aditivos inibidores de corrosão vem crescendo gradativamente, principalmente após a década de 90, onde houve uma intensificação maior de estudos por migração, aliada a uma adesão mundial do uso de adições e aditivos no preparo do concreto com a finalidade de aumentar a durabilidade das estruturas [11], [18] e [20].

O crescimento da utilização dos inibidores de corrosão, tanto nas estruturas de concreto armado quanto protendido é, sobretudo, devido às suas vantagens que são bastante atrativas, dentre elas tem-se o seu preço relativamente baixo e sua fácil utilização na prevenção ou reparo se comparado a outros métodos preventivos, além da alteração não substancial das propriedades físicas e mecânicas do concreto [5], [8], [9], [12], [15], [20] e [22].

Em nível macro, é necessário ressaltar que estudos na linha da corrosão das armaduras são plenamente justificáveis pelas suas graves implicações econômicas e sociais. A corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas de maior gravidade nas obras de engenharia no contexto mundial, justificando-se pelo comprometimento da segurança estrutural que o fenômeno envolve, altos custos de recuperação e perdas, incidência/reincidência do fenômeno que é relativamente alta, logo se faz necessária a utilização de inibidores de corrosão para prevenção do processo corrosivo em estruturas de concreto [7] e [21].

A corrosão das armaduras lidera a incidência das manifestações patológicas que ocorre em estruturas de concreto. O fenômeno da corrosão, além de diminuir a seção das barras de aço, ainda causa a fissuração e o destacamento do cobrimento, pela formação de óxidos e hidróxidos de ferro ao redor da barra, resultando assim em deformações na estrutura (Figura 1).



(a)



(b)

Figura 1. Recuperação da ponte sobre o Rio Casqueiro, Km 64+800 da Rodovia dos Imigrantes - SP [13].

Dentro do contexto da corrosão das armaduras, há a necessidade de destinar atenção especial à agressividade do macroclima e microclima onde está inserida a obra, haja vista que um dos ambientes de maior agressividade para o concreto armado é a atmosfera salina, sobretudo pela ação da maresia ou de águas saturadas de sais. Estes sais, tais como os sais de base cloreto, podem despassivar a armadura embutida no concreto e, assim, desencadear o processo de corrosão das armaduras. A corrosão de armaduras devido ao ingresso de cloretos é um dos problemas mais sérios e intensos que pode ocorrer em estruturas de concreto, podendo também provocar uma maior degradação, e, por conseguinte, refletindo-se na redução da vida útil de serviço.

O presente trabalho apresenta parte do estudo desenvolvido dentro do Programa de P&D da ANEEL, ciclo 2004-2005 (código 0394-004/2005) - Avaliação da Durabilidade de Estruturas de Concreto para Geração de Energia Eólica em Ambiente de Elevada Agressividade. O projeto como todo contempla quatro grandes ciclos de desenvolvimento, a saber: um estudo exploratório com diferentes tipos e teores de inibidores de corrosão em meio aquoso (presente artigo), um sobre os mecanismos de transporte no concreto, outro para avaliar a capacidade de proteção de diferentes concretos em meios agressivos (cloretos e carbonatação) e uma etapa final concernente à modelagem e previsão de vida útil da estruturas de concreto. O projeto tem Furnas Centrais Elétricas S/A como entidade proponente e a Fundação de Apoio à Pesquisa (Funape) como entidade consultora. Como entidades executoras o projeto possui Furnas Centrais Elétricas S/A e a Universidade Federal de Goiás (UFG).

II. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A. Variáveis

Buscando atingir os objetivos propostos do trabalho, as seguintes variáveis foram definidas no experimento:

- Tipo de aditivo inibidor: nitrito de sódio, nitrito cálcio, molibdato de sódio, amina e tanino.

- Natureza do ataque corrosivo: ataque por cloretos (0%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,0% e 3,5%); e
- Teor do aditivo inibidor: em ensaios exploratórios de (0%, 1%, 2,5% e 4% em massa do inibidor) em relação à solução de poro para todos os inibidores estudados. Após análise estatística em seu teor otimizado¹ de 1,0% em massa do inibidor em relação à solução de poro para nitrito de sódio, nitrito de cálcio, amina e tanino; E, de 4% para o molibdato de sódio.

B. Barras de aço

Todas as barras de aço CA-50 foram cortadas em segmentos menores (15 cm) utilizando-se um equipamento manual de corte abrasivo, evitando-se qualquer alteração da estrutura interna do material, e o acabamento das extremidades feito através da passagem das pontas irregulares em pedra de esmeril sob alta rotação.

As dimensões das amostras foram determinadas com auxílio de um paquímetro. Após corte das amostras, procedeu-se uma limpeza manual utilizando-se escova de aço, eliminando-se assim a corrosão superficial, com a remoção de todos os óxidos visíveis. Posteriormente, as amostras foram limpas com algodão embebido em solução à base de acetona ($\text{CH}_3\text{COOCH}_3$).

Concluída a preparação após o procedimento de limpeza, as barras tiveram as suas massas determinadas em balança de alta precisão, com resolução de 0,0001 g. Após pesagem, as barras foram hermeticamente envolvidas em filme plástico para que mantivessem inalteradas as suas condições superficiais.

Para a proteção das partes das barras que se projetariam para o exterior da célula eletroquímica (proteção contra a ação corrosiva do meio ambiente), bem como visando estabelecer uma área metálica bem definida de modo a propiciar a realização das medidas eletroquímicas, todas as barras de aço foram envolvidas em fita isolante em toda superfície metálica excedente à mencionada área exposta.

O envolvimento das barras se deu através do uso de fita isolante, com flexibilidade adequada para recobrir as nervuras do aço CA-50 e com boa aderência à superfície metálica (utilizaram-se dois tipos de fita de diferentes fabricantes). A parte superior e inferior da barra de aço foram recobertas com dupla camada de fitas isolantes até uma altura de 3,5 cm e 5,0 cm respectivamente.

O comprimento exposto foi de 6,5 cm. A área exposta do eletrodo de trabalho à solução foi de 16,74 cm². Na parte

¹ Considerando a faixa de sobreposição dos grupos determinados através do Teste de Duncan nos resultados obtidos nos ensaios exploratórios após realização de ANOVA (Análise de Variância) e também levando-se em conta os menores teores (dentro dessa faixa) e o limite superior de 0,50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para taxa de corrosão restaram os seguintes inibidores e teores: 1% (nitrito de sódio, nitrito de cálcio, tanino, amina) e molibdato de sódio 4%. Estes, portanto são os “teores otimizados” no ataque por cloretos, que prosseguem para a Etapa 2 do presente estudo, juntamente com a situação de referência (solução sem aditivo inibidor de corrosão).

superior da barra fez-se a conexão com contato elétrico para a realização de ensaios eletroquímicos.

Com o fim de proporcionar maior proteção mecânica e facilidade de manuseio, realizou-se sobre a região envolvida com fita uma pintura com resina epóxi, bi-componente; o seu preparo seguiu as instruções do fabricante com relação de mistura 1:1 dos componentes (resina e catalisador).

C. Solução sintética de poro

De forma a reproduzir características similares às da fase líquida presente nos poros do concreto, utilizou-se uma solução sintética de poros (SSP) composta por água deionizada adicionada de hidróxido de cálcio saturada e depois decantada onde se adicionou ainda 0,01 N de hidróxido de sódio e 0,05 N de hidróxido de potássio (pH = 12,66). Os parâmetros adotados para a dosagem da solução sintética de poros foram adaptados das pesquisas desenvolvidas por Alonso et al. [1], Freire [10] e Mennucci [19].

D. Imersão prévia das barras de aço na SSP para estabilização dos parâmetros termodinâmico e passivação do aço

As barras de aço CA-50 foram inseridas em solução alcalina por 30 dias para que pudessem se encontrar em uma situação estacionária caracterizada pela formação de película de passivação, anteriormente ao início do ataque e ao monitoramento eletroquímico.

E. Procedimento de aceleração e indução de ataque por cloretos

Para estudar o ataque por cloretos, que é um tipo de ataque característico de estruturas de concreto para geração de energia eólica em ambiente de elevada agressividade marinha, utilizou-se a solução sintética de poro acrescida de até 3,5%, em massa de cloreto de sódio. Adicionavam-se os teores (0,5%, 1,0%, 2,0%, 2,5%, 3,0% e 3,5%) a solução, aguardando-se aproximadamente 15 minutos para o ataque e tomando-se assim, as medidas eletroquímicas.

F. Métodos e dispositivos para ensaios eletroquímicos

Para a análise do desenvolvimento do processo corrosivo, utilizaram-se medidas de potencial de circuito aberto e resistência de polarização. Para as medidas de potencial analisou-se cada uma das barras por um tempo aproximado de 60 segundos, e a avaliação do estado superficial do aço, se em condição passiva ou ativa foi realizada conforme a norma ASTM C 876 [2]. No caso da resistência de polarização, as medidas também foram feitas através do emprego de uma célula eletroquímica de vidro pyrex desenvolvida no Laboratório de Durabilidade de Furnas Centrais Elétricas S.A. para o experimento com a capacidade de 600 mL de solução. Esta célula é constituída de um sistema de três eletrodos, onde o eletrodo auxiliar empregado é de grafite com diâmetro nominal de 10 mm e área de 57,95 cm²; já o eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS), da marca ANALION, é conectado à solução

por um capilar de Luggin-Haber, sendo confeccionado por UNIVIDROS, e teve a finalidade de minimizar a queda ôhmica do sistema; o eletrodo de trabalho, objeto deste estudo, que representa a própria barra de aço foi conectado ao potenciostato da marca Radiometer Analytical, modelo VoltaLab 40 PGZ 301, e acoplado a um computador controlado pelo software VoltaMaster 4.

Para as medidas de resistência de polarização, aplicou-se a cada uma das barras analisadas, uma pequena polarização em torno do potencial de corrosão de ± 10 mV, com taxa de varredura de 10mV/min ou 0,167 mV/s, no sentido anódico do potencial de corrosão, tempo aproximado de 180 segundos.

O ensaio de determinação da taxa de corrosão gravimétrica foi realizado na barra de aço após o método de inspeção visual. A perda de massa das barras devida à corrosão, assim como a taxa de corrosão gravimétrica foram determinadas conforme o procedimento de limpeza padronizado pela ASTM G 1 [3].

Ao final dos ensaios, as barras de aço foram analisadas na lupa estereoscópica, estabelecendo-se aumentos que variavam de 6,4 a 16 vezes, para observar detalhadamente os aspectos gerais inerentes aos produtos de corrosão nas suas superfícies.

III. RESULTADOS OBTIDOS

A. Potencial de corrosão

A Figura 2 mostra o monitoramento dos valores de potencial de corrosão (mV, ECS) para os inibidores tomados em seus teores otimizados (nitrito de sódio 1%, nitrito cálcio 1%, molibdato de sódio 4%, amina 1% e tanino 1%) em função dos teores de cloretos.

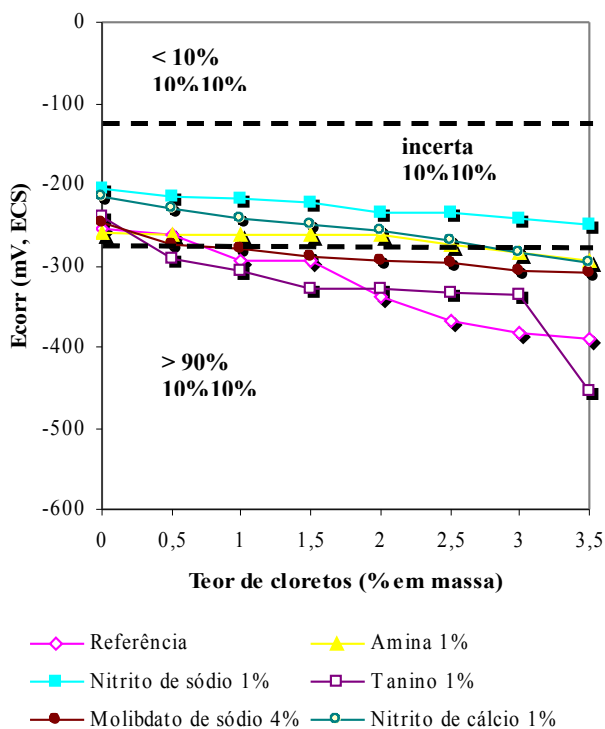


Figura 2. Potencial de corrosão eletroquímica variando com a concentração de cloretos para os inibidores tomados em seus teores otimizados. Situação: barras atacadas por cloretos (Medidas feitas com eletrodo de referência de calomelano saturado – ECS).

As amostras de referência inicialmente apresentavam valores de potenciais que correspondiam à região de incerteza de corrosão (pelos critérios da ASTM C 876). Para essas amostras sem aditivo inibidor e na presença de cloretos em concentrações (em massa) de até 3,5%, verificou-se baixa probabilidade de corrosão somente na concentração de 0,5% de cloretos, e a partir daí observou-se uma tendência de alta probabilidade devido à solução agressiva contendo cloreto, que fez com que os valores de potenciais tendessem para o estado de maior probabilidade de corrosão ativa, atingindo ao final do ensaio patamares da ordem de -390 mV.

Dos resultados apresentados para as amostras onde se utilizou o aditivo nitrito de sódio 1%, observa-se que as medidas experimentais permaneceram praticamente inalteradas até o final do ensaio, com leves alterações até 3,5% de cloretos atingindo no final do período -248 mV.

Para as amostras analisadas para o inibidor molibdato de sódio 4%, estas mostraram um comportamento bem próximo ao das amostras referências para a concentração de até 1,5% de cloretos. Para este teor de inibidor, o melhor desempenho ocorreu apenas para pequenas concentrações de cloretos, entre 0,5% a 1%.

De todo modo, pode-se verificar que no final dos ensaios para o teor de 4% de molibdato de sódio, que as medidas de potenciais atingiram valores da ordem de -310 mV para o aditivo (com 3,5% de cloretos). Nota-se que as curvas de potenciais evoluíram para valores mais eletronegativos para todas as concentrações de cloretos.

As amostras de nitrito de cálcio 1% apresentaram desde o início do ensaio, valores de potenciais de corrosão indicativos de baixa probabilidade de atividade de corrosão, permanecendo assim até a concentração de 2,5% de cloretos; a partir daí, as medidas atingiram um estado de maior probabilidade de corrosão ativa, muito embora sem se afastar muito do limite de -276 mV. O potencial atingiu valores da ordem de -297 mV com 3,5% de cloretos, enquanto a referência possuía medida de -390 mV nesse teor de cloretos. As duas amostras se encontram na região de maior probabilidade de corrosão ativa, de acordo com ASTM C-876.

Já as amostras com tanino a 1% encontravam inicialmente na região de incerteza, de acordo com ASTM C 876, com valores da ordem de -239 mV.

O inibidor a base de tanino com 1% avaliado, mesmo nas pequenas concentrações de cloretos, deslocou as medidas de potenciais para valores mais eletronegativos, possuindo comportamento similar à curva do sistema de referência até a concentração de 3% de cloretos. A partir daí, atingiu valores da ordem de -455 mV, inferior ao da referência que apresentou -390 mV. Este comportamento pode ser justificado pelo maior tempo de ataque com a inclusão de ensaios eletroquímicos adicionais, e pela rápida aderência deste inibidor junto às paredes da célula eletroquímica.

O inibidor a base de amina deslocou o potencial para valores mais positivos para as concentrações de até 2,5% de cloretos, permanecendo em uma zona de provável passivação por maior tempo. A partir desta concentração de cloretos, as medidas de potenciais possuem a tendência de se tornarem mais eletronegativas até atingirem o estado de maior probabilidade de corrosão ativa com potenciais da ordem de -294 mV.

B. Taxa de corrosão estimada através da técnica de resistência de polarização

Os resultados médios das medidas de taxa de corrosão (I_{corr}) para as barras ensaiadas foram esboçadas em gráficos do tipo taxa de corrosão versus variação do teor de cloretos para os diversos inibidores de corrosão. Os resultados obtidos são apresentados a seguir na Figura 3.

Como critério de avaliação dos valores da taxa de corrosão como citado anteriormente para o estudo exploratório, adotou-se o proposto por Andrade e Alonso [4].

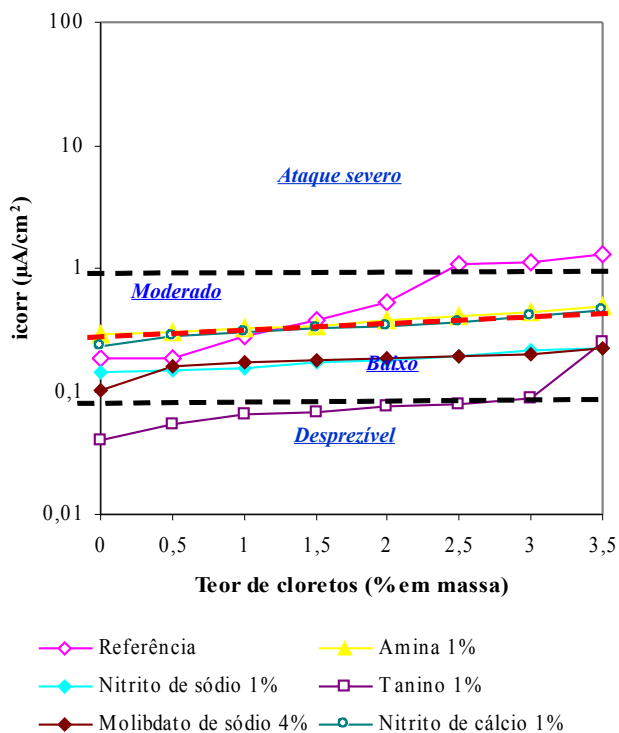


Figura 3. Taxa de corrosão eletroquímica variando com a concentração de cloretos para os inibidores tomados em seus teores otimizados. Situação: barras atacadas por cloretos (Medidas feitas com eletrodo de referência de calomelano saturado – ECS).

Os valores das taxas de corrosão para as amostras de referência em concentrações de cloretos até (1,5%) mostraram um grau de corrosão “desprezível” conforme critérios estabelecidos por Andrada e Alonso [4]. No entanto, à medida que se acrescentavam cloretos, o sistema de referência demonstrava uma tendência de evolução da taxa de corrosão ao longo do ensaio para uma zona de corrosão ativa, até atingir no final das medidas experimentais valores da ordem de $1,28 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (com 3,5% de cloretos). O valor da taxa de corrosão foi aumentado em cerca de sete vezes ao final do ensaio.

Para as amostras onde foram utilizados os inibidores de corrosão de base nitrito de sódio 1%, observa-se que os valores das taxas de corrosão permaneceram até o final do período de ensaio em uma zona em que o grau de corrosão é considerado “baixo”. Os valores das medidas da taxa de corrosão no final do ensaio foram da ordem de $0,22 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, portanto, significativamente menores do que o sistema referência, demonstrando a sua eficiência de inibição para todas as concentrações de cloretos analisadas.

As amostras de referência e com o inibidor de base molibdato de sódio 4%, no início das medidas experimentais, apresentavam taxas de corrosão similares, que só diferenciam após o acréscimo de cloretos, comprovando a efetiva inibição deste aditivo.

Destaca-se que o teor de 4% do inibidor molibdato de sódio, atingiu-se valores de $0,22 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ na concentração de 3,5% de cloretos, o que denota um grau de corrosão baixo no final do ensaio, e possui valores inferiores que o apresentado para

o sistema de referência. Prontamente, pode-se afirmar que para esse teor houve inibição efetiva para concentrações de cloretos até 3,5%.

Para o inibidor nitrito de cálcio a 1%, as amostras demonstraram uma tendência de permanecerem em uma zona em que o grau de corrosão pode ser considerado “baixo”, mesmo com o acréscimo das concentrações de cloretos. No início das medidas experimentais, as amostras apresentaram taxas de corrosão superiores ao sistema de referência. A partir do acréscimo de maiores concentrações de cloretos suas taxas de corrosão tornaram-se relativamente menores que as apresentadas pelo sistema referência, comprovando a sua eficiência inibidora.

O teor de 1% de tanino apresentou inibição efetiva nas concentrações de cloretos até 3,5%. Ao longo do ensaio verificou-se que as amostras com tanino oscilaram entre um grau de corrosão desprezível a baixo, permanecendo assim até o final do ensaio, onde atingiu respectivamente, valores da ordem de $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, enquanto a referência apresentou $1,28 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (com 3,5% de cloretos).

As amostras com o inibidor de base amina 1%, no início das medidas experimentais, apresentavam taxas de corrosão superiores ao sistema de referência. Contudo, a partir do acréscimo de maiores concentrações de cloretos suas taxas de corrosão tornaram-se relativamente menores que as apresentadas pelo sistema referência, principalmente a partir de 1% de cloretos, comprovando a sua eficiência inibidora, reduzindo o processo corrosivo. Esse inibidor permaneceu durante todo o período de ensaio em uma zona correspondente a um grau de corrosão considerado baixo, com valores da ordem de $0,49 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

C. Resultados de perda de massa e taxa de corrosão gravimétrica

Neste subitem são apresentados os resultados da perda de massa que expressam a quantidade de massa perdida dentro do período de indução e aceleração da corrosão, e ainda a taxa de corrosão gravimétrica para cloretos, expressando a velocidade com que o aço se dissolve dentro do período ativo de corrosão (Figuras 4 e 5).

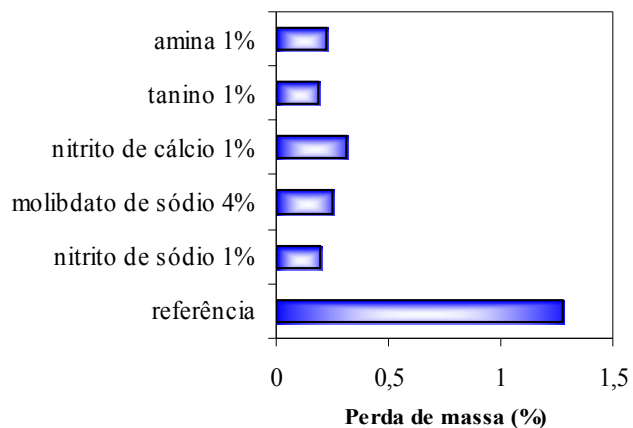


Figura 4. Percentual de perda de massa para as barras submetidas à ação de cloretos.

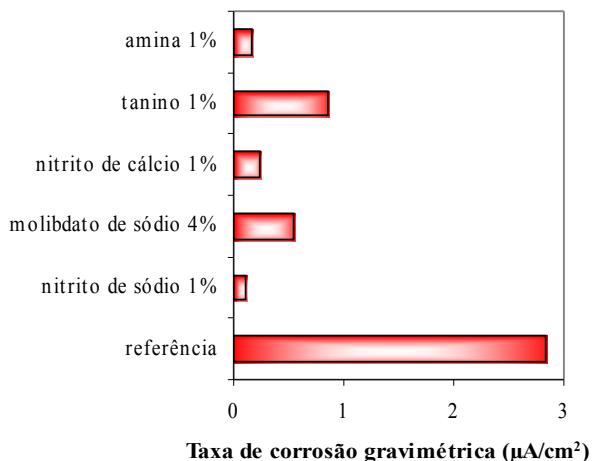


Figura 5. Taxa de corrosão gravimétrica para as barras submetidas à ação de cloretos.

D. Eficiência de inibição

As eficiências de corrosão para as amostras que foram atacadas por cloretos para todos os inibidores nas concentrações adotadas serão estimadas a seguir com base nos valores de taxa instantânea de corrosão obtida pela técnica de resistência de polarização (Figura 6). Adotou-se para estimativa da eficiência a Equação 1.

$$E_f = \frac{T_s - T_c}{T_s} * 100 \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

Ef = eficiência, em porcentagem;
 Ts = taxa de corrosão do sistema sem uso de inibidor;
 Tc = taxa de corrosão do sistema com uso de inibidor.

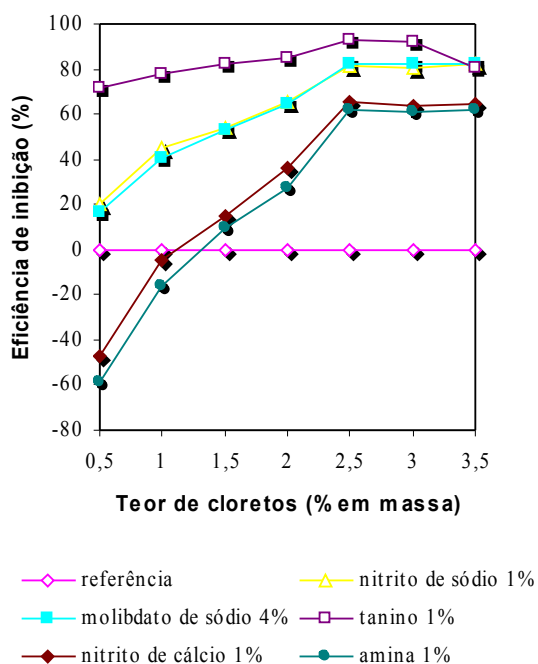
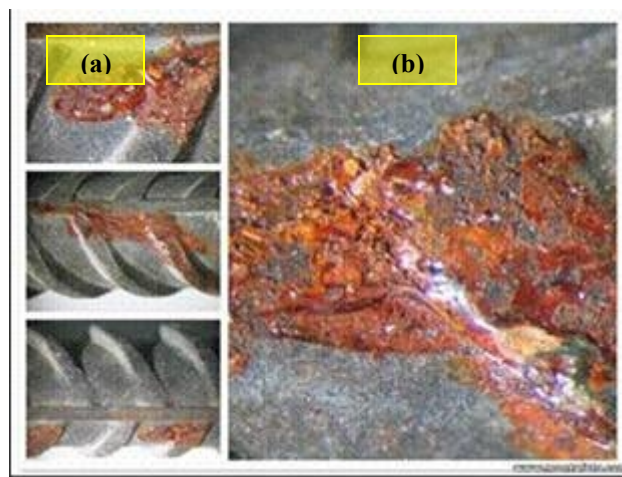


Figura 6. Eficiência dos inibidores usando os valores de Icorr obtidos da técnica de resistência de polarização para as amostras atacadas por cloretos tomados em seus teores otimizados.

D. Análise visual das barras de aço utilizando lupa estereoscópica

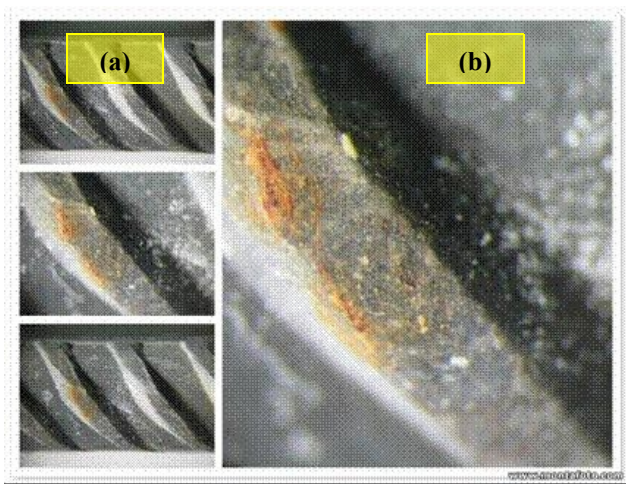
Após a realização dos ensaios de monitoramento eletroquímico, as barras de aço foram submetidas a uma análise visual por meio de lupa estereoscópica, com aumentos que variam de 6,4 a 16 vezes. Neste subitem são apresentadas algumas fotografias que mostram os principais aspectos visuais observados.

Para as amostras de referência, observou-se um maior grau de corrosão visual em comparação aos sistemas com inibidores. Este aspecto visual é coerente com os valores obtidos nos resultados eletroquímicos de taxa de corrosão (1,28 µA/cm²) e potencial de corrosão (-390 mV) para 3,5% de cloretos em massa ratificados por taxa de corrosão gravimétrica da ordem de 2,84 µA/cm². Na Fotografia 1, pode-se verificar a deterioração da superfície metálica e a presença de produtos de corrosão com tonalidades alaranjadas e avermelhadas.



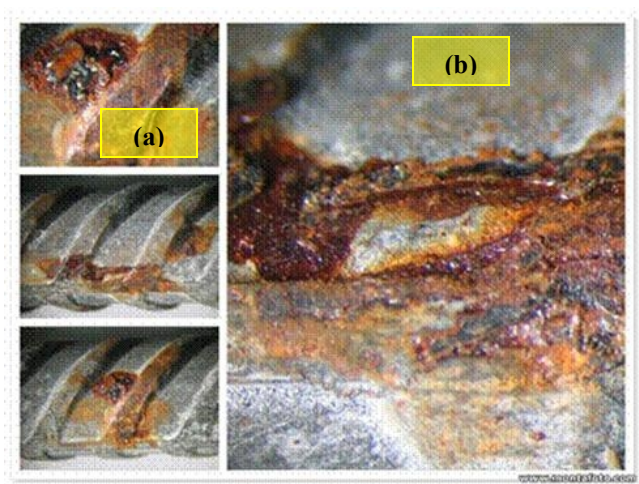
Fotografia 1. Aspectos da barra de aço sem inibidor após corrosão induzida por cloretos. Aumentos de 6,4 (a) e 16 vezes (b) [6].

Na Fotografia 2, pode ser visto que, aparentemente, a superfície do aço protegida por nitrito sódio a 1% encontra-se em um bom estado, apresentando discretamente produto de corrosão de coloração típica de ferrugem. A fotografia obtida está coerente com o resultado de taxa de corrosão eletroquímica apresentada de 0,22 µA/cm² para a concentração de 3,5% de cloretos em massa e potencial de corrosão (-248 mV), bem como pela taxa de corrosão gravimétrica (0,11 µA/cm²) e eficiência de 82,6%.

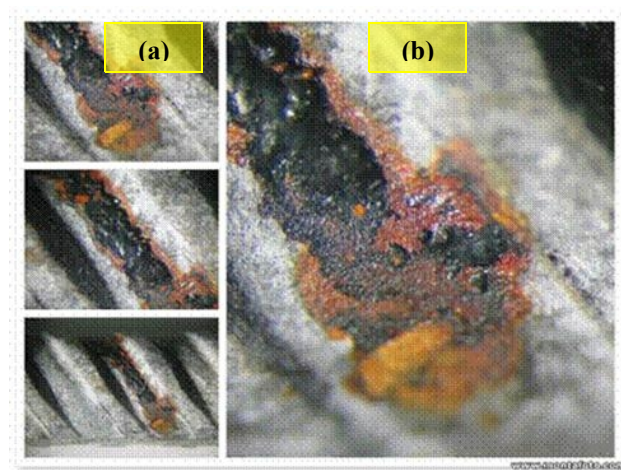


Fotografia 2. Aspectos da barra de aço com inibidor nitrito de sódio 1% após corrosão induzida por cloretos. Aumentos de 6,4 (a) e 16 vezes (b) [6].

Para os sistemas molibdato de sódio 4% e nitrito de cálcio 1%, pode-se visualizar nas Fotografias 3 e 4, próximo da superfície metálica, um produto de corrosão de coloração preta sugestivo da magnetita (Fe_3O_4). Do substrato escuro, afloram outros produtos de corrosão avermelhados e de cor ferruginosa. Os valores da taxa de corrosão eletroquímica indicam essa deterioração, apresentando valores da ordem de $0,22 \mu A/cm^2$, potencial de corrosão de $-310 mV$ e eficiência de 82,6% para o molibdato de sódio 4%; e para o nitrito de cálcio 1% a taxa obtida foi de $0,45 \mu A/cm^2$, potencial de corrosão de $-297 mV$ e eficiência de 64,9% na concentração de 3,5% de cloretos, ratificados pela taxa de corrosão gravimétrica. Para taxa de corrosão gravimétrica, os valores para molibdato de sódio 4% e nitrito de cálcio 1% foram, respectivamente de $0,54 \mu A/cm^2$ e $0,23 \mu A/cm^2$.

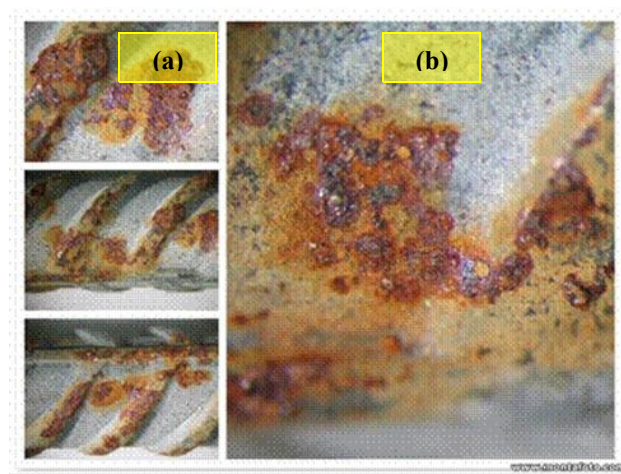


Fotografia 3. Aspectos da barra de aço com inibidor molibdato de sódio 4% após corrosão induzida por cloretos. Aumentos de 6,4 (a) e 16 vezes (b) [6].

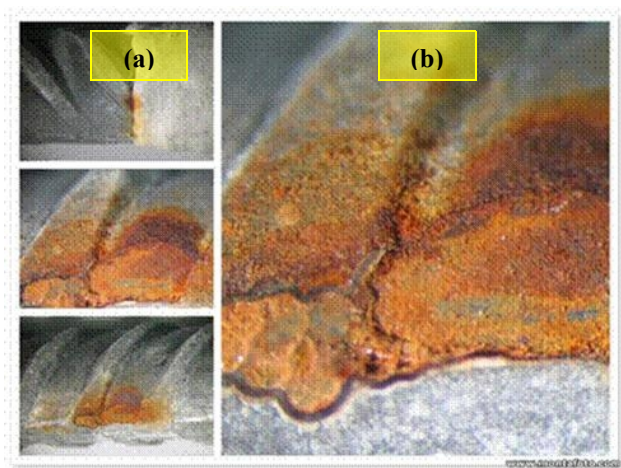


Fotografia 4. Aspectos da barra de aço com inibidor nitrito de cálcio 1% após corrosão induzida por cloretos. Aumentos de 6,4 (a) e 16 vezes (b) [6].

Nas Fotografias 5 e 6, para os sistemas com tanino e amina, ambos a 1%, respectivamente, observa-se uma superfície irregular com crostas de produtos de corrosão de coloração marrom amarelada, típica de ferrugem. O aspecto visual pode ser confirmado a partir dos valores obtidos na concentração de 3,5% de cloretos para taxa de corrosão eletroquímica, onde sistema com tanino 1% e amina 1%, apresentaram medidas respectivamente de $0,25 \mu A/cm^2$ e $0,49 \mu A/cm^2$, confirmadas também pela taxa de corrosão gravimétrica ($0,86 \mu A/cm^2$ e $0,16 \mu A/cm^2$) e eficiência (80,6% e 61,8%). Os resultados para o potencial de corrosão foram respectivamente, da ordem de $-455 mV$ e $-294 mV$.



Fotografia 5. Aspectos da barra de aço com inibidor base tanino 1% após corrosão induzida por cloretos. Aumentos de 6,4 (a) e 16 vezes (b) [6].



Fotografia 6. Aspectos da barra de aço com inibidor base amina 1% após corrosão induzida por cloretos. Aumentos de 6,4 (a) e 16 vezes (b) [6].

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste programa experimental para as variáveis, condições de ensaio e materiais adotados, podem-se obter as conclusões e considerações, listadas a seguir.

Os inibidores de corrosão apresentaram diferenças significativas de desempenho quando comparados a solução referência.

Quanto aos potenciais de corrosão, os inibidores nitrato de sódio (1%) apresentaram melhor comportamento preventivo, e o tanino mostrou-se insatisfatório quanto ao comportamento dos potenciais em ambientes contendo cloretos.

Em relação à taxa de corrosão eletroquímica estimada através da técnica de resistência de polarização, com base no conjunto de resultados obtidos, o nitrato de sódio se destacou em termos de desempenho em relação ao demais.

Em relação à taxa de corrosão, a menor taxa foi obtida para o nitrato de sódio a 1% e a maior para o tanino a 1%.

Constatarem-se visualmente diferenças significativas na distribuição e quantidade de produtos formados de acordo com o inibidor utilizado por meio das análises por lupa estereoscópica.

Considerando as potencialidades dos inibidores de corrosão estudados, o aditivo que apresentou alta eficiência e baixo custo baseado nos parâmetros eletroquímico e gravimétrico quando submetidos ao ataque por cloretos foi o nitrato, se comparado ao tanino (Tabela I).

Tabela I: Resultado global dos inibidores avaliados em suas potencialidades para cloretos.

Inibidor	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Taxa de corrosão gravimétrica ($\mu A/cm^2$)	Eficiência (%)	Custo (R\$/Kg/teor)
<i>nitrato de sódio 1%</i>	<i>-248</i>	<i>0,22</i>	<i>0,11</i>	<i>82,6</i>	<i>24,00</i>
<i>nitrato de cálcio 1%</i>	<i>-297</i>	<i>0,45</i>	<i>0,23</i>	<i>64,9</i>	<i>2,44</i>
molibdato de sódio 4%	-310	0,22	0,54	82,6	2032,00
tanino 1%	-455	0,25	0,86	80,6	3,28
amina 1%	-294	0,49	0,16	61,8	17,13

Os resultados obtidos da presente pesquisa proporcionam informações técnicas importantes a serem utilizadas em outras etapas do Projeto de P&D “Avaliação da Durabilidade de Estruturas de Concreto para Geração de Energia Eólica em Ambiente de Elevada Agressividade” do DCT.C (LABC.C) que se encontra em andamento, sobretudo para avaliar a capacidade de proteção preventiva de diferentes concretos quando exposto a meios agressivos no que tange a ocorrência de corrosão de armaduras.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do financeiro de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A e do Programa de P&D da ANEEL por ter permitido o desenvolvimento da presente pesquisa.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALONSO, C.; ANDRADE, C.; ARGIZ, C.; MALRIC, B. Na_2PO_3F as inhibitor of corroding reinforcement in carbonated concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, nº 03, p.405-415, 1996.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 876/91 (Reapproved 1999): Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. *Annual Books of ASTM Standards*, v.03.02, p.11-16, Philadelphia, 2003.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM (Reapproved 1999): Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens - G1-90. *Annual Books of ASTM Standards*, v.03.02, p.15-22, Philadelphia, 2000.
- [4] ANDRADE, C.; ALONSO, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*. v.15, p. 141-145, (2001).
- [5] ARAÚJO, F.W.C. Contribuição à viabilização da técnica de realcalinização do concreto carbonatado através da absorção/difusão de soluções alcalinas. 204 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.
- [6] BOLINA, C.C. Inibidores de corrosão: Avaliação do desempenho frente à corrosão de armaduras induzida por carbonatação e cloretos. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.
- [7] CASCUDO, O. Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armado no comportamento frente à corrosão. 2000. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2000.
- [8] CRIVELARO, M. Avaliação do comportamento frente à corrosão pelo ataque de cloreto de argamassa armada após vários tratamentos protetores. 2002. 158 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais). Autarquia Associada à Universidade de São Paulo (Ipen), São Paulo, 2002.
- [9] GONZÁLEZ, J.A.; RAMÍREZ, E.; BAUTISTA, A. Protection of steel embedded in chloride-containing concrete by jeans of

- inhibitors. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, nº 4, p.577-589, 1998.
- [10] FREIRE, K.R.R. Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto. 2005. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- [11] GROCHOSKI, M. Inibidores de Corrosão. 2006. p.19-42. Nota de aula.
- [12] HANSSON, C.M., MAMMOLITI, L. e HOPE, B.B. Corrosion Inhibitors in Concrete - Part 1: The Principles. *Cement and Concrete Research*. Canada. v. 28, n.12, pp. 1775-1781. August, 1998.
- [13] INFOENGE. Recuperação da ponte sobre o Rio Casqueiro, Km 64+800 da Rodovia dos Imigrantes. Disponível: <http://www.infoenge.com.br/obra2.php>. 2007.
- [14] KEPLER, J.L.; CARL E., D. D.; JR, LOCKE. Evaluation of corrosion protection-methods for reinforced concrete highway structures. May, 2000.
- [15] LIMA, M.G. Inibidores de corrosão: avaliação da eficiência frente à corrosão de armaduras provocada por cloretos. São Paulo, 1996. 174p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.
- [16] LIMA, E.C.; HELENE, P.R.L.; LIMA, M.G. Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparo de estruturas de concreto. BT/PCC/282. São Paulo, 2001.
- [17] MAINIER, F.B.; SILVA, R.R.C.M. As formulações inibidoras de corrosão e o meio ambiente. *ENGEVISTA*, v.6, n.3, p.106-112, dezembro de 2004.
- [18]
- [19] MEDEIROS, M.H.F.; MONTEIRO, E.B.; CARNEIRO, F.P.; JR BARKOKÉBAS, B. Utilização do nitrito de sódio como inibidor de corrosão em estruturas de concreto armado sujeitas a ação dos íons cloretos. *Revista Engenharia Civil*, número 15. Pernambuco, 2002.
- [20] MENNUCCI, M. M. Avaliação da potencialidade de aditivos inibidores de corrosão do aço carbono CA-50 usado como armadura de estruturas de concreto. Dissertação de Mestrado, IPEN, São Paulo, 2006. 118 p.
- [21] ORMELLESE, M.; BERRA, M.; BOLZONI, F.; PASTORE, T. Corrosion inhibitors for chlorides in reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 536-547.
- [22] OLIVEIRA, A.M. Avaliação do desempenho de concretos contendo adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos. Goiânia, 2007. 280p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2007.
- [23] RIBEIRO, F.H.M. Desempenho de inibidores de corrosão como método de prevenção e reparo para estruturas de concreto armado. 2001. 196 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001.
- [24] VIRMANI, P.Y. Corrosion costs and preventive strategies in the United States. 2002.