

## **INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NA CORROSÃO DE ARMADURAS INDUZIDA POR CLORETOS**

Tatiana Renata Pereira Jucá; Fernando Alves Teixeira; Claudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira; Leonardo Eustáquio Guimarães (1); Enio José Pazini Figueiredo (2)

(1) *Alunos do curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (UFG)*  
email: [trpjuca@bol.com.br](mailto:trpjuca@bol.com.br)

(2) *Professor Doutor, Departamento de Construção Civil  
Escola de Engenharia Civil / Universidade Federal de Goiás*  
email: [eniopazini@uol.com.br](mailto:eniopazini@uol.com.br)

*Universidade Federal de Goiás - Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Praça Universitária s/n.  
CEP 74605-22-, Goiânia - Goiás - Brasil, Tel.: (62) 202 - 2409, Fax: (62) 202 - 0875*

### **Resumo**

Apesar da corrosão induzida por cloretos já ter sido alvo de inúmeras pesquisas ainda existem muitas dúvidas à respeito de sua atuação em determinados tipos de cimentos, pois a composição do traço influencia bastante o fenômeno da corrosão. Além disto, o surgimento das adições minerais como substituição de parte do cimento trás à tona o problema da durabilidade das estruturas de concreto armado

Sabe-se que o componente do cimento que mais exerce influencia no que diz respeito à corrosão induzida por cloretos é o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), que combina-se com os cloretos livres na massa. Se é retirada parte do cimento, retira-se também uma parcela de  $C_3A$  e isto pode ocasionar mais cloretos livres no concreto, causando corrosão no aço. Porém, existem inúmeros estudos que demonstram que as adições minerais podem trazer grandes benefícios ao concreto. Esta pesquisa foi feita para analisar de que forma as adições minerais agem no concreto e qual se mostrou mais eficiente quando submetida a ciclos de molhagem e secagem. Para isto foram realizadas medidas de potencial de corrosão em corpos-de-prova em idades pré-determinadas e observou-se o período de iniciação da corrosão nestes corpos-de-prova, assim como o período de propagação da corrosão.

## 1 Introdução

A durabilidade das estruturas de concreto armado tem sido limitada por processos de deterioração, principalmente no que diz respeito à corrosão de armaduras. Sabe-se, entretanto que esta manifestação patológica pode ser iniciada, essencialmente, pela presença de cloretos livres e pela redução da alcalinidade da solução dos poros do concreto, devido à carbonatação.

Uma vez iniciado o processo de corrosão, a umidade do concreto e o teor de  $O_2$  que penetra no concreto, são os principais agentes controladores da corrosão, conforme ilustra a Figura 1.1.

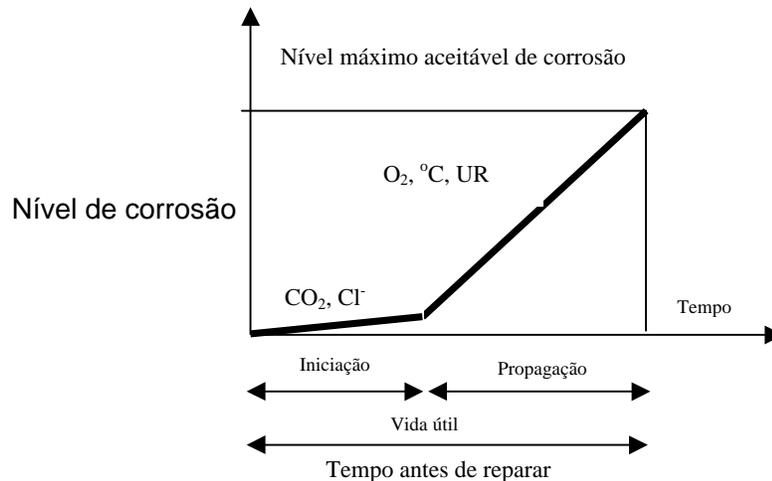


Figura 1 – Modelo de vida útil das estruturas de concreto em função da corrosão da armadura (TUUTTI, 1982).

A corrosão devida a contaminação do concreto por cloretos é freqüentemente apresentada na forma de pites, ou localizada. Estes cloretos podem advir de várias fontes, tais como de agregados e água de amassamento contaminados, do uso de aditivos aceleradores de pega à base de cloreto de cálcio ou de fontes externas (ambiente marinho e sais de degelo).

## 1.1. Influência do tipo de cimento

Sabe-se que o tipo de cimento empregado na execução do concreto pode exercer influência sobre o processo da corrosão em decorrência do teor de  $C_3A$  contido nos mesmos, que é o agente capaz de fixar os cloretos. Os diferentes tipos de cimento apresentam variação de suas composições e finura, contribuindo de forma diferente na capacidade de proteção à armadura.

PAGE et al. (1986) diz que a quantidade de  $C_3A$  do cimento tem influência na iniciação da corrosão pelos cloretos, visto que este componente do cimento é responsável pela formação do cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel), o qual, ao fixar os íons cloreto, contribui para a diminuição da concentração de cloretos livres na solução contida nos poros do concreto. Os cloretos livres são os responsáveis pelo início da corrosão da armadura.

PAGE (1991), afirma que um dos aspectos que impedem o processo da despassivação da armadura é a capacidade que certos cimentos, contendo escória ou pozolana, têm de restringir a mobilidade dos íons dentro da matriz do concreto, assim como o fato destas adições conferirem relativa durabilidade no que tange a corrosão de armaduras de concretos expostos a ambientes que contém cloretos. Isto ocorre porque estes cimentos podem reduzir substancialmente a permeabilidade do concreto, aumentando, conseqüentemente, a resistividade elétrica, especialmente se houver possibilidade de redução da relação água/cimento.

LI; ROY; MARUSIN APUD NEVILLE (1997), utilizaram concretos feitos com cimento Portland misturados com escória de alto forno, sílica ativa ou cinza volante e observaram que a difusão dos íons cloreto é dificultada pelo efeito de diminuição do tamanho dos poros.

GJØRV et al. (1976), provaram que o uso de 9% de sílica ativa em relação à massa de cimento, reduz a difusividade dos cloretos em 1/5.

TESSARI; DAL MOLIN (1998) estudaram cinco tipos de cimento (CP II-E, CP II-F, CP IV-Z, CP V-ARI, CP V-ARI-RS), com e sem adição, e cinco relações água/aglomerante. Os resultados obtidos mostraram que os cimentos CP IV-Z, CP V-ARI e CP V-ARI-RS foram os que apresentaram melhores resultados quanto ao controle da iniciação da corrosão por cloretos.

MONTEIRO et al. (1999), em pesquisa sobre a influência do tipo de cimento na penetração dos cloretos, na qual utilizou CP II-F, CP II-Z e CP V à relação a/c de 0,8 e 0,9, constatou em ensaio acelerado de cloretos, através de ciclos de molhagem e secagem, que concretos confeccionados com cimento CP II-Z-32 apresentaram menos cloretos livres a relação a/c=0,8. Porém, quando a relação a/c foi 0,9, notou-se que o teor de cloretos aumentou, independente do tipo de cimento. Chegaram a concluir ainda que para relações a/c elevadas, o efeito de refinamento dos poros a baixas idades não foi significativo

Quanto ao desenvolvimento da corrosão induzida por cloretos, AI-MOUDI et al. (1992) APUD MONTEIRO; NEPOMUCENO (1997), constatou que os cimentos com adição de escória e sílica ativa apresentaram melhores desempenhos que os demais cimentos normalizados pela ABNT.

BAUER (1995) APUD MONTEIRO; NEPOMUCENO, observou em seu estudo que 24% de adição de escória de alto forno ao cimento foi eficiente à fixação de cloretos, em decorrência da relação a/c menor que 0,5.

Em trabalho produzido por WOLF (1991), foram avaliados os efeitos da adição de sílica ativa no desempenho do concreto, através de ensaios de corrosão acelerada e medidas da perda de massa gravimétrica. Neste trabalho variou-se o teor de sílica ativa entre 0 a 20%, a relação água/cimento entre 0.30 a 0.80 e o tempo de exposição com corrente impressa entre 0 a 28 dias. Como resultado, este pesquisador afirma que o aumento da resistividade elétrica do concreto e a diminuição do coeficiente de difusão do oxigênio contribuiriam para compensar a

diminuição do pH, como consequência do uso da sílica ativa, limitando a ocorrência da corrosão induzida por cloretos.

Nas pesquisa de MONTEIRO; NEPOMUCENO (1997), foram usados diversos tipos de cimento: CP II-F 32, CP III-32 e CP V-ARI-RS-MS; relação a/c de 0,7 e 0,4. Os corpos-de-prova armados (60 x 80 x 25 mm), foram confeccionados mantendo-se a mesma trabalhabilidade e curados por 7 dias em câmara úmida. Após período de cura, os corpos-de-prova permaneceram por 15 dias ao ar e em seguida, iniciou-se a penetração dos cloretos (2 dias de molhagem e 5 dias secagem). Em seguida, foi necessário um período de 7 dias de secagem ao ar e somente depois disto, os corpos-de-prova foram submetidos à carbonatação acelerada em câmara de carbonatação. Dentro da câmara de carbonatação, os corpos-de-prova foram submetidos a 8 minutos de aplicação de CO<sub>2</sub>, em fluxos de 30 em 30 minutos, a umidade relativa em torno de 65% até a despassivação de todas as armaduras, após a despassivação das armaduras os intervalos de medida de  $i_{corr}$  foi de 3 em 3 dias. Como resultado pode-se dizer que, o CP III-32 e o CP V-ARI-RS-MS apresentaram bom desempenho em relação à corrosão por cloretos à relação a/c=0,4. Porém, estes mesmos cimentos apresentaram os piores resultados de  $i_{corr}$ , em relação à carbonatação.

## **2.0. METODOLOGIA**

Em linhas gerais, o presente estudo se propõe a analisar a interferência das adições minerais no cimento tipo CP II F-32, e deste modo avaliar o desempenho que cada matriz pode oferecer para resistir ao fenômeno da corrosão induzida por cloretos.

### **2.1. Corpos-de-Prova**

Os corpos-de-prova foram confeccionados em forma de prisma, nas dimensões de 15 x 15 x 14cm; em cada qual foram colocados segmentos de barra

de aço CA-50 de 8mm de diâmetro e comprimento de 15 cm e cobrimento de 2 cm, conforme ilustra a Figura 2.

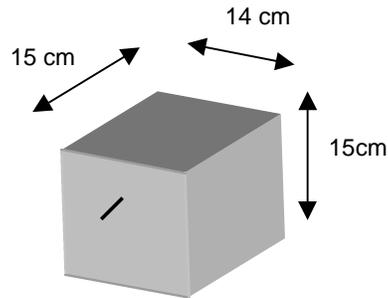


Figura 2 – Detalhe dos corpos-de-prova empregados na pesquisa.

Foram moldados sete corpos-de-prova para o ensaio de resistência à penetração de cloretos. Os corpos-de-prova de referência foram confeccionados apenas com cimento Portland CP II-F-32, com relação água/cimento igual a 0,70 em fôrmas. O adensamento foi feito manualmente, em três camadas. O traço do corpo-de-prova de referência foi modificado, de maneira que parte do cimento foi substituída por adições minerais nas proporções: 4 e 8% de sílica ativa; 20 e 40% de escória de alto forno; e 20 e 40% de cinza volante.

Após 24 horas da moldagem, os corpos-de-prova permaneceram em câmara úmida ficando nestas condições durante 7 dias.

## 2.2. Resistência à penetração de cloretos

### 2.2.1. Solução agressiva

A solução adotada para este experimento foi a de cloreto de sódio (NaCl) na concentração de 0,5% deste sal em relação à massa de água. A solução era completada a cada ciclo e trocada a cada duas semanas (dois ciclos).

### 2.2.2. Ciclos de molhagem e secagem

Após retirados da câmara úmida, os corpos-de-prova permaneceram em uma sala com temperatura de 20°C e umidade relativa de 50%± 10% durante 10

dias. Após este período, foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem na solução descrita em 3.2.1., onde permaneciam dois dias imersos na solução e cinco dias na sala de secagem. Estes ciclos foram repetidos durante 20 dias.

Após esta seqüência de ciclos, os corpos-de-prova foram colocados na câmara úmida, a fim de facilitar a propagação da corrosão.

### 2.2.3. Acompanhamento do potencial de corrosão

Logo após o período de cura, durante o decorrer de todo o experimento, foram realizadas medidas diárias de potencial de corrosão. Para obter o potencial de corrosão foi utilizado um eletrodo de referência de cobre/sulfato-de-cobre acoplado a um multímetro, conforme preconiza a ASTM C 876-1991.

A Tabela 1. apresenta os critérios de avaliação da corrosão conforme o valor do potencial medido. A despassivação da armadura foi associada ao potencial de  $-350\text{ mV}$ . Até este potencial, considerou-se que o material resistiu à penetração dos cloretos.

Tabela 1. – Critérios para avaliação do potencial de corrosão (ASTM C-876)

<b>Ecorr (mV, Cu/CuSO4)</b>	<b>Probabilidade de Corrosão</b>
>-200	5%
entre -200 e -350	50% (incerta)
<-350	95%

As medidas foram realizadas no período das 12h às 14h para uniformizar os horários das medidas em intervalos de leitura de aproximadamente 24h.

## 3.0. Análise e apresentação dos resultados

Antes de serem submetidas ao ensaio potencial de corrosão, os corpos-de-prova, apresentavam valores de potenciais superiores a  $-150\text{ mV}$ , indicando que em todos eles a película passivadora, também conhecida como filme de óxidos,

encontrava-se formada. Novamente foi possível comprovar que as armaduras se encontravam protegidas pelo meio alcalino presente no concreto. Essa análise pode ser verificada na Figura 3.

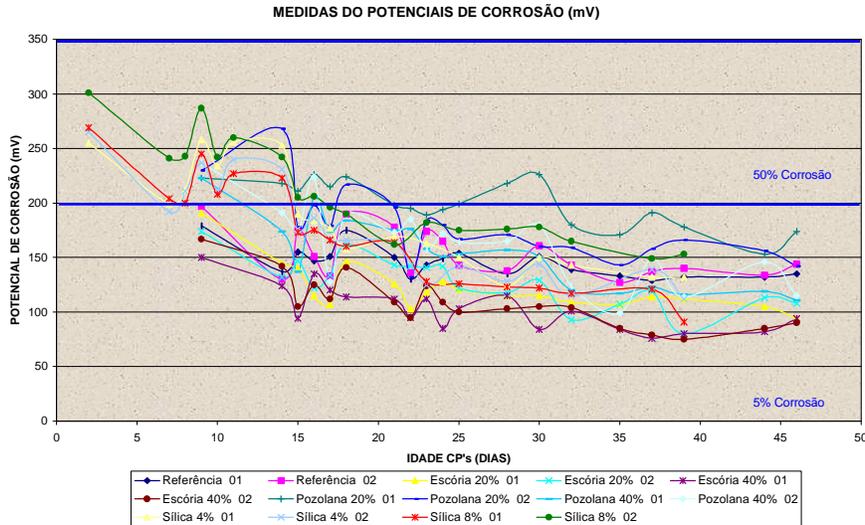


Figura 3 - Gráfico dos potenciais de corrosão nas primeiras idades.

Assim que os corpos-de-prova foram submetidos aos ciclos de molhagem e secagem pôde-se notar que todas as amostras atingiram, logo no primeiro ciclo, valores de potencial da ordem de  $-350\text{ mV}$ , configurando portanto, uma alta probabilidade de corrosão. Destaca-se os valores obtidos pelas amostras contendo 20% de Pozzolana e 40% de Escória que chegaram a valores inferiores a  $-450\text{ mV}$ .

Com o início do período de secagem, notou-se que os potenciais começaram a aumentar, atingindo novamente valores aceitáveis, que configurassem uma probabilidade nula, ou incerta de corrosão (caso da amostra com 40% de escória). Esses resultados são facilmente compreendidos já que ao mesmo tempo retira-se do concreto o agente agressivo, que não só funciona como redutor do pH, como catalisador do processo. É evidente que uma parte do NaCl empregado continua na amostra, mas não com a intensidade anteriormente encontrada. Além disso, a água é extremamente importante para o fenômeno da corrosão, dada a sua atuação como eletrólito.



## 4.0. Conclusões

O estudo do mecanismo da corrosão induzida por cloretos constata o grau de agressividade que estes íons proporcionam ao concreto. Fica demonstrado que mesmo com concentrações que facilmente podem ser encontradas em situações reais, os potenciais de corrosão rapidamente atingem valores que configuram grande probabilidade do processo.

Dos ensaios realizados, pode-se concluir que:

- Todas as amostras submetidas aos cloretos, após o primeiro ciclo de molhagem apresentaram potenciais mais negativos que  $-350\text{ mV}$ , porém quando entravam em ciclo de secagem estes potenciais tornavam-se mais positivos;
- Ao final dos ensaios todas as amostras ficaram na faixa de incerteza de corrosão. Porém, pode-se notar o pior desempenho dos corpos-de-prova de concreto contendo 20% de pozolana e do concreto contendo 40% de escória. Este desempenho ruim das duas adições minerais pode ser explicado através da pouca colmatação dos poros, o que não impediu os cloretos de se difundirem através do concreto. Porém, como não foi feito qualquer ensaio de finura destas adições não pode-se chegar a uma conclusão exata. Portanto, deixa claro que no caso do ataque de cloretos à estruturas de concreto armado o efeito filer a baixas idades é muito importante.

## 5.0. Referência Bibliográfica

ACI Committee 222R - 85. In: Corrosion of Metals in Concrete. **ACI JOURNAL**. P. 3 - 32, 1985.

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão De Armaduras Em Concreto**: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas. São Paulo / Goiânia, Editora PINI / UFG, 1997.

DIAB, H.; BENTUR, A.; HEITNER, C.; BEM-DOR, L. The diffusion of Cl<sup>-</sup> ions through Portland Cement and Portland Cement - Polymer pastes. **Cement and Concrete Research**. Vol. 18; pp. 715-722. 1998.

HUSSAIN, S.E.; RASHEEDUZZAFAR. Corrosion Resistance Performance of Fly Ash Blended Cement Concrete. **ACI MATERIALS JOURNAL**, v. 91, n. 3, p. 264-72, May / June. 1994.

LIMA, L. S. L. T.; MEDEIROS, M. H. F.; MONTEIRO, E. C. B.; BARKOKÉBAS Jr., B. Influência de Cimento com Adições Pozolânicas na Fase de Iniciação da Corrosão de Armaduras Devido a Ação de Cloretos. In.: 41º Congresso Brasileiro do Concreto, 1, Salvador, 1999. **ANAIS / CD-ROM**. Salvador, IBRACON, 1999. n.p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Durabilidade: Corrosão da Armadura no Concreto. In.: **Concreto: Estrutura, Propriedades E Materiais**. São Paulo, PINI, 1994, p. 168-73.

MONTEIRO, E. C. B.; NEPOMUCENO, A. A. Influência do Tipo de Cimento na Capacidade de Proteção de Alguns Cimentos Nacionais em Relação a Corrosão de Armaduras no período de Iniciação. In.: 40º Congresso Brasileiro do Concreto, 1, Rio de Janeiro, 1998. **ANAIS / CD-ROM**. Rio de Janeiro, IBRACON, 1998. n. p.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo, Pini, 1997.

PAGE, C.L.; SHORT, N.R., HOLDEN, W.R. The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel. **Cement and Concrete Research**, v. 16, p. 79 - 86, 1986.

PAGE, C. L. Mechanism of Corrosion os Steel in Concrete: Effects os carbonatation and chlorides. Training and Development (Fosroc).

REGATTIERI, C. E. X.; SILVA, M. G.; HELENE, P. Influência das Adições do Cimento na Resistência à Penetração de Ions Cloreto. In.: 41º Congresso Brasileiro do Concreto, 1, Salvador, 1999. **ANAIS / CD-ROM**. Salvador, IBRACON,1999. n. p.

TESSARI, R.; DAL MOLIN, D. C. Otimização das Qualidades do Concreto Armado frente à Corrosão das Amaduras - Escolha do tipo de cimento. In.: 40º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, 1998. **Anais/CD-ROM**. Rio de Janeiro, IBRACON, 1998.