



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



TRATAMIENTO SUPERFICIAL DO CONCRETO COM SILICATO DE SÓDIO X PENETRAÇÃO DE CLORETOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA

M. H. F. Medeiros⁽¹⁾, P. Helene⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Jardim das Américas – CEP: 81531-980 – Curitiba – PR - Brasil

⁽²⁾ Departamento de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Rua Professor Almeida Prado, S/N - Travessa 2 – CEP: 05508-900 – São Paulo – SP - Brasil

Resumen

Entre os tipos de tratamento superficial para concreto, está o Na_2SiO_3 , que reage com o NaOH presente na solução dos poros do concreto dando origem a compostos insolúveis. Este trabalho objetiva apresentar o efeito deste produto sobre o transporte de água e íons cloretos através do concreto. Para isso, são apresentados resultados de ensaios de absorção por imersão, absorção por sucção capilar e migração de cloretos. Os resultados indicam que este tratamento realmente reduz a penetração de água através do concreto, devendo intervir na cinética do processo de corrosão do concreto armado. Contudo, os resultados de absorção de água por imersão indicaram que este produto não deve ser aplicado em casos em que haja pressão de água, ou seja, o mecanismo de penetração seja a permeabilidade. Finalmente, foi demonstrado que o tratamento com Na_2SiO_3 reduz o coeficiente de difusão de cloretos resultando no aumento da vida útil da estrutura.

Discusión: Este trabalho avança no sentido de apresentar uma alternativa de estimativa da elevação do tempo de vida útil que o tratamento com Na_2SiO_3 pode proporcionar. Sendo esta a maior contribuição do trabalho.

Palavra-Chave: Concreto, proteção superficial, silicato de sódio, durabilidade, vida útil

Abstract

Among the types of surface treatment to concrete, there is the Na_2SiO_3 , that reacts with NaOH inside the pores of the concrete and forms insoluble composites. This paper aims to present the effect of this product on the water and chloride transport through the concrete. For this, results of immersion absorption test, capillary absorption test and chloride migration test are presented. The results indicate that this treatment really reduces the water penetration through the concrete and influence the kinetic of the corrosion process. However, the immersion water absorption results indicated that the treatment does not have to be applied when the mechanism of water penetration is the permeability. Finally, it was demonstrated that the sodium silicate reduces the chloride diffusion coefficient, increasing the service life of the reinforced concrete structure.

Keywords: Concrete, superficial treatment, sodium silicate, durability, service life

INTRODUÇÃO

Uma forma possível de aumentar a vida útil de estruturas de concreto armado submetidas ao ataque por cloretos é a adoção de proteção superficial do concreto, que inibe a penetração de agentes agressivos por difusão e absorção de água contaminada.

Os materiais para proteção do concreto podem ser classificados em três grupos: hidrofugantes (torna o concreto repelente à água – ver detalhes em [1]), bloqueadores de poros (reagem com constituintes solúveis presentes nos poros do concreto e formam produtos insolúveis) e pinturas (forma um filme contínuo na superfície do concreto). A figura 1 ilustra estas três categorias de produtos de proteção.

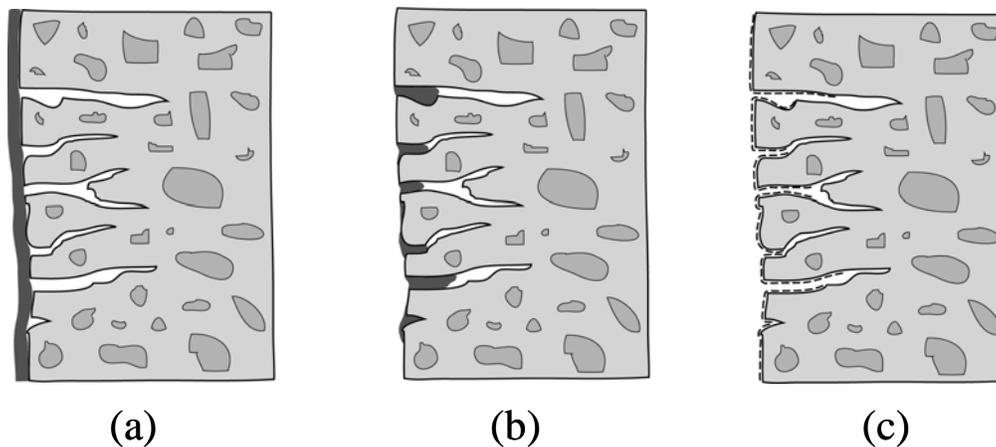


Figura 1 – Grupos de tratamentos de superfície para concreto: (a) pinturas (b) bloqueadores de poros (c) hidrofugantes ([2] adaptado de [3]).

O tratamento com hidrofugante de superfície e formadores de película (pinturas) já foram abordados em trabalhos anteriores [1, 2, 4, 5].

O objetivo deste trabalho é divulgar resultados sobre a eficiência do tratamento superficial por silicatação (bloqueadores de poros) para a proteção do concreto armado contra a corrosão de armaduras ocasionada pelo ataque por cloretos. Para isso, foram realizados ensaios de absorção de água e de determinação do coeficiente de difusão de cloretos, já que estas são as principais variáveis que governam a contaminação do concreto com cloretos.

TRATAMENTO COM SILICATO DE SÓDIO

O silicato de sódio é utilizado na indústria do cimento para várias aplicações. Por exemplo: como redutor de umidade no processo de produção do clínquer; como ativador de cimento de escória; como acelerador de pega de concreto projetado; como aditivo protetor de fibras vegetais em compósitos de cimento e como sistema de proteção de superfície para concreto.

Teoricamente, este tipo de produto penetra nos poros superficiais do concreto e reage com a portlandita formando C-S-H. De acordo com Thompson et al. [6], a reação representada na

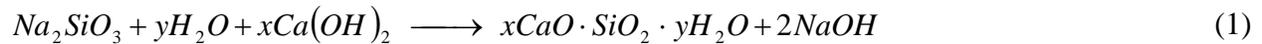


3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Equação 1 representa o que acontece quando a solução de silicato de sódio penetra nos poros do concreto.



Desse modo, este tratamento forma uma camada menos porosa na peça de concreto alterando a penetração de água no concreto.

Como a reação do tratamento é entre o silicato de sódio e a portlandita $[Ca(OH)_2]$, é fácil compreender que em estruturas carbonatadas a reação acima não ocorre, já que na camada superficial o $Ca(OH)_2$ já reagiu com o CO_2 e deu origem a carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Em casos como estes, é necessário fazer uma impregnação com hidróxido antes da aplicação do silicato de sódio. Isto explica o fato de Kagi; Ren [7] afirmarem que uma redução significativa da penetração de água no concreto ocasionada pelo tratamento com solução de silicato só é obtida se o concreto for muito novo e repetidas aplicações forem efetuadas.

Apesar de este tipo de tratamento ser conhecido a algumas décadas, pouca informação técnica e científica tem sido publicada sobre este tema. Para preencher pelo menos parte desta lacuna, o trabalho de tese de Medeiros [2] abordou esta categoria de tratamento de superfície para concreto e estará sendo publicado ainda este ano.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Materiais

O concreto utilizado como substrato neste estudo foi de proporcionamento 1,0:1,8:2,7, com relação água/cimento igual a 0,52. Este substrato apresentou f_{c28d} de 32 MPa, teor de argamassa de 51% e consumo de cimento de 358 kg/m³.

Para a confecção do concreto do substrato foram utilizados brita 0 granítica (pedrisco) como agregado graúdo, areia natural média como agregado miúdo e cimento CII E fabricado pela CIMINAS.

Os corpos-de-prova moldados para servirem de substrato padronizado para a aplicação das soluções de silicato foram curados até 42 dias em câmara úmida com U.R. de 100%, idade que corresponde ao início do patamar de estabilização da curva de elevação da resistência à compressão ao longo do tempo, como pode ser ilustrado na Figura 2. Este critério de escolha foi adotado com o intuito de eliminar a influência da cura adicional que ocorreria no ensaio de determinação do coeficiente de difusão de cloretos, que envolve um período de imersão, o que afetaria principalmente a série de referência.

Os sistemas de tratamento superficial estudados foram uma solução aquosa de silicato de sódio (diluição de 20%), um produto comercial a base de silicato de sódio e uma solução de silicato de sódio comercial.

Antes da aplicação dos produtos de proteção, os corpos-de-prova foram secos a 100 °C em estufa ventilada até constância de massa. Em seguida ficaram em ambiente de laboratório até esfriarem e só então a aplicação dos produtos foi iniciada.

Os produtos foram aplicados em uma única demão com consumo de solução de 250 g/m². Após a aplicação, realizou-se a saturação da superfície 2 h, 24 h e 48 h após a aplicação do silicato. Passados 7 dias da aplicação do sistema, o ensaio foi realizado. A seguir encontram-se as informações relevantes sobre os ensaios empregados neste estudo.

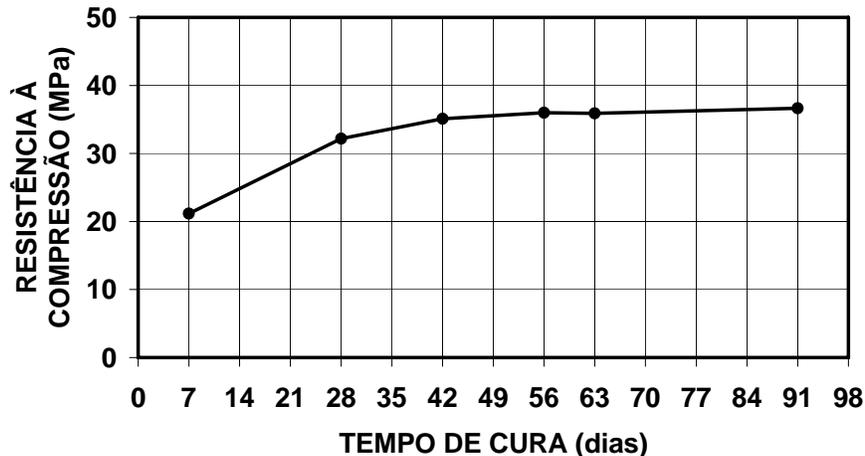


Figura 2 - Evolução da resistência à compressão do concreto do substrato (1:4,5; $\alpha=51\%$ e $C=358 \text{ kg/m}^3$).

Absorção de água por imersão

Este ensaio foi realizado em conformidade com a NBR 9798/87 [8]. Os corpos-de-prova utilizados são cubos de 100 mm de aresta.

Passados sete dias da aplicação dos silicatos, os corpos-de-prova foram imersos em água. A absorção foi medida a partir da pesagem dos corpos-de-prova após a secagem superficial dos mesmos e ao longo do tempo de ensaio. Foram utilizados 4 corpos-de-prova para cada caso estudado.

Absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi conduzido de acordo com a NBR 9779/87 [9]. Na lateral dos corpos-de-prova foi realizada uma proteção com silicone até a altura de 4 cm a partir da face onde foi aplicado o sistema de proteção superficial. Este cuidado foi tomado para induzir que a penetração de água só ocorra pela face circular de ensaio. A Figura 3 ilustra um corpo-de-prova com a proteção lateral de silicone e o ensaio em andamento. Foram utilizados 4 corpos-de-prova para cada caso estudado.

A absorção de água é acompanhada ao longo do tempo de ensaio a partir da pesagem dos corpos-de-prova. O monitoramento da variação de massa devido a absorção de água foi feito até 16 dias.



(A) corpo-de-prova com silicone na lateral.



(B) ensaio em andamento.

Figura 3 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.

Coeficiente de difusão no estado estacionário:

Este método é baseado na primeira lei de Fick, estado estacionário. Consiste em submeter fatias de 25 mm de espessura extraídos de corpos-de-prova cilíndricos de ϕ 100 mm x 200 mm a um ensaio de migração de cloretos com 12 V de diferença de potencial aplicada.

A câmara do lado catódico é preenchida com uma solução com 3% de NaCl e a do lado anódico com água destilada. O volume de cada uma destas câmaras é de 3 l e como eletrodos colocados em cada pólo do ensaio utilizou-se barras de cobre com 35 cm de comprimento e 6 mm de diâmetro. A Figura 4 apresenta a configuração do ensaio.

A variável de resposta utilizada no ensaio foi o teor de cloretos no lado anódico. Esta prática possibilita a obtenção do fluxo de cloretos no estado estacionário, que é usado para o cálculo do coeficiente de difusão de acordo com a Equação 2 (Equação de Nernst-Planck).

$$J = \frac{zF}{RT} DC \frac{dE}{dx} \quad (2)$$

Onde: J = fluxo de massa ($\text{g}/\text{m}^2\text{s}$); D = coeficiente de difusão (m^2/s); C = concentração (g/m^3); x = distância (m); z = carga elétrica; F = constante de Faraday ($\text{J}/\text{V} \times \text{mol}$); R = constante dos gases ($\text{J}/\text{mol} \times \text{K}$); T = temperatura (K); E = potencial elétrico (V).

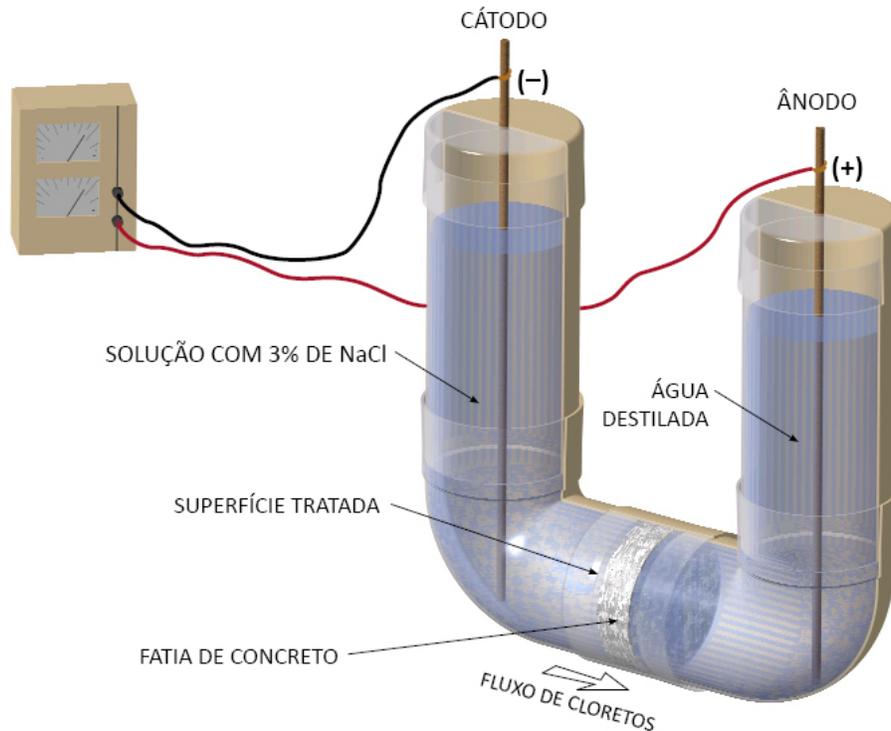


Figura 4 - Esquema do ensaio de difusão no estado estacionário com 12 V de ddp aplicada.

A determinação do teor de cloretos na solução do lado anódico foi realizada por titulação potenciométrica de amostras da solução. Neste procedimento, é necessária a coleta de amostras de 5 ml, que são avolumadas para 50 ml e a determinação é conduzida nesta solução. Ao final do ensaio, obtém-se o gráfico da concentração de cloretos ao longo do tempo, como está ilustrado na Figura 5.

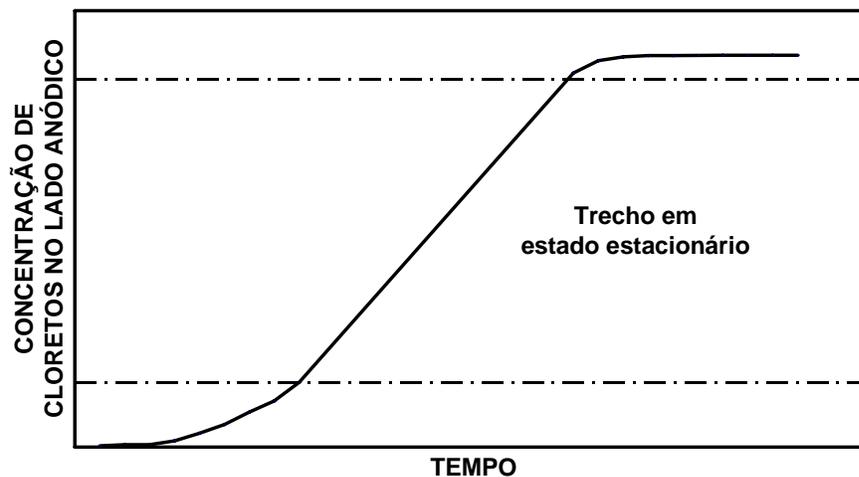


Figura 5 – Exemplo da variação da concentração de cloretos no lado anódico (pólo positivo).

A partir do trecho linear e diagonal deste gráfico (trecho em estado estacionário), calcula-se o fluxo de íons cloretos do lado catódico para o lado anódico. Estes valores de fluxo, são usados na Equação 2 para calcular o coeficiente de difusão de cloretos.

A teoria que fundamentou a elaboração deste experimento encontra-se publicada em [10, 11, 12].

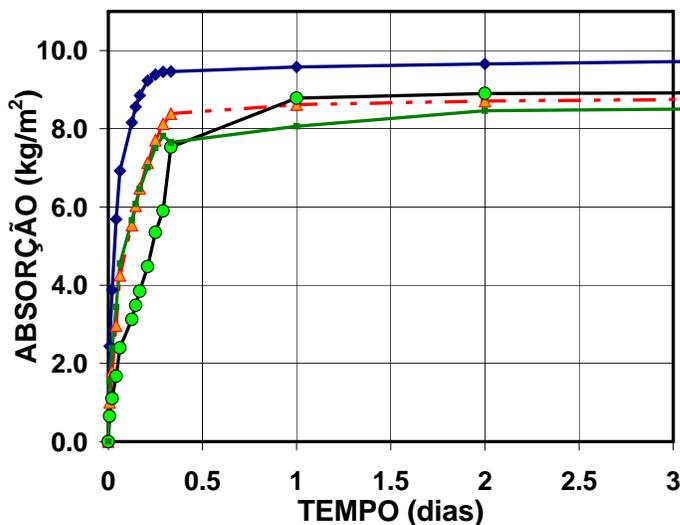
RESULTADOS

Absorção de água por imersão

A Figura 6 apresenta os resultados de absorção de água por imersão para o concreto de referência e os concretos com a superfície tratada com solução de silicato de sódio. A partir destes resultados fica claro que o tratamento a base de silicato tem pouca influência na absorção de água por imersão. Todos os corpos-de-prova atingiram uma estabilização de ganho de massa devido à absorção de água por volta de 8 horas de ensaio.

Contudo vale ressaltar que o patamar de estabilização no caso dos concretos tratados com as soluções de silicato foi um pouco abaixo do patamar do concreto de referência e isso se deve ao fechamento dos poros da camada superficial do concreto.

De uma forma geral, pode-se dizer que os três tratamentos apresentaram efeito muito semelhante neste tipo de ensaio.



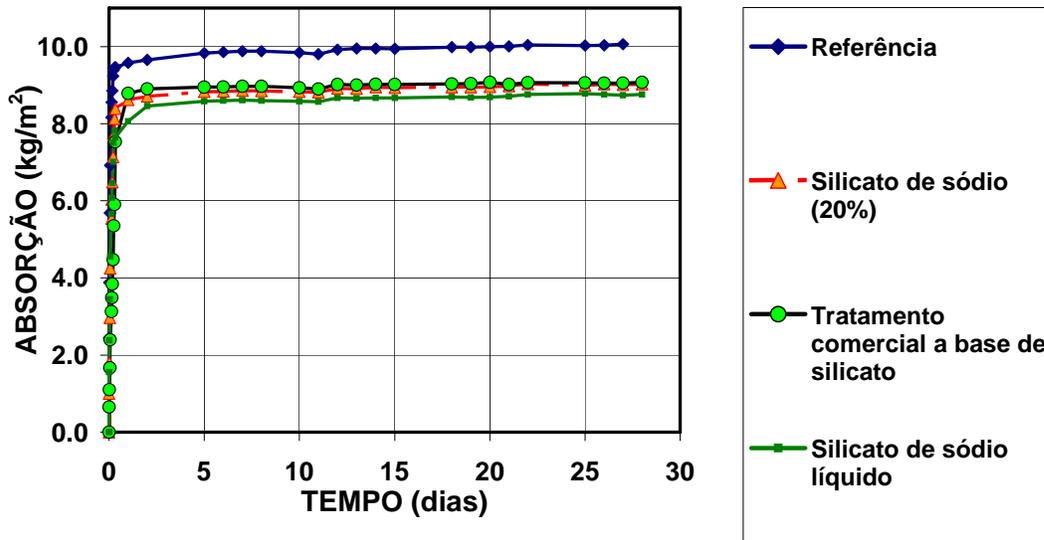


Figura 6 – Absorção de água por imersão para concreto tratado e não tratado.

Absorção de água por capilaridade

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade. Neste caso os tratamentos mostraram grande efeito, reduzindo a absorção do concreto de forma significativa. Como a absorção é a forma de absorção de água mais comum em uma estrutura de concreto armado ao ar livre, pode-se considerar que este efeito é um fator que contribui para a durabilidade do concreto armado. Se o tratamento dificulta a penetração de água, isso quer dizer que a névoa salina também vai entrar com maior dificuldade e que, ainda que o processo de corrosão já esteja instalado, sua cinética vai ser reduzida pela restrição do acesso da água.

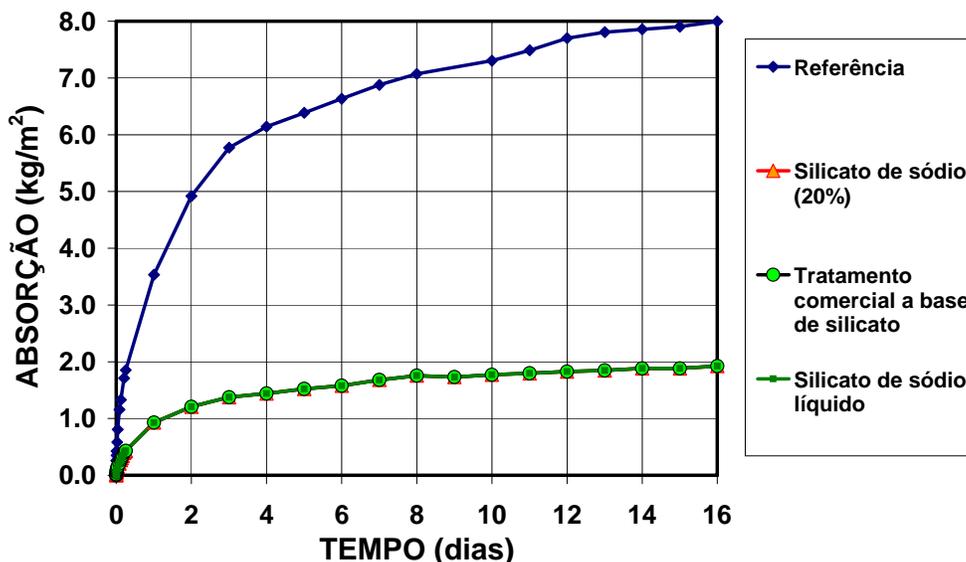


Figura 7 – Absorção de água por capilaridade para concreto tratado e não tratado.

Coefficiente de difusão no estado estacionário

A Figura 8 mostra a evolução da quantidade de cloretos monitorada ao longo do tempo no lado anódico da célula de migração. Esta figura permite uma avaliação qualitativa dos tratamentos quanto à capacidade de reduzir a difusão do íon cloreto através do concreto.

Porém a forma mais apropriada de interpretar este tipo de resultado é transformá-lo em quantitativo através da determinação do coeficiente de difusão de cloretos.

Desse modo, a Figura 9 ilustra o coeficiente de difusão de cloretos para o concreto de referência e para os concretos tratados. Os dados apresentados mostram que o tratamento com silicato de sódio reduz de 40 a 86% a difusão de cloretos através do concreto, confirmando que este tipo de tratamento é capaz de proteger o concreto da contaminação por cloretos.

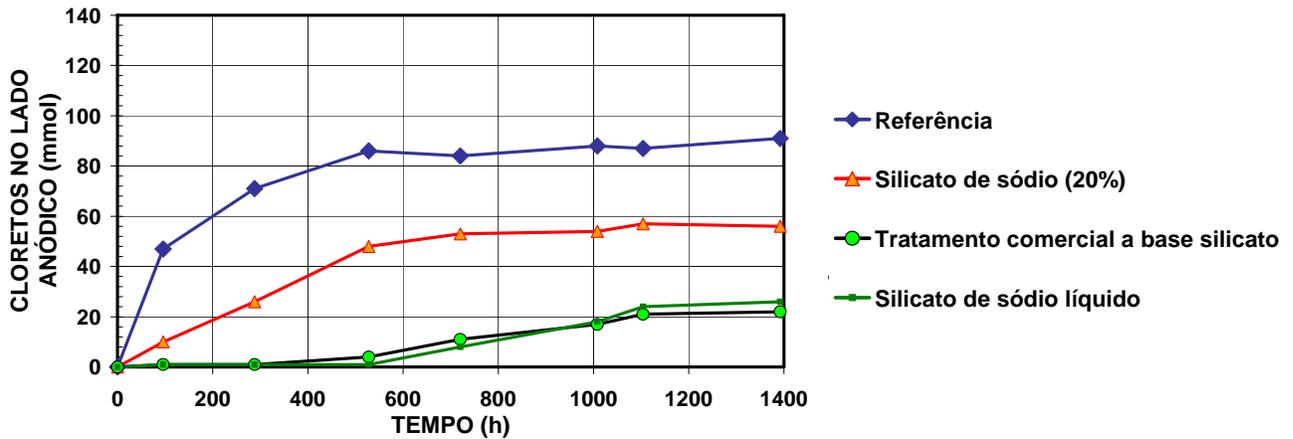
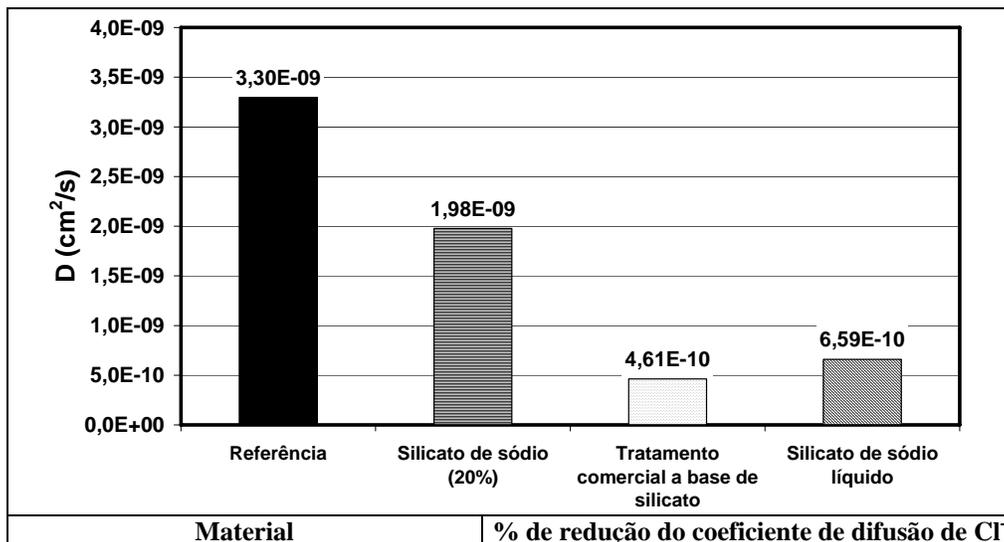


Figura 8 – Teor de cloretos no lado anódico da célula de migração ao longo do tempo de ensaio (lado com pólo positivo).





3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Silicato de sódio (20%)	40%
Tratamento comercial a base de silicato	86%
Silicato líquido	80%

Figura 9 – Coeficiente de difusão de cloretos baseado em método de migração no estado estacionário.

Helene [13] relata as expressões representadas nas Equações 3 e 4, que se baseiam na segunda lei de Fick da difusão. Estas equações foram empregadas neste artigo para a interpretação dos resultados de coeficiente de difusão, viabilizando a construção dos gráficos que relacionam a profundidade de penetração de cloretos com a vida útil da estrutura (Figura 10).

$$C_{Cl^-} = 2(z) \sqrt{D_{efCl} t} \quad (3)$$

Onde: C_{Cl^-} = espessura (cm); z = valor da função erro de Gauss; t = Vida útil (anos); D_{efCl} = Coeficiente de difusão efetivo (cm^2/ano).

$$erf(z) = 1 - \frac{C_{C_{Cl}} - C_0}{C_s - C_0} \quad (4)$$

Onde: $C_{C_{Cl}}$ = concentração de cloretos na profundidade C_{Cl} no tempo t ; C_0 = concentração inicial de cloretos no interior do concreto; C_s = concentração de cloretos na superfície do concreto (anos); $erf(z)$ = função erro de Gauss.

Verifica-se uma tendência clara de redução do coeficiente de difusão quando os sistemas de proteção superficial a base de silicato de sódio foram empregados. A consequência disso é a elevação da vida útil da estrutura que venha a ter este tipo de sistema aplicado.

Com os valores de coeficiente de difusão de cloretos para cada caso estudado e baseado na segunda lei de Fick, é possível elaborar gráficos que relacionam o tempo de vida útil com a profundidade em que o teor limite de cloretos para o início da corrosão de armaduras é atingido. A Figura 10 ilustra este tipo de resultado para cada sistema de proteção estudado. Verifique que para a realização dos cálculos necessários para a construção destes gráficos foi preciso adotar 0,4% em relação à massa de cimento como o valor limite para a despassivação das armaduras e fixar o teor de cloretos na superfície do concreto (C_s) em 1,8.

Nesta ilustração está claro que fixado um cobrimento de 3 cm, o tempo de vida útil da estrutura é de cerca de 28 anos no caso do concreto sem proteção e pode superar os 100 anos dependendo do sistema de proteção que venha a ser aplicado na superfície do concreto.

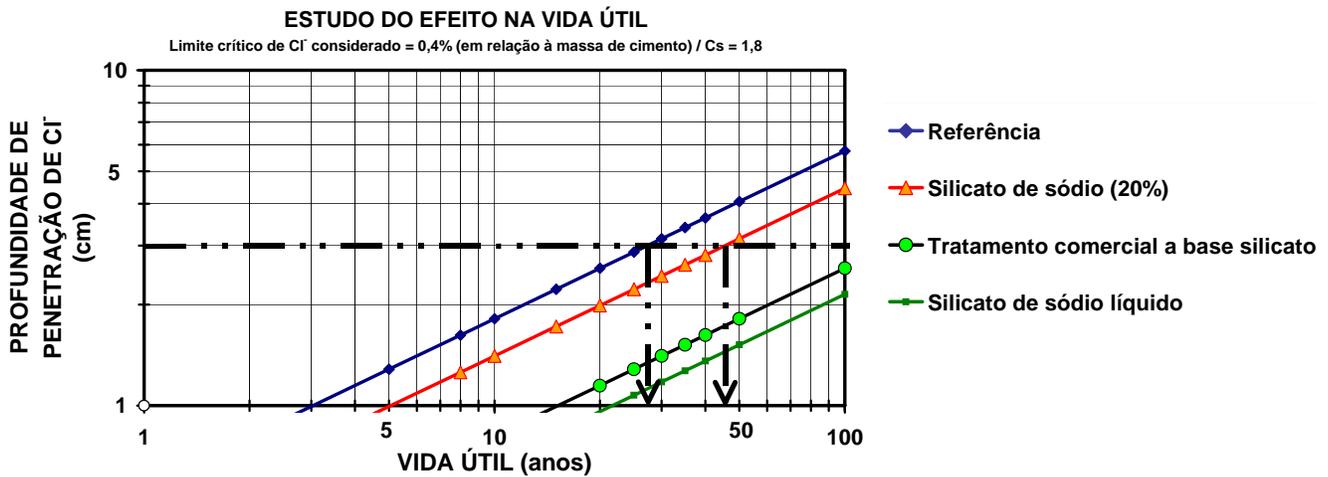


Figura 10 – Efeito da proteção superficial pela aplicação de silicato de sódio na vida útil da estrutura de concreto armado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicaram que o tratamento de superfície com silicato de sódio pode ser uma boa opção para a proteção de uma estrutura de concreto armado com vistas à corrosão de armaduras e mais especificamente com relação ao ataque por cloretos. Contudo, ficou comprovado que este tipo de produto não torna os concretos impermeáveis, sendo aconselhável que não sejam usados em condições onde exista pressão de água.

A redução na absorção de água por sucção capilar causa menor penetração de água do meio externo e a limitação do acesso de umidade implica em uma menor cinética do processo de corrosão (caso o processo de corrosão de armaduras já esteja instalado), além de dificultar a contaminação do concreto por íons cloretos, já que estes íons penetram no concreto por meio de um eletrólito (de forma geral a água).

Foi demonstrado que o tratamento do concreto com o silicato de sódio reduz o coeficiente de difusão de forma considerável. Baseado na primeira lei de Fick é possível demonstrar que o tratamento da superfície do concreto com silicato de sódio pode elevar a vida útil de uma estrutura de forma considerável, como ilustrado na Figura 10.

Uma pesquisa objetivando estudar a redução da porosidade causada pelo tratamento com o silicato de sódio e uma investigação sobre o produto formado em decorrência do tratamento encontram-se em desenvolvimento, pelos autores deste trabalho, nas instalações do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

AGRADECIMENTOS



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Os autores agradecem o apoio fornecido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP), Universidade Federal do Paraná (UFPR) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), entidades que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

Estes autores também agradecem a Arquiteta Dominique Elena Giordano Gonzalez, pela elaboração de algumas ilustrações deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] M. H. F. Medeiros, P. Helene, “Efficacy of Surface Hydrophobic Agents in Reducing Water and Chloride Ion Penetration in Concrete”, *Materials and Structures* **41**, 1 (2008): pp. 59-71.
- [2] M. Medeiros, “Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, (2008): pp. 1-218 .
- [3] A. Bentur, S. Diamond, N. S. Berke, *Corrosion Control. In: Steel Corrosion in Concrete – Fundamentals and Civil Engineering Practice.* (Londres, Inglaterra: E & FN SPON, 1997): pp. 94-145.
- [4] M. H. F. Medeiros, T. S. Gomes, P. Helene, “Hidrofugantes de superfície: Uma opção para proteção de estruturas de concreto armado” in: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, (2005): Pernambuco, Brasil.
- [5] M. H. F. Medeiros, T. S. Gomes, P. Helene, “Proteção Superficial para o Concreto Armado: Estudo da sua Capacidade de Redução na Penetração de Íons Cloretos” in: 48º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, (2006): Pernambuco, Brasil.
- [6] J. L. Thompson, M. R. Silsbee, P. M. Gill, B. E. Scheetz, “Characterization of silicate sealers on concrete”, *Cement and Concrete Research* **27**, 10 (1997): pp. 1561-1567.
- [7] D. A. Kagi, K. B. Ren, “Reduction of water absorption in silicate treated concrete by post-treatment with cationic surfactants”, *Building and Environment* **30**, 2 (1995): pp. 237-243.
- [8] NBR 9798/87
- [9] NBR 9779/87
- [10] C. Andrade, “Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements”, *Cement and Concrete Research* **23** (1993): pp. 724-742.
- [11] O. Truc, J. P. Ollivier, M. CARCASSÈS, “A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test”, *Cement and Concrete Research* **30** (2000): pp. 217-226.
- [12] M. H. F. Medeiros, B. P. Moraes; P. Helene, “Ensaio de migração de íons cloretos na tecnologia de concreto – limitações e cuidados na interpretação” in: Congresso Latino Americano de Corrosão, LATINCORR 2006, ABRACO, (2006): Fortaleza, Brasil.
- [13] P. Helene, *Durabilidad. Interpretación y evaluación de resultados.* In: *Manual de Diagnosis e Intervención en Estructuras de Hormigón Armado.* (Barcelona, Espanha: Col·legi d’Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 2000): pp. 87-102.