

# Elevação do tempo de vida útil pelo uso de sistemas de proteção superficial sobre o concreto armado

**Marcelo Medeiros<sup>1</sup>; Paulo Helene<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Departamento de Construção Civil PCC/USP, São Paulo, SP – marcelo.medeiros@poli.usp.br*

<sup>2</sup>*Departamento de Construção Civil PCC/USP, São Paulo, SP – paulo.helene@pcc.usp.br*

## **RESUMO:**

O objetivo deste trabalho é caracterizar a magnitude do benefício que a aplicação de sistemas de proteção superficial pode proporcionar a uma estrutura de concreto armado em termos de aumento de vida útil em ambientes atacados por íons cloretos. Para isso, foram usados produtos formadores de película base acrílico, hidrofugantes de superfície base silano/siloxano e sistemas de proteção dupla. O programa do experimento compreendeu a determinação do coeficiente de difusão de cloretos por um método de migração de íons. Todos os ensaios foram desenvolvidos sobre substrato de concreto de dosagem constante e considerado como padrão. O concreto sem proteção superficial sempre foi usado como referência. Entre as conclusões obtidas, destaca-se que é possível dobrar o tempo de vida útil de uma estrutura de concreto armado com a aplicação de um sistema de proteção de superfície.

**PALAVRA-CHAVE:** *Concreto armado, proteção superficial, vida útil, cloreto.*

## **1 INTRODUÇÃO**

De acordo com HELENE [1], os cloretos do ambiente podem penetrar na estrutura através dos mecanismos clássicos de penetração de água e transporte de íons. Os cloretos potencialmente agressivos encontram-se na natureza na forma dissolvida em água. Como cristal sólido eles não apresentam risco elevado para as estruturas, pois não penetra na porosidade do concreto que tem dimensões muito mais reduzidas que a dos cristais usuais. Como sólido, no entanto, pode depositar-se por impactação na superfície do concreto e aí permanecer até que uma chuva o dissolva e o transporte para o interior da estrutura através dos mecanismos de absorção capilar ou difusão.

Ainda segundo HELENE [1], em fachadas a solução com cloretos pode sofrer a ação da gravidade, da energia cinética das gotas e do vento que geram um diferencial de pressão suficiente para empurrar a água com os cloretos dissolvidos para o interior do concreto.

Desse modo, fica evidente que diferentes mecanismos podem ocorrer no transporte de massa por um meio poroso como o concreto, tais como absorção por sucção capilar, permeabilidade e difusão. Na prática estes mecanismos podem ocorrer de forma individual ou em conjunto. Quando o segundo caso vem a ocorrer, é comum adotar-se um mecanismo como o que prevalece sobre os outros de modo a simplificar o entendimento do processo de transporte e intervir no mesmo para aumentar a durabilidade do material.

Desse modo, é importante reconhecer que a difusão não é o único mecanismo de transporte de cloretos no concreto, principalmente nos primeiros milímetros de cobrimento [2], porém, no presente trabalho optou-se por apresentar e interpretar os resultados de coeficiente de difusão de cloretos. Resultados sobre absorção por sucção capilar e por permeabilidade a baixa pressão já foram publicados anteriormente por MEDEIROS; GOMES; HELENE [3].

## 2 DIFUSÃO DE CLORETOS

É o transporte de moléculas ou íons livres na solução de poros resultando em um fluxo de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração da substância em difusão. No caso do concreto em contato com uma solução de cloreto de sódio, ao contrário do que ocorre com os mecanismos de permeabilidade e de absorção capilar, a difusão não depende do fluxo de água para a penetração de cloretos e sim da existência de eletrólito e um gradiente de concentração de cloretos. Este processo está representado na Figura 1.

Pode-se dizer que o coeficiente de difusão ( $D$ ) é uma grandeza capaz de caracterizar o concreto de uma determinada estrutura, pois ele representa a habilidade do material em permitir o transporte de uma determinada substância em sua massa. Vale salientar que o coeficiente de difusão de cloretos depende da concentração de cloretos ( $c$ ), da disponibilidade de eletrólito e da temperatura [4].

De acordo com KROPP [5], não existem dados exatos disponíveis que relacionem a difusão com o teor de umidade do concreto. Contudo, como o transporte ocorre ao longo dos poros capilares, para haver difusão é preciso que estes estejam totalmente preenchidos com água ou no mínimo conter um alto teor de umidade. O mecanismo de difusão cessa se os caminhos de líquido dos capilares são interrompidos pela secagem. Desse modo, a difusividade máxima ocorre em condições de saturação e decresce continuamente com a redução do teor de umidade. Um teor de umidade em equilíbrio com valores de umidade relativa do ar na faixa de 60-80% pode ser considerado como a faixa limite de difusão.

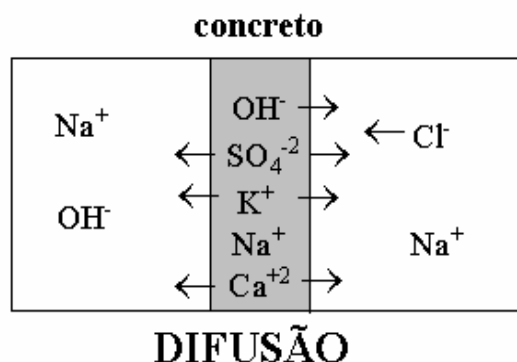


Figura 1 – Esquema do processo de difusão [6].

Outro parâmetro ambiental que influencia a difusão de íons é a temperatura. Estas duas grandezas se relacionam de forma direta uma vez que a elevação da temperatura tende a facilitar a mobilidade iônica e conseqüentemente a difusão dos íons cloretos.

A descrição teórica do ingresso dos íons cloretos devido ao processo de difusão é feita basicamente pelas leis de Fick da difusão. Contudo, um fator que dificulta o modelamento é a capacidade de fixação de cloretos dos produtos de hidratação que varia de acordo com variáveis como o tipo de cimento e a presença ou não de adições minerais na dosagem do concreto [5].

HELENE [6] relata a expressões representadas nas Equações 1 e 2, que consiste na segunda lei de Fick da difusão. Esta expressão foi empregada neste artigo para a interpretação dos resultados, viabilizando a construção dos gráficos que relacionam a profundidade de penetração de cloretos com a vida útil da estrutura.

$$C_{Cl^-} = 2(z) \sqrt{D_{ef_{Cl}} t} \quad \text{Equação 1}$$

onde :

$C_{Cl^-}$  = espessura (cm);

$z$  = valor da função erro de Gauss;

$t$  = vida útil (anos);

$D_{ef_{Cl}}$  = Coeficiente de difusão efetivo ( $cm^2 / ano$ ).

$$erf(z) = 1 - \frac{C_{Cl} - C_0}{C_s - C_0} \quad \text{Equação 2}$$

onde :

$C_{Cl}$  = concentração de cloretos na profundidade  $C_{Cl^-}$  no tempo;

$C_0$  = concentração inicial de cloretos no interior do concreto;

$C_s$  = concentração de cloretos na superfície do concreto (anos);

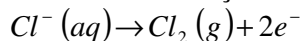
$erf(z)$  = função erro de Gauss.

### 3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO A PARTIR DE ENSAIOS DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS

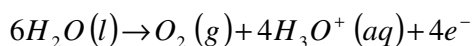
A experiência indica que ensaios de curta duração resultam em coeficientes de difusão no estado não estacionário maiores do que os valores obtidos em medidas de longo prazo em estruturas reais. Então, o melhor ensaio de migração para reproduzir condições reais deveriam ser ensaios mais longos [8]. Porém, a necessidade de avaliação de materiais ou parâmetros de dosagem requer resultados em curto espaço de tempo para viabilizar a tomada de decisão em condições práticas. Isto quer dizer que o desenvolvimento de procedimentos de determinação do coeficiente de difusão de cloretos que permitam aliar curto período de ensaio com redução de erros é de grande valia para o meio técnico e científico.

Desse modo, a escolha da melhor forma de condução do ensaio deve considerar aspectos como tempo de ensaio, simplicidade de execução, custo e menor dispersão dos resultados, entre outros fatores. MEDEIROS; MORAES; HELENE [9] apresentam uma comparação entre alguns métodos de determinação do coeficiente de difusão através de ensaios de migração de íons cloretos.

De acordo com TRUC; OLLIVIER; CARCASSÈS [10], em um ensaio de migração pode ocorrer no ânodo reações como:



ou



Segundo os mesmos autores, a ocorrência destas reações depende do potencial de eletrodo, da intensidade do circuito e do pH da solução no cátodo. É fácil entender que a primeira reação deve ser evitada, pois, em caso contrário, haverá desprendimento de Cl em forma gasosa e a medida do fluxo, que é baseada na titulação da solução anódica, será subestimada. Contudo, a formação do  $Cl_2 (g)$  ocorre em concretos muito porosos ou fissurados, cuja condutividade é alta e a intensidade do circuito se torna elevada tornando a solução ácida o que favorece a ocorrência desta reação, como se encontra ilustrado na Figura 2. Por outro lado, a Figura 2 mostra que se o meio permanece básico os íons cloretos não são as únicas espécies em solução, pois os íons hipoclorito podem estar presentes na solução anódica. A

quantidade de íons hipoclorito formados depende do pH e do potencial de eletrodo. A presença destes íons pode distorcer as medidas durante a titulação da solução anódica.

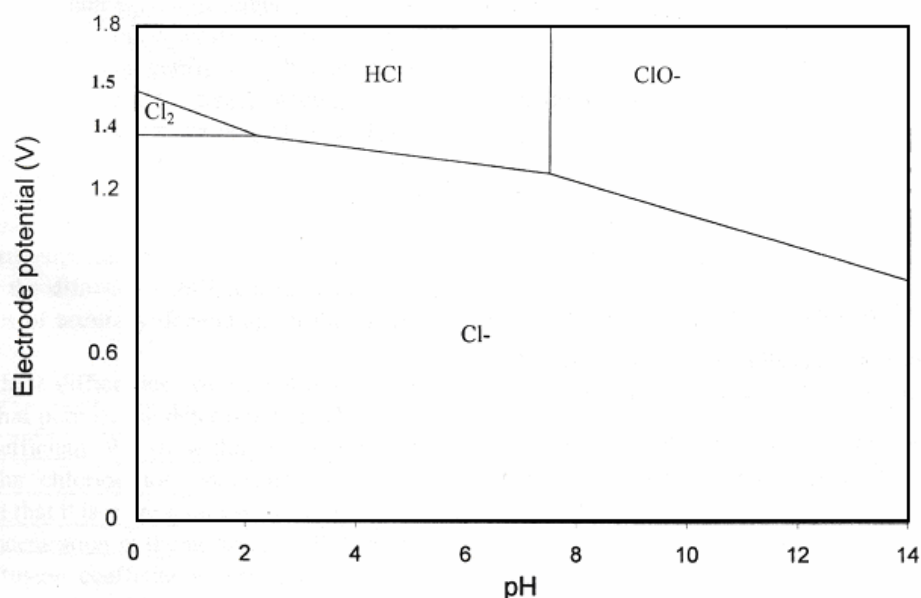
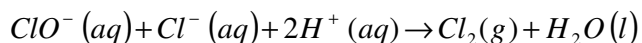


Figura 2 – Diagrama potencial-pH de Cl (Pourbaix apud TRUC; OLLIVIER; CARCASSÈS, [10]).

No caso da utilização da titulação pelo método do nitrato de prata, ácido precisa ser adicionado na solução e este ácido irá reagir com o íon hipoclorito segundo a reação abaixo e como consequência teremos o desprendimento de Cl<sub>2</sub> [10].



De acordo com TRUC; OLLIVIER; CARCASSÈS [10], esta teoria explica as diferenças encontradas entre os resultados de coeficiente de difusão obtidos pelo estado estacionário e pelo estado não estacionário, sendo as reações anódicas e os erros durante a titulação da solução anódicas os principais responsáveis pelas diferenças encontradas. Estes mesmos autores defendem que a determinação do coeficiente de difusão pelo monitoramento da solução catódica é uma forma de evitar os problemas citados anteriormente.

Uma possível fonte de erro no procedimento é o corte de fatias de espessura reduzida tal como 10 mm de espessura. Se a serra utilizada não for muito precisa e a espessura da fatia variar 1 mm para mais ou para menos, esta imprecisão representa 10 % da fatia idealizada. Uma solução interessante é aumentar a espessura da fatia de modo que a influência da imprecisão do corte seja diminuída, contudo, deve-se lembrar que neste caso o tempo de ensaio é aumentado.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

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/m<sup>3</sup>.

Para a confecção do concreto do substrato foram utilizados brita 1 granítica 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 dos sistemas de proteção 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 3. 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.

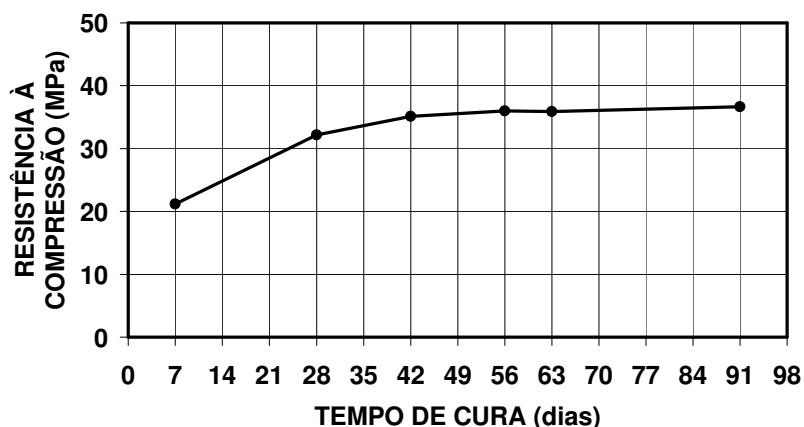


Figura 3 - Evolução da resistência à compressão do concreto do substrato (1:4,5;  $\alpha=51\%$  e  $C=358 \text{ kg/m}^3$ ).

Os sistemas de tratamento superficial estudados estão apresentados na Tabela 1 e consistem em dois materiais hidrofugantes de superfície, um formador de película e mais dois sistemas duplos de proteção compostos por hidrofugantes de superfície mais formador de película. A quantidade de material por unidade de área indicada pelos fabricantes foi respeitada em todos os casos.

Tabela 1 – Características dos sistemas de tratamento superficial estudados.

Sistema	Produto	Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	Viscosidade (Temp. = 20 $^{\circ}\text{C}$ )	Conteúdo de substância ativa	Tempo em aberto (h)
Simple	Silano/siloxano disperso em água (A)	1,0	10 CPs	22 % em massa	2 a 6
Simple	Silano/siloxano disperso em solvente (B)	0,78	10 CPs	Não declarado	2 a 6
Simple	Acrílico disperso em solvente (C)	0,90	45,5	Não declarado	1
Duplo	(A+C)	---	---	---	---
Duplo	(B+C)	---	---	---	---

Antes da aplicação dos produtos de proteção, os corpos-de-prova foram secos a  $100^{\circ}\text{C}$  em estufa ventilada até constancia de massa. Em seguida ficaram em ambiente de laboratório até esfriarem e só então a aplicação dos produtos foi iniciada.

O tempo de espera entre demãos foi de 120 minutos, estando de acordo com orientação dada pelos fabricantes dos produtos testados. Além disso, deve-se salientar que, após a

conclusão da aplicação dos produtos de proteção superficial, esperou-se 7 dias para que o ensaio fosse iniciado. Empregou-se 4 corpos-de-prova para cada caso estudado.

A seguir encontram-se as informações relevantes sobre o ensaio empregado neste estudo.

### **Coefficiente de difusão no estado estacionário (Método de Luping & Nilsson)**

LUPING; NILSSON [11] estabeleceram um modelo matemático para determinar o coeficiente de difusão sob a ação de uma diferença de potencial elétrico no estado não estacionário e propuseram um novo e rápido método para determinar o coeficiente de difusão de cloretos no concreto. O procedimento envolve a penetração de cloretos em um corpo-de-prova de 50 mm de espessura (cilíndrico ou prismático) aplicando uma ddp de 30 V, a medida da profundidade de penetração de cloretos, que pode ser determinada por um método colorimétrico como ilustrado na Figura 4, e finalmente o cálculo do coeficiente de difusão usando a Equação 3, que deriva da solução do seu modelo matemático.

$$D = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - a x_d^b}{t} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

R = constante dos gases (J/molK);

T = temperatura (K);

z = Valência do íon;

F = constante de Faraday (J/Vmol);

E = campo elétrico (V/m);

$x_d$  = profundidade de penetração de cloretos (m);

t = tempo de ensaio (s);

a e b = constantes do ensaio.



Figura 4 – Determinação da profundidade de penetração de cloretos com o auxílio de solução de nitrato de prata.

Este método consiste em um ensaio de migração que utiliza o estado não estacionário, obedecendo a segunda lei de Fick. De acordo com LUPING; NILSSON [11], com este procedimento o ensaio dura poucas horas para concreto comum e cerca de 2 dias para o caso de concreto de alto desempenho. No experimento aqui empregado, o ensaio teve a duração de 30 h.

A configuração do ensaio realizado de acordo com o procedimento aqui descrito encontra-se apresentado na Figura 5.

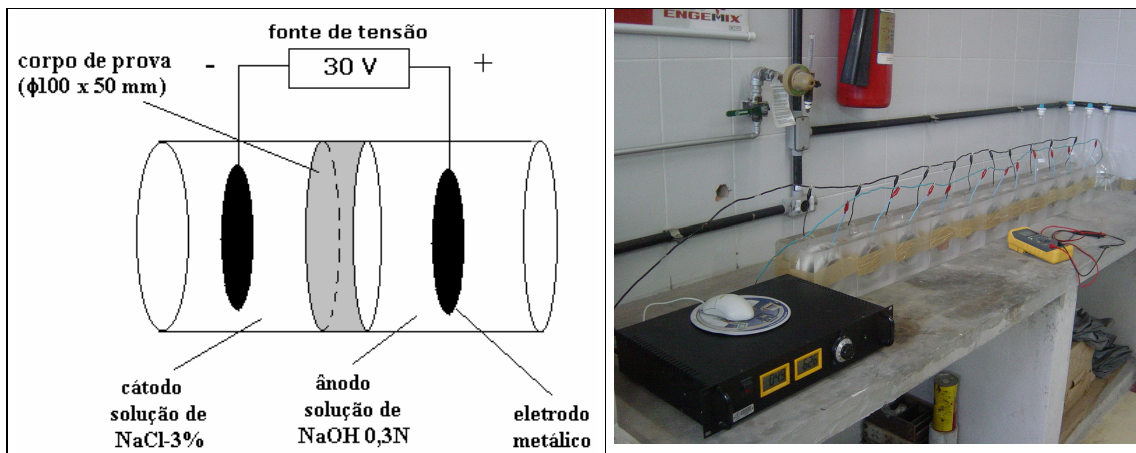


Figura 5 – Ilustração da configuração do ensaio de migração realizado de acordo com LUPING; NILSSON [11].

Ainda de acordo com LUPING; NILSSON [11], as vantagens do método proposto por eles são: 1 - aparelhagem fácil de ser confeccionada em um laboratório comum e a possibilidade de ensaiar vários corpos-de-prova ao mesmo tempo; 2 – o tempo de ensaio é muito menor do que nos ensaios de difusão convencionais, necessitando de alguns dias ou mesmo horas; 3 – o coeficiente de difusão pode ser determinado usando simplesmente uma equação; 4 – pequenas variações na forma e tamanho dos corpos-de-prova são irrelevantes já que as dimensões destes não precisaram ser usadas no desenvolvimento do modelo. Como desvantagem pode-se destacar a falta de consenso sobre o limiar de concentração de cloretos correspondente à mudança de cor do método colorimétrico [12]. Apesar disto, ANDRADE et al. [8] concluíram que a obtenção do coeficiente de difusão usando o método colorimétrico apresentou menor dispersão dos resultados do que usando a determinação do perfil de cloretos. No estudo de ANDRADE et al. [8] foram comparados vários métodos de determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário por meio de ensaio de migração e concluiu-se que este procedimento é o que apresenta melhor reprodutibilidade dos resultados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta os resultados de coeficiente de difusão de cloretos estimado pelo método indicado por LUPING; NILSSON [11].

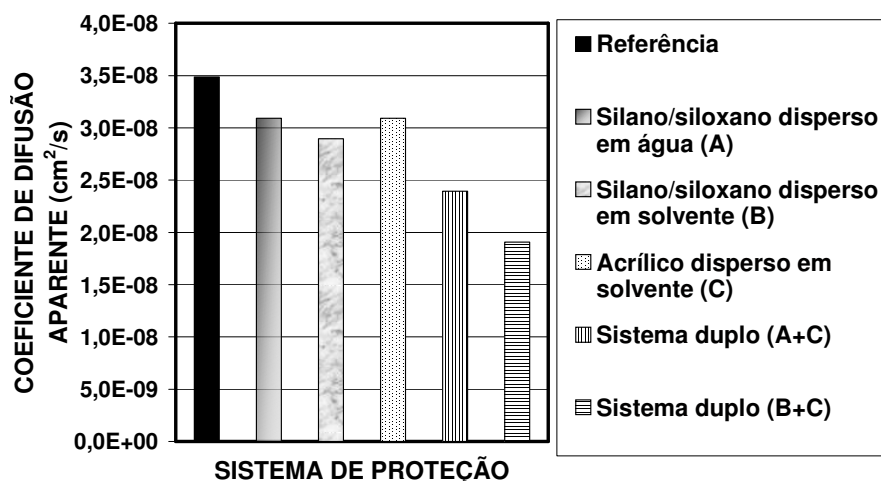


Figura 6 - Coeficiente de difusão versus sistemas de proteção superficial.

Como esperado, verifica-se uma tendência clara de redução do coeficiente de difusão para o caso de aplicação de sistemas de proteção superficial resultando em uma elevação da vida útil da estrutura de concreto armado que venha a ter este tipo de sistema aplicado.

Constata-se que o sistema duplo hidrorrepelente+formador de película é muito mais vantajoso se comparado aos outros sistemas estudados. Este tipo de resultado é quantitativo, podendo-se afirmar que o melhor dos sistemas de proteção reduziu o coeficiente de difusão do concreto em 40 %.

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 7 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 valores de teor de cloretos na superfície do concreto ( $C_s$ ).

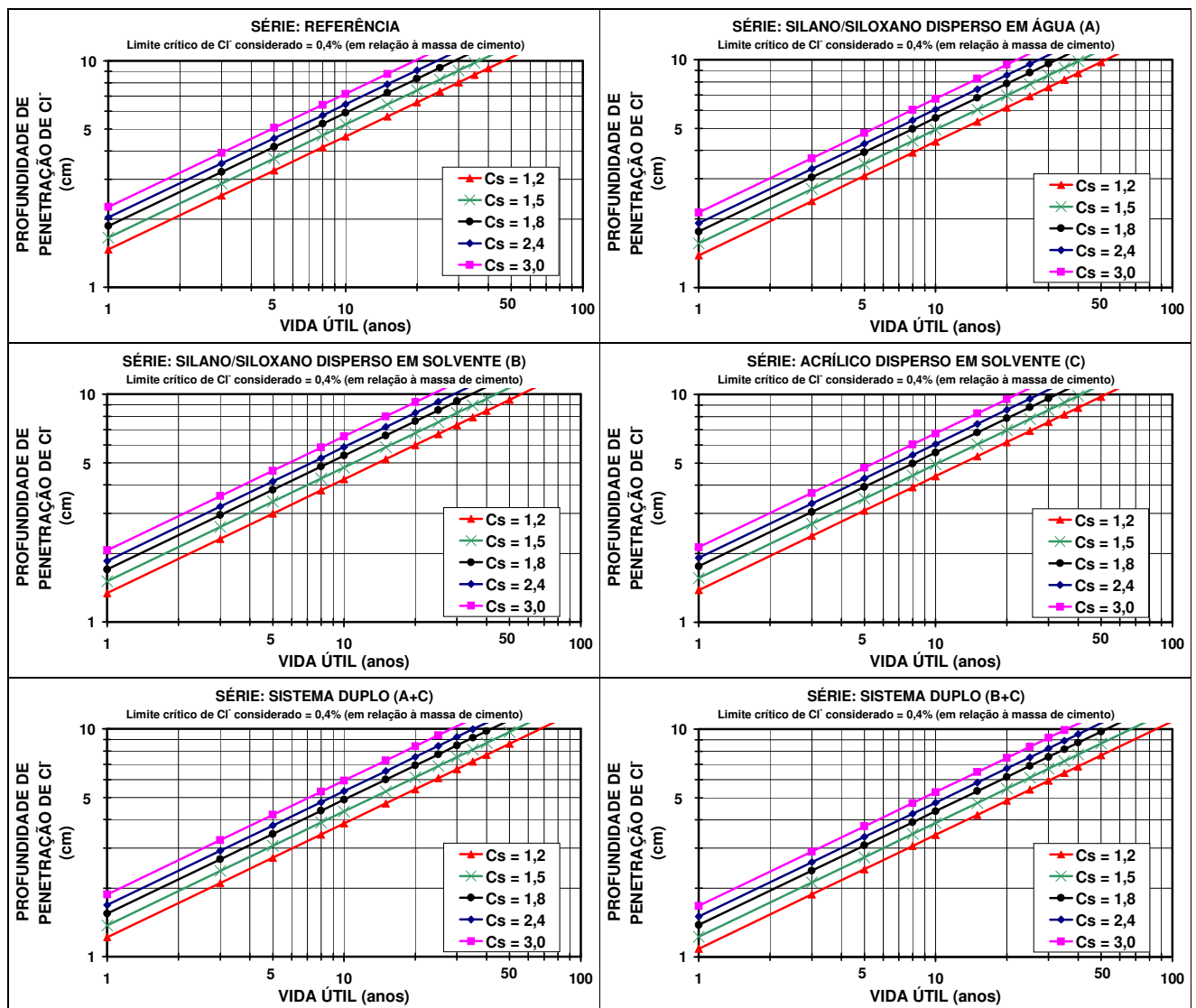


Figura 7 – Tempo de vida útil versus profundidade de penetração de cloretos para cada produto estudado.



O valor do coeficiente de difusão de cloretos não é exatamente uma grandeza que permite que qualquer engenheiro civil tenha uma idéia direta sobre a vantagem do sistema de proteção a ser aplicado. Desse modo, os gráficos da Figura 7 e Figura 8 servem para deixar os resultados do ensaio de difusão de cloretos mais fáceis de serem interpretados, uma vez que permite comparar os diferentes tipos de sistemas de proteção em termos de grandezas muito presentes no dia a dia do profissional ligado à engenharia civil, estas grandezas são a profundidade de penetração de cloretos e o tempo de vida útil.

Para facilitar a comparação direta entre os sistemas de proteção, foi elaborado o gráfico da Figura 8, que compreende todos os sistemas de proteção estudados mais a série de referência. Nesta ilustração está claro que fixado um cobrimento de 5 cm, o tempo de vida útil da estrutura é de 7 anos no caso do concreto sem proteção e pode chegar a 14 anos dependendo do sistema de proteção que venha a ser aplicado na superfície do concreto, aumentando o tempo de vida útil em 100%.

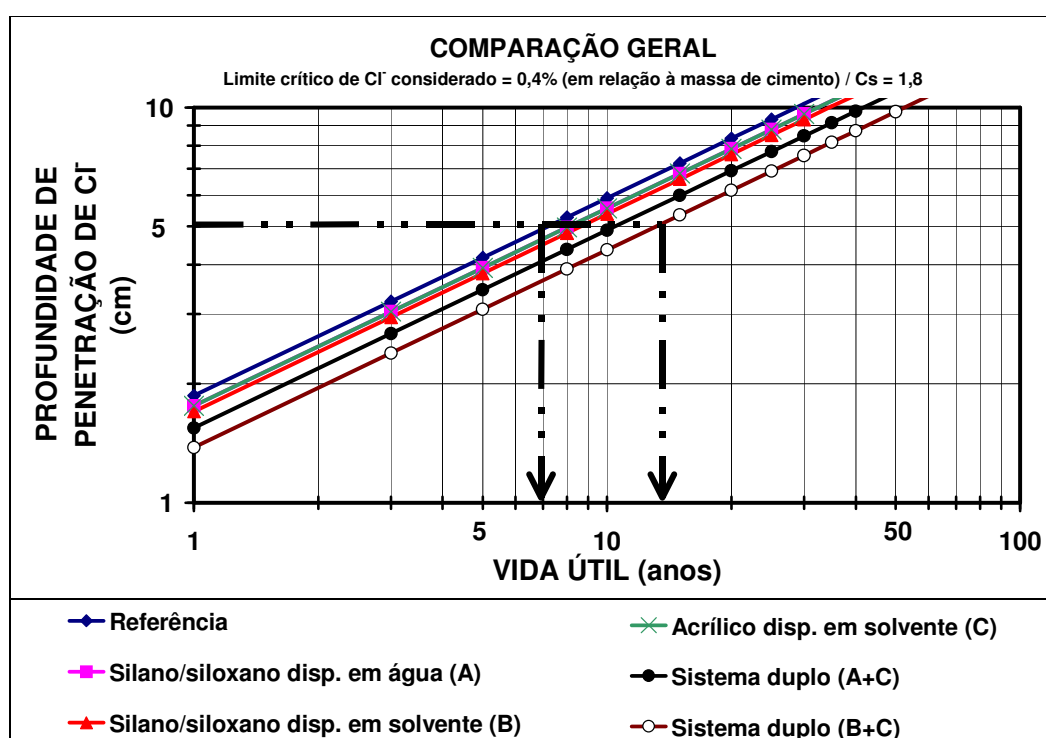


Figura 8 – Comparação dos sistemas de proteção com o concreto de referência.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A determinação do coeficiente de difusão possibilita a comparação quantitativa dos sistemas de proteção superficial estudados e, por isso, precisa ser viabilizada nos ensaios de migração.

A elaboração de ábacos 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 é a forma mais fácil e didática de apresentar resultados de coeficiente de difusão de cloretos. Este tipo de apresentação de resultados é viabilizada com o uso da teoria da difusão desenvolvida por Fick.

Uma das constatações mais importantes deste trabalho foi o fato de que dependendo do sistema de proteção aplicado em uma determinada estrutura de concreto armado pode-se dobrar o tempo de vida útil da mesma.

Os resultados indicaram que os sistemas duplos (hidrofugante de superfície+formador de película) são claramente uma melhor opção para a proteção do concreto armado se comparado com sistemas simples de proteção.

A coerência dos valores obtidos para o coeficiente de difusão com o ensaio segundo o método proposto por LUPING; NILSSON [11] será verificada a partir de resultados produzidos por um método de difusão real no estado não estacionário. Porém este tipo de ensaio ainda está em execução e resultados neste sentido serão apresentados posteriormente.

## 7 AGRADECIMENTOS

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

## 8 REFERÊNCIAS

- [1] HELENE, P. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1993.
- [2] BROOMFIELD, J. P. *Corrosion of steel in concrete – Understanding, investigation and repair*. 1. Ed. Londres: E & FN SPON, 1997.
- [3] MEDEIROS, M. H. F.; GOMES, T. S.; HELENE, P. Hidrofugantes de superfície: Uma opção para proteção de estruturas de concreto armado. 47<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, Pernambuco, p. 313-327, 2005.
- [4] KROPP, J.; HILSDORF, H. K.; GRUBE, H.; ANDRADE, C.; NILSSON, L. Transport mechanisms and definitions. In: *Performance criteria for concrete durability*, 1. edição: Londres, E & FN Spon, p. 4-14, 1995.
- [5] KROPP, J.; Chloride in concrete. In: *Performance criteria for concrete durability*, 1. edição: Londres, E & FN Spon, p. 138-164, 1995.
- [6] MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Migração de íons cloretos no concreto – Influência da consistência, relação água/cimento e consumo de cimento. *Revista Ibracon*. Ano XI, n. 32, p. 53-66, 2003.
- [7] HELENE, H. Durabilidad. Interpretación y evaluación de resultados. In: *Manual de Diagnosis e Intervención en Estructuras de Hormigón Armado*, 1. edição: Barcelona, Col·legi d' Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, p. 87-102, 2000.
- [8] ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; GONZÁLEZ, C. Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests – Part I: Comparison between several methods of calculation. *Materials and Structures*. v. 33, p. 21-28, 2000.
- [9] MEDEIROS, M. H. F.; BRUNO P. MORAES; HELENE, P. Ensaio de migração de íons cloretos na tecnologia de concreto – limitações e cuidados na interpretação. *Congresso Latino Americano de Corrosão (LATINCORR 2006)*. p. 1-12, 2006.
- [10] TRUC, O.; OLLIVIER, J. P.; CARCASSÈS, M. A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test. *Cement and Concrete Research*. v. 30, p. 217-226, 2000.
- [11] LUPING, T.; NILSSON, L. Rapid Determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. *ACI Materials Journal*. v. 89, n. 1, p. 49-53, 1992.
- [12] MECK, E.; SIRIVIVATNANON, V. Field indicator of chloride penetration depth. *Cement and Concrete Research*. V. 33, p. 1113-1117, 2003.