



Concreto com proteção de superfície e exposto à solução de cloretos: Espessura de cobrimento equivalente

M. H. F. Medeiros¹, L. V. Real², V. A. Quarcioni³, P. Helene⁴

¹ Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com

² Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. E-mail: ligiavr@gmail.com

³ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Brasil. E-mail: quarciva@ipt.br

⁴ Universidade de São Paulo (USP), Brasil. E-mail: paulo.helene@concretophd.com.br

RESUMO

O objetivo principal dos testes foi obter o coeficiente de difusão de cloretos e gerar uma previsão de ingresso de cloretos em concretos com e sem superfície tratada, válida para o período de iniciação da corrosão de armaduras e penetração por difusão de íons. A previsão foi baseada no estado não estacionário e alguns resultados indicam que um concreto com esse tipo de proteção pode aumentar o tempo de contaminação em até três vezes. Também foram apresentados dados de cobrimento equivalente dos materiais de proteção indicando que os utilizados neste experimento variaram entre 0,3 e 3,4 cm, ou seja, apresentou grande variação de resultados entre os materiais de proteção testados.

Palavras chaves: concreto armado, ambiente marinho, migração de cloretos, vida útil.

ABSTRACT

The main purpose of the experimental tests was to obtain the chloride diffusion coefficient and generate a chloride ingress prediction for surface treated concrete that could be valid during the initiation stage and transport by ions diffusion. The prediction was based on non steady-state conditions and some of the results indicated that a concrete with this type of protection can extend the chloride ingress up to three times. Data showed in this work indicated the equivalent cover of the surface treatment, ranging between 0.3 and 3.4 cm, showing large variations in results among the surface treatment materials tested.

Keywords: reinforced concrete, marine environment, chloride migration, service life.

RESUMEN

El principal objetivo de las pruebas era obtener el coeficiente de difusión y generar un cloruro de cloruro de entrada en previsión de hormigón con y sin superficie tratada, válido para el período de inicio de la corrosión de penetración de armadura y la difusión de iones. El pronóstico se basa en el estado inestable y algunos resultados indican que un hormigón con este tipo de protección puede aumentar el tiempo de contaminación hasta tres veces. Revestimientos equivalentes también presentados de protección de datos indica que los materiales utilizados en este experimento oscilaron entre 0,3 y 3,4 cm, es decir, los resultados mostraron una gran variación entre la protección de materiales probados.

Palabras clave: concreto armado, ambiente marino, migración de cloruros, vida útil.

Autor de correspondência: Marcelo Medeiros

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUÇÃO

O uso de proteção de superfície no concreto é uma possibilidade de se aumentar a vida útil de estruturas expostas a ambientes marinhos. Esse tipo de proteção inibe a penetração de agentes agressivos por difusão, migração e absorção por capilaridade.

Os materiais de proteção de superfície para concreto podem ser classificados em três grupos: hidrofugantes (repelem a água), bloqueadores de poros (reagem com alguns componentes solúveis do concreto e formam produtos insolúveis) e formadores de película (formam um filme contínuo na superfície do concreto). A Figura 1 ilustra esses três grupos de proteção de superfície.

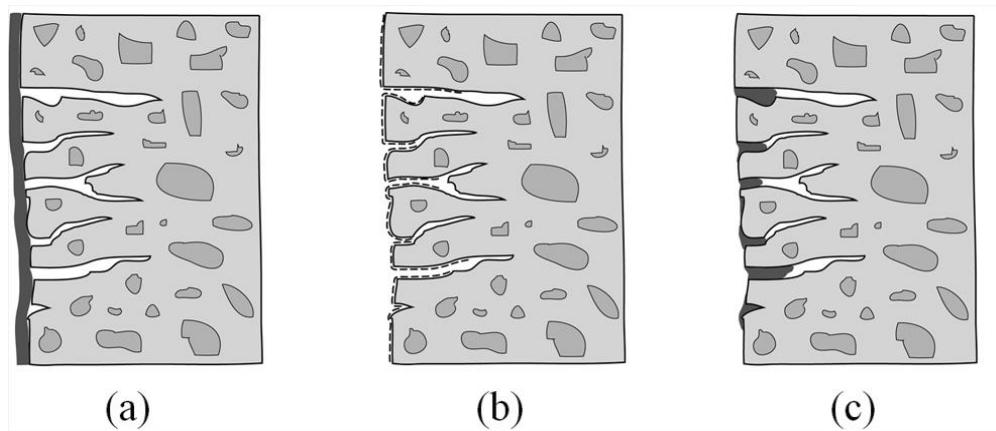


Figura 1. Grupos de tratamento de superfície para concreto: (a) formadores de película (b) bloqueadores de poros (c) hidrofugantes de superfície (adaptado de Keer, 1992).

1.1 Formadores de película:

Os formadores de película apresentam a vantagem de prover uma barreira física na superfície do concreto, que o isola de agentes agressivos do ambiente externo. Esses produtos exigem um substrato homogêneo e liso com poros de dimensão máxima igual a 0,1 mm. Isso significa que são capazes de cobrir fissuras de até 0,1 mm. No entanto, a película rompe se o concreto fissurar depois de ter sido realizada a pintura. Além disso, se o concreto estiver com elevada umidade interna antes da aplicação, a película não permite que o concreto seque. Isso pode deteriorar o filme de proteção, causando a formação de bolhas devido à pressão de vapor da umidade interna. Pelo ponto de vista arquitetônico, esse grupo de tratamentos de superfície modifica a estética da estrutura adicionando brilho ou cor à superfície do concreto, que algumas vezes é desejada e outras não (Helene, 2000). Esse grupo de tratamento de superfície (formador de película) foi intensamente estudado nos últimos quinze anos. Delucchi *et al.* (1998) estudaram a importância dos parâmetros E (módulo de elasticidade) e η (viscosidade) na aderência da película. Seneviratne *et al.* (2000), utilizando análise termo-mecânica, sugeriram que a película de maior sucesso é aquela com capacidade de manter suas propriedades elastoméricas ao longo do período necessário de exposição e sobre uma ampla gama de temperaturas operacionais. Uemoto *et al.* (2001) mostraram a correlação entre o teor em volume de pigmento de tinta e a sua permeabilidade à água. Al-Zahrani *et al.* (2002) mostraram que os sistemas de proteção por formação de película apresentam eficiência de inibição da corrosão acelerada coerente aos resultados obtidos das propriedades físicas, em particular, absorção de água, permeabilidade e penetração de íons cloreto. Medeiros e Helene (2009) afirmam que a determinação do coeficiente de difusão de cloretos permite uma comparação quantitativa dos

sistemas de proteção e, por isso, seu cálculo deve ser viabilizado em ensaios de migração. Os formadores de película são provavelmente os mais utilizados na indústria da construção e essa deve ser a razão para serem extensamente estudados em comparação aos demais sistemas de proteção de superfície.

1.2 Hidrofugantes de superfície:

Agentes repelentes de água ou hidrofugantes sempre resultam de resina de silicone que são quimicamente combinadas com a base de concreto. Atualmente, os materiais mais utilizados são os silanos, siloxanos oligoméricos e a mistura desses dois compostos (Medeiros; Helene, 2008). Quimicamente, os silanos são formados por pequenas moléculas que contém um átomo de silício e os siloxanos são pequenas cadeias de poucos átomos de silício, cujas moléculas contêm grupos alcoxi (orgânicos) ligados ao átomo de silício. Os silanos e siloxanos reagem com os silicatos do concreto, formando uma aderência estável (1997) (Figura 2). Medeiros *et al.* (2009) mostraram que a penetração de agentes hidrofugantes é melhor nas faces de rasadura do que nas de contato com a fôrma, devido a maior permeabilidade do primeiro. Jacob; Hermann (1998), Batista (1998) and Moriconi *et al.* (2002) apresentaram uma ampla revisão bibliográfica sobre agentes hidrofugantes. O uso desses agentes na indústria da construção civil está crescendo em uma taxa interessante e tem sido razoavelmente estudado. No entanto, há alguns itens ainda em estudo, como a influência do mecanismo de penetração de água (sucção por capilaridade e permeabilidade) na eficácia do tratamento com hidrofugantes (Medeiros; Helene, 2008).

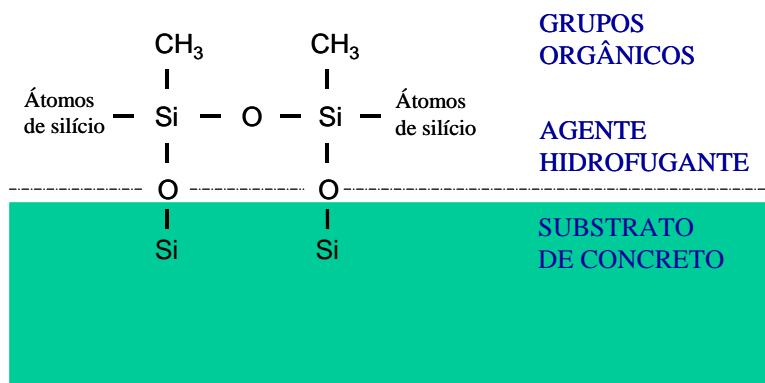


Figura 2. Ligação química do agente hidrofugante com concreto (adaptado de Vries and Polder, 1997).

1.3 Bloqueadores de poros

Bloqueadores de poros, como silicato de sódio, são usados na indústria de cimento para várias aplicações. Por exemplo: como ativador de cimento de escória, como aditivo protetor de fibras vegetais em compósitos de cimento, como endurecedor de superfície para pisos industriais e como sistema de proteção de superfície para concreto (Mehta, Monteiro, 2008; Brough, Atkinson, 2002; Jones, 2002; Toledo *et al.*, 2003; Melo Neto, 2009).

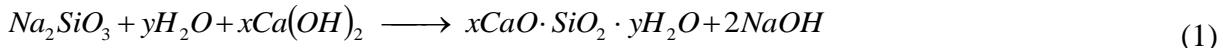
Mesmo que esse grupo de tratamento seja conhecido há vários anos, pouca informação técnica e científica foi publicada sobre este assunto. Por outro lado, muitos produtos desse tipo são comercializados e indicados para a proteção de superfícies de concreto. Thompson *et al.* (1997) explicaram as três teorias de como os silicatos agem para melhorar o desempenho do concreto:

- Precipitação de SiO₂ nos poros;

- Formação de um gel expansivo, similar ao formado na relação álcali silicato, dentro dos poros;
- Reação dos silicatos com o hidróxido de cálcio presente nos poros formando silicato de cálcio hidratado.

A última teoria é a mais aceita atualmente. Desse modo, teoricamente, os bloqueadores de poros são produtos compostos por silicatos, que penetram nos poros superficiais e reagem com a portlandita formando C-S-H. O silicato de sódio é o produto mais usado para esse fim.

De acordo com Thompson *et al.* (1997), a Equação 1 representa o que acontece quando a solução de silicato de sódio penetra nos poros do concreto.



Assim, esse tratamento forma uma camada menos porosa na camada superficial do concreto, modificando a penetração de água no material. Esse tratamento requer que o silicato de sódio reaja com a portlandita $[Ca(OH)_2]$. Portanto, é fácil entender que no concreto carbonatado a reação da Eq. 1 não ocorre, pois o $Ca(OH)_2$ da camada mais externa já reagiu com o CO_2 , formando $CaCO_3$. Isso foi explicado por Kagi e Ren (1995), que afirmaram que uma redução significativa da penetração de água no concreto devido ao tratamento com solução de silicato só é obtida se o concreto for muito novo e se repetidas aplicações forem realizadas para preencher os poros capilares. Outra contribuição de Kagi e Ren (1995) é relacionada com a permeabilidade ao vapor de água do substrato, que não é significativamente afetada pelos silicatos, porque eles não bloqueiam os poros capilares totalmente. Ibrahim *et al.* (1997) concentraram seu trabalho em mensurar o tempo necessário para que as amostras de concreto armado tratadas com silicato de sódio fissurassem por corrosão e concluíram que os resultados foram semelhantes aos das amostras não tratadas (série de referência). No entanto, os resultado de Ibrahim *et al.* (1997) não estão de acordo com os de Thompson *et al.* (1997) sobre a absorção de água. É importante salientar que Ibrahim *et al.* (1997) não informaram a concentração de silicato de sódio que utilizaram no estudo e a utilização de uma baixa concentração pode ter influenciado os seus resultados. Thompson *et al.* (1997) compararam as concentrações de silicato de sódio nos produtos de proteção e o valor em torno de 26% apresentou maior eficiência.

É importante enfatizar que os bloqueadores de poros devem ser aplicados depois que todas as cargas de projeto estejam em atuação e as fissuras e microfissuras ocorrerem. No entanto, os efeitos do ambiente podem causar mais fissuras. Se houver fissuras (grandes o suficiente para serem visíveis) antes da aplicação dos silicatos, é necessário repará-las antes de se realizar o tratamento da superfície. Se houver fissura após o tratamento, elas precisam ser tratadas imediatamente devido à ruptura da camada de baixa porosidade. Esse é o principal problema do tratamento de superfície (hidrofugantes, bloqueadores de poros e formadores de película): eles não absorvem a deformação do substrato de concreto. Isso significa que a camada de proteção formada rompe se o concreto fissurar, causando imediata imperfeição do sistema de proteção.

É importante lembrar que, independentemente da dimensão da fissura, os poros restantes serão menores do que se não houvesse o bloqueador de poros na superfície. Então, o ataque do meio ambiente será isolado na área fissurada e as outras regiões continuarão protegidas.

Em geral, pode-se dizer que são necessárias mais informações sobre a capacidade de proteção de silicatos aplicados em superfícies de concreto armado. Por outro lado, o uso desse tipo de proteção do concreto é amplo e sua aplicação contribui para a elevação da vida útil, uma vez que podem ser aplicados como métodos de prevenção ou de correção.

De modo geral, a abordagem da vida útil tem evoluído significativamente durante os últimos anos (Castro-Borges, Helene, 2007) e isso se deve principalmente à introdução de mais parâmetros quantitativos do que há alguns anos. Esses parâmetros incluem novos conceitos como operacionalidade, funcionalidade, segurança, confiabilidade e durabilidade.

Este trabalho está focado na avaliação de sistemas de tratamento de superfícies de concreto submetidas à exposição a água contaminada com cloreto de sódio e em condições de migração. Desse modo, o principal objetivo deste artigo é indicar uma maneira de estimar a influência dos tratamentos de superfície de concreto na vida útil de uma estrutura de concreto armado exposta à contaminação por cloretos.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Concreto do substrato

O cimento utilizado para a confecção do substrato foi um cimento composto com escória (CPII-E 32). A Tabela 1 apresenta a caracterização física e química deste material.

Tabela 1. Composição química e propriedades físicas do cimento CPII-E 32

(a) Composição química (%)										
Cimento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cal livre	Álcalis totais como Na ₂ O _e *
CPII-E 32	22,80	6,75	2,45	56,40	3,20	1,83	0,12	0,61	0,44	0,52

(b) Propriedades físicas										
Cimento	Massa específica (23°C)	Finura			Tempo de pega			Resistência à compressão – NBR 7215/96 (MPa)		
		(kg/dm ³)	Resíduo na peneira 75µm (%)	Finura Blaine (m ² /kg)	Início (h:min)	Fim (h:min)	3 dias	7 dias	28 dias	
CPII-E 32	3,02	3,6	395	3:40	5:30	15,9	24,0	37,5		

O traço do concreto utilizado está descrito na Tabela 2. Os corpos de prova foram adensados com o auxílio de uma mesa vibratória para assegurar a compactação adequada. O processo de cura adotado consistiu em condicionar as amostras em câmara úmida com U.R. igual a 100% e temperatura de 24°C por 91 dias. Esse período foi adotado para promover um alto nível de hidratação no concreto e eliminar a influência de uma cura adicional que poderia ocorrer durante os ensaios devido à exposição à água, o que poderia afetar a série de referência em relação às séries com superfície tratada.

Tabela 2. Traço do concreto do substrato

Proporção cimento:agregados	Relação água/cimento	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Densidade no estado fresco (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa) – 28 dias
1 : 4,5	0,52	358	644,4	966,6	2155	32

2.2 Materiais de proteção de superfície

Os materiais de tratamento de superfície utilizados neste estudo estão descritos na Tabela 3. A Tabela 4 apresenta o tipo de cura, o número de camadas e o consumo recomendado pelos fabricantes de cada material. Vale salientar que no experimento existem representantes dos três grupos de sistemas de proteção abordados neste trabalho.

Tabela 3. Características dos materiais de proteção de superfície

Produto	Tipo de sistema	Densidade (g/cm ³)	Viscosidade CPs (temperatura = 20°C)	Tempo de secagem (h)
Silano/siloxano	Hidrofugante de superfície	1,0	10	2 - 6
Acrílico	Formador de película	0,9	45	1
Poliuretano	Formador de película	0,95	32	8
Silicato de sódio	Bloqueador de poros	1,3	20	2
Silano/siloxano + Acrílico	Duplo	---	---	---

Tabela 4. Tipo de cura e consumo recomendado pelos fabricantes

Produto	Consumo (g/m ² de revestimento)	Número de camadas	Tipo de cura
Silano/siloxano disperse em água	300	1	Evaporação da água + reação
Acrílico disperse em solvente	150	2	Secagem
Poliuretano	180	2	Reação química
Silicato de sódio	200	2	Reação química
Silano/siloxano + Acrílico	---	---	---

2.3 Estimativa do coeficiente de difusão por ensaio de migração

O método utilizado para estimar o coeficiente de difusão de cloretos foi baseado no procedimento descrito por Luping & Nilsson (1992), que consiste na medição da profundidade de penetração de cloretos livres nas fatias de concreto fraturadas no sentido do fluxo de cloretos, utilizando aspersão de uma solução aquosa de 0,1 M de AgNO₃ (Andrade *et al.*, 1999) e na aplicação da Equação 2. Como o método se baseia na profundidade de penetração de cloretos livres, deve-se destacar que os cloretos fixos são ignorados e que existe a possibilidade de liberação de uma parcela dos cloretos fixos, tornando-se livres. Isso faz o método gerar constatações, de certa forma, contra a segurança, porém, esta prática foi implementada pela facilidade de ensaio e pelo fato de que no momento da avaliação é a penetração dos cloretos livres que efetivamente influencia a despassivação do aço.

$$D = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - ax_d^b}{t} \quad (2)$$

Onde: D é o coeficiente de difusão (cm^2/s), R é a constante dos gases (8,31 J/molK), T é a temperatura (298 K), z é a valência do íon (para cloretos é igual a -1), F é a constante de Faraday (96,5 J/Vmol), E é o campo elétrico (-600V/m), x_d é a profundidade de penetração de cloretos (m) e t é o tempo de ensaio. Para E = -600V/m e T = 298 K, a = 1,061 e b = 0,589. O modelo é baseado no estado não estacionário de transporte de íons cloretos.

Foram extraídas três fatias centrais de 50 mm de cada corpo de prova cilíndrico ($\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$). Em seguida, as amostras foram mantidas em uma estufa a 60°C até se obter massa constante. Então, os materiais de proteção de superfície foram aplicados sobre as superfícies circulares dos corpos de prova. Sete dias após a aplicação dos tratamentos, os corpos de prova foram saturados conforme indica o procedimento da ASTM C 1202/12 (2012). Em todos os casos foram seguidas as orientações dos fabricantes quanto à quantidade de material a ser aplicada.

A fatia de 50 mm de espessura foi posicionada entre duas células de acrílico. Uma célula foi preenchida com solução 0,3 N NaOH e a outra com solução de 3,0% de NaCl. As células foram conectadas a uma fonte de tensão com diferença de potencial de 30 V e mantidas nessa condição durante 30h. O esquema gráfico do ensaio acelerado de migração de cloretos está apresentado na Figura 3.

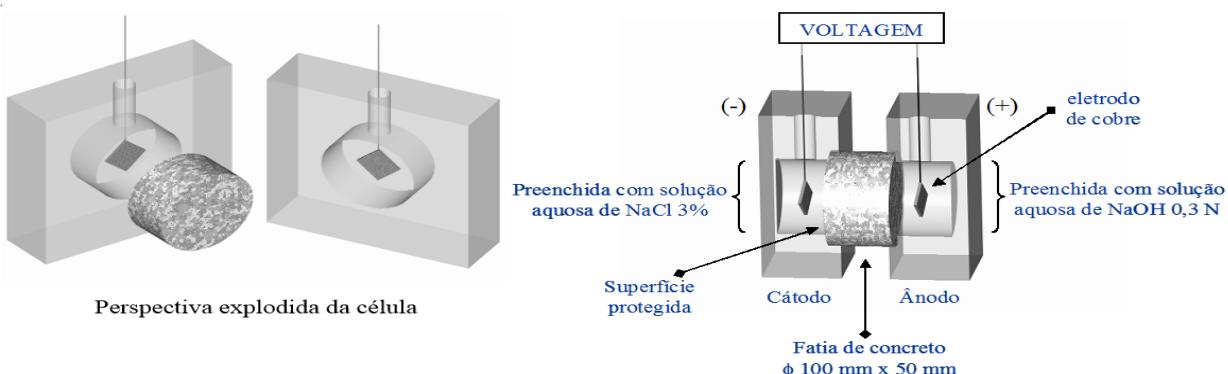


Figura 3. Arranjo experimental do ensaio de migração de cloretos.

Em seguida, as fatias foram fraturadas e a profundidade de penetração de cloretos livres foi determinada conforme ilustra a Figura 4. Andrade *et al.* (2000), comparando os métodos para determinação do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário utilizando o ensaio de migração acelerada, indicou que o ensaio preconizado por Nilsson & Luping (1992) apresentou uma melhor reproduzibilidade de resultados, justificando assim o método de ensaio apresentado neste artigo.



Figura 4. Fatia de corpos de prova após ruptura e aplicação de solução aquosa de 0,1 M de AgNO_3 .

3. RESULTADOS

A Figura 5 apresenta os resultados dos coeficientes de difusão determinados pelo método de Luping & Nilsson (1992) para concreto saturado, conforme o experimento foi realizado. Portanto, a movimentação de íons cloreto causada pelo efeito da absorção ou permeabilidade não existiu.

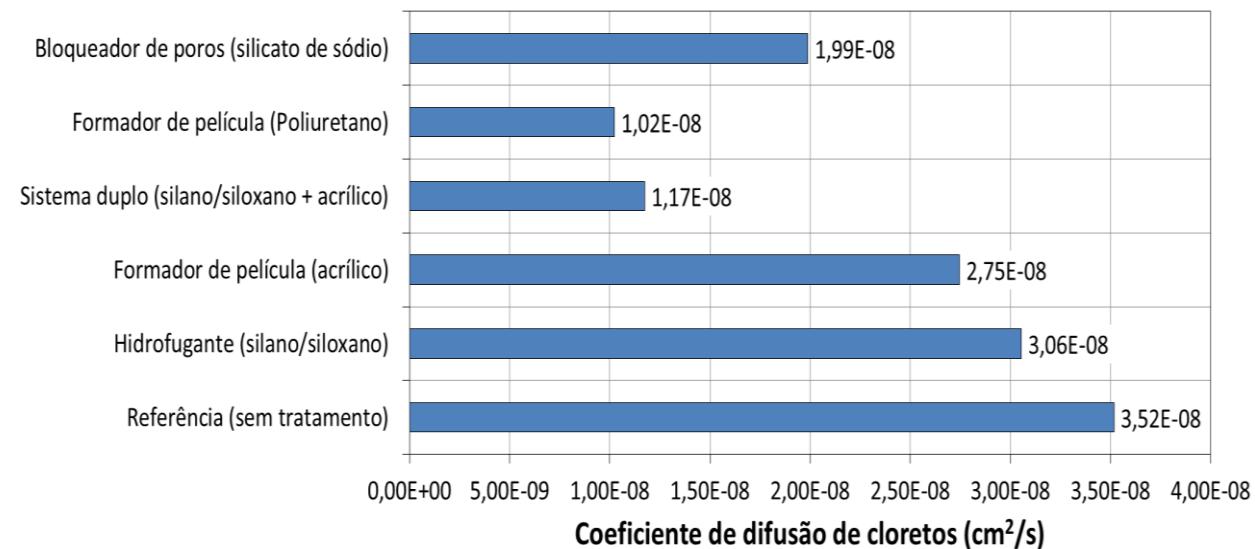


Figura 5. Coeficiente de difusão de cloretos para concretos com superfícies tratadas e não tratadas.

De maneira geral, os coeficientes de difusão das superfícies tratadas claramente reduziram. Essa redução aumenta a vida de serviço da estrutura quando exposta a um ambiente marinho. No entanto, houve uma grande diferença na eficiência, dependendo do tratamento utilizado.

É importante enfatizar que, exceto pelo revestimento de poliuretano, o sistema duplo (hidrofugante de superfície + revestimento acrílico) é muito mais vantajoso quando comparado com os sistemas únicos devido à barreira dupla formada nesta categoria de proteção. Isso ocorre porque, quando o íon cloreto passa a camada de acabamento acrílico, existe ainda o tratamento de silano/siloxano, que tem alguma capacidade para inibir a penetração de íons cloreto para o interior do concreto.

Em termos de funcionamento, os formadores de película de qualidade são mais eficientes porque agem como uma camada de separação da peça de concreto do contato com o meio externo. Este é o caso do poliuretano indicado na Figura 5. Por outro lado, os sistemas de poros abertos como os silicatos e hidrofugantes tendem a apresentar menor capacidade de proteção acompanhado de películas de baixa qualidade como é o caso do acrílico usado neste estudo.

A Tabela 5 mostra a taxa de redução dos coeficientes de difusão de cloretos de cada tratamento. O sistema duplo reduziu o coeficiente de difusão de cloretos em 67% em relação ao substrato de referência. O revestimento de poliuretano foi a proteção mais eficaz, reduzindo o coeficiente em 71%. É importante salientar que este resultado não pode ser universalmente considerado porque a eficiência do tratamento não depende só do tipo de resina que o compõe. Isto está de acordo com Vipulanandan e Liu (2005), que afirmam que para um tipo específico de resina a eficácia para reduzir a penetração de cloretos pode ser altamente distinta.

O silano/siloxano reduziu apenas em 13%, indicando que este material não exerce grande influência na penetração de cloretos. Porém, vale salientar que de acordo com Medeiros e Helene (2009), e Medeiros e Helene (2008), agentes hidrofóbicos reduzem significativamente a sortividade

do concreto, que é o mecanismo principal de proteção desse tipo de tratamento. Desse modo, quando se especifica um hidrofugante de superfície, o foco está em reduzir a sucção capilar, que pode transportar água contaminada por cloreto para o interior do concreto. Então, o ensaio de penetração de cloreto em condições de saturação do concreto e transporte de cloreto por migração não testa ou simula o ponto forte de atuação deste produto, embora tenha sido registrado 13% de redução no coeficiente de difusão de cloreto para este material. Medeiros *et al.* (2015) mostram em seu trabalho o uso da técnica de goniometria para testar a capacidade de hidrofugantes em aumentar o ângulo de contato da água com o substrato tratado, reduzindo a afinidade com a água e conferindo hidrorrepelência ao concreto.

Tabela 5. Porcentagem de redução de penetração de cloreto para cada sistema de proteção

Sistema de proteção	Taxa de redução do coeficiente de difusão de cloreto (%)
Hidrofugantes (Silano/siloxano)	13
Formadores de película (Acrílico)	22
Sistema duplo (silano/siloxano + acrílico)	67
Formadores de película (Poliuretano)	71
Bloqueadores de poros (Silicato de sódio)	43

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A previsão de vida útil de estruturas de concreto armado é uma área que necessita de avanços. Atualmente, existem muitos modelos desenvolvidos, no entanto, suas validações ainda precisam ser mais estudadas e divulgadas.

Neste trabalho, é apresentada uma previsão do ingresso de cloreto baseado no estado não estacionário. O método proposto permite correlacionar o tempo de ingresso de cloreto a partir do cobrimento do concreto, o que pode ser uma ferramenta útil para conceber estruturas de concreto armado submetidas à condições de transporte de cloreto por migração e por difusão. A sua extração a outros mecanismos de penetração, tais como absorção, convecção, ou uma mistura destes deve ser cuidadosa. É necessário realizar mais pesquisas sobre esses fenômenos para desenvolver essas considerações. Embora o modelo empregado ainda precise de melhorias, como a aplicação do fator de idade (aging factor) e a variação do Cs ao longo do tempo, sua aplicação é válida porque permite uma comparação quantitativa entre os diferentes materiais e produz uma estimativa de tempo de ingresso dos cloreto por difusão na rede de poros do concreto.

O método tem origem na segunda lei de Fick (Equação 3), cujo desenvolvimento está apresentado nas Equações de 3 a 5.

Helene (2000) também apresentou as Equações 4 e 5 baseadas na segunda lei de Fick. Estas equações foram utilizadas neste estudo para analisar os resultados dos coeficientes de difusão, permitindo a construção de um gráfico que correlaciona a profundidade de penetração de cloreto com o tempo (Figura 6).

$$\frac{C_{Cl} - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{e_{Cl}}{2\sqrt{Def_{Cl} t}} \right) \quad (3)$$

Onde: C_{cl} = teor de cloretos na profundidade e_{cl} , no tempo t (C_{cl} em %); C_s = teor de cloretos na superfície do componente estrutural de concreto, admitido como constante (%); C_0 = teor inicial de cloretos no interior do componente estrutural de concreto; D_{cl} = Coeficiente de difusão de cloretos (cm^2/s); t = duração do tempo considerado (s); e_{cl} = profundidade atingida pela frente de cloretos com teor de cloretos igual a C_{cl} (cm).

Considerando z uma incógnita qualquer (arbitrado a expressão dentro da função erf) e isolando e_{cl} , obtém-se a Equação 4.

$$z = \frac{e_{cl}}{2\sqrt{D_{cl} t}} \quad \Rightarrow \quad e_{cl} = 2z\sqrt{D_{cl} t} \quad (4)$$

Incluindo z na Equação 3 e isolando erf(z), chega-se na Equação 5.

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{C_{cl} - C_0}{C_s - C_0} \quad (5)$$

Na construção da Figura 6 considerou-se $C_0 = 0$, ou seja, o concreto não tinha cloreto algum no momento da moldagem.

Fixando um valor para C_s e considerando C_{cl} igual ao limite crítico para a despassivação das armaduras por corrosão causada por ataque por cloretos, obtém-se a função erro de Gauss [erf(z)]. Consultando tabelas que relacionam erf(z) com z , obtém-se o valor de z . Substituindo este valor de z e o coeficiente de difusão de cloretos na Equação 4, obtém-se uma equação que relaciona a profundidade em que o valor limite (para a despassivação das armaduras) é atingido com o tempo necessário para que isto ocorra. Este foi o raciocínio seguido para a elaboração da Figura 6.

É importante salientar que a previsão de tempo de ingresso de cloretos presente neste artigo é válida somente nas condições a seguir:

- A estrutura de concreto armado está no início da sua vida útil (a partir do período de iniciação);
- O agente de degradação mais rápido é o ataque por cloretos;
- Não há fatores externos accidentais que tenham afetado as propriedades do cobrimento de concreto;
- O teor limite de cloretos para a despassivação do aço é 0,4% em relação a massa de cimento e foi o escolhido porque é o especificado em alguns documentos técnicos importantes (Boletin 152, 1992; BS 8110-1, 1997; EN 206-Part 1, 2007).

É importante dar ênfase ao fato do coeficiente de difusão ter sido obtido por um processo de migração (por aplicação de uma ddp) em estado não estacionário, sendo, portanto, um parâmetro bastante diferente do transporte real de cloretos no concreto, o que restringe e limita sua aplicação direta em um modelo de previsão de vida útil. Porém, o uso de resultados comparativos dentro do experimento realizado é possível e coerente.

Apesar dos ciclos de variação da concentração de cloreto na superfície de concreto (De Coss et al., 1998), uma restrição deste trabalho foi a fixação da concentração de cloretos na superfície (C_s) igual a 0,9%, que foi citado por Helene (1993) como adequado para concretos entre 20 e 30 MPa, relação água/cimento entre 0,48 e 0,68 e consumo de cimento entre 280 e 400 kg/m³, condição em que o concreto utilizado no experimento deste artigo se enquadra.

Outra simplificação do método é só considerar o processo de difusão na previsão de penetração de cloretos, desse modo, as previsões realizadas são mais adequadas para um concreto submerso em água do mar do que em estruturas submetidas a condições de proximidade com o mar.

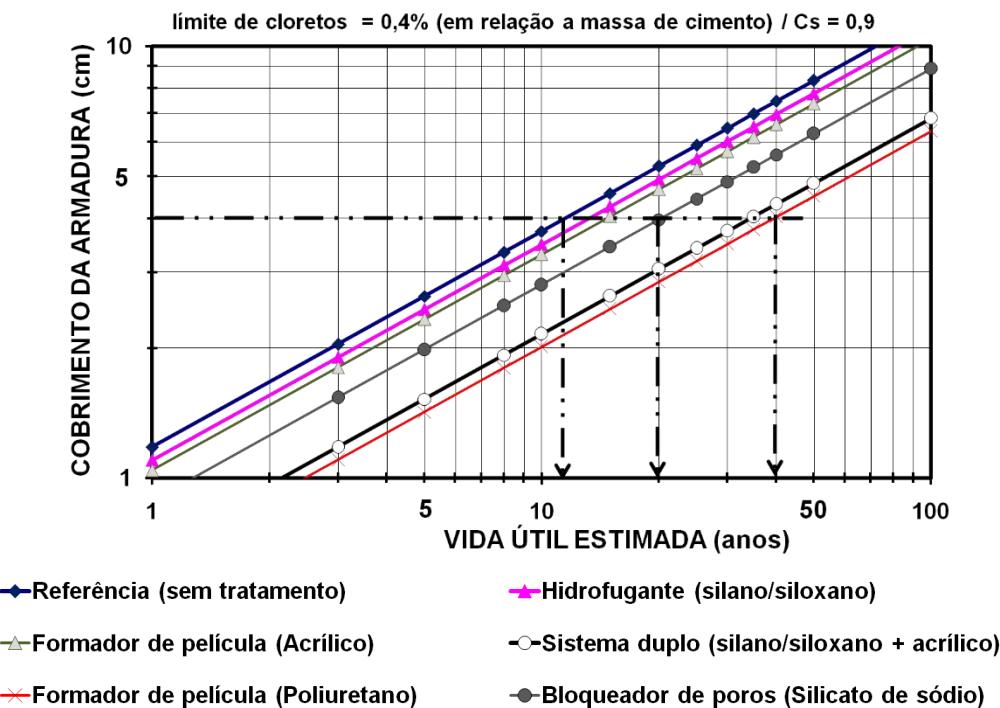


Figura 6. Relação entre a vida útil estimada e o cobrimento de concreto relativo à penetração de cloretos (profundidade onde 0,4% em massa de cimento foi atingido).

É possível observar na Figura 6 que para as estruturas com cobrimento igual a 4 cm, a vida útil estimada é em torno de 12 anos para o ingresso de cloretos por difusão, podendo alcançar até 40 anos dependendo do sistema de proteção aplicado (pode haver aumento no tempo de até três vezes). É importante enfatizar que a proteção de poliuretano (formador de película) e os sistemas duplos apresentaram melhores resultados do que os outros tratamentos testados neste estudo.

É importante relatar que Castellote e Andrade enfatizam que vários modelos de previsão de vida útil foram analisados em diferentes workshops dentro da RILEM TC 178-TMC e que inúmeras incertezas permanecem, o que impede, no atual estado da arte, de fazer exatas previsões em longo prazo baseado em experimentos de curta duração (Castellote, Andrade, 2006). Alguns anos se passaram desde 2006, porém, considera-se que tais incertezas ainda existem. Desse modo, as previsões de vida útil realizadas neste trabalho não devem ser interpretadas como valores precisos e absolutos, porque a metodologia tem elementos de contorno como ocorre em qualquer modelo de previsão de vida útil.

Uma boa maneira de pensar em termos de proteção de superfície foi proposta em Medeiros e Helene (2009), onde a proteção é representada em cobrimento equivalente, que consiste em quantos cm de cobertura de concreto é igual a um revestimento de um determinado sistema de proteção. Ou seja, se uma peça de concreto é protegida com um sistema de proteção que tem um cobrimento equivalente X cm, isso significa que é como se ela tivesse um acréscimo de cobrimento de X cm, desde que o sistema de proteção tenha suas propriedades de desempenho mantidas ao longo do tempo, que na prática só é obtido prevendo renovação e manutenção periódica da proteção de

superfície. Exemplificando: se o concreto armado for protegido com o formador de película base acrílico, é como se o cobrimento da armadura existente fosse acrescido em 5 mm.

A Figura 7 mostra o cobrimento equivalente para cada tratamento estudado. Esses dados estão relacionados com o concreto do substrato utilizado neste estudo.

Este tipo de raciocínio pode ser o caminho para fundamentar a aplicação de sistemas de proteção de superfície em condições em que a estrutura de concreto armado já esteja concluída e com espessura de cobrimento abaixo do especificado por norma. Este tipo de situação pode ser gerado nos casos de estruturas construídas com baixo controle de qualidade e em casos de estruturas construídas e não concluídas por motivos como a falência da construtora.

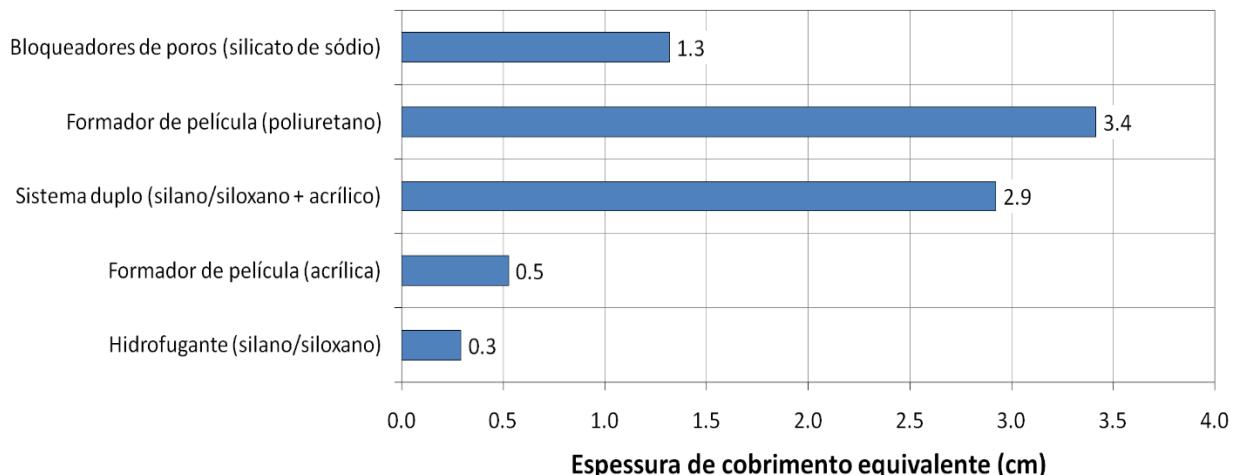


Figura 7: Espessura do cobrimento equivalente para cada sistema de proteção relacionado ao concreto do substrato – $C_s = 0,9\%$ (coeficiente de difusão de cloretos pelo método de Luping e Nilsson, 1992).

5. CONCLUSÕES

As conclusões aqui expressas se aplicam às características deste trabalho e dos materiais empregados. Qualquer extração para outros materiais ou circunstâncias deve ser realizada cuidadosamente.

A previsão de vida útil para o estágio de iniciação da corrosão do concreto com tratamentos de superfície foi obtida no estado de migração não estacionária e será válida apenas na fase de iniciação mencionada.

A contaminação por cloretos em uma estrutura de concreto armado exposto a um ambiente marinho é uma das maneiras de degradação mais difíceis de corrigir. A penetração de íons no concreto ocorre por difusão, por migração ou por penetração de água contaminada por cloretos. A partir da pesquisa aqui apresentada, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- A proteção de superfície de concreto pode ser um meio eficiente de inibição da penetração de cloretos em concreto. Consequentemente, os sistemas de proteção devem ser usados para aumentar a vida útil do concreto armado em ambientes influenciados pela maresia, como prédios em cidades costeiras.
- Os resultados indicaram que o sistema de proteção mais eficiente pode reduzir o coeficiente de difusão de cloretos no concreto armado em 71%.

- É importante salientar que os resultados indicaram que a utilização de um sistema de proteção de elevada eficiência pode aumentar mais de três vezes a vida útil de uma estrutura de concreto armado. No entanto, esse nível de aumento na vida útil está relacionado às condições utilizadas neste trabalho e diferentes resultados podem ser obtidos em outras condições de ensaios.
- Gráficos (como a Figura 6) que relacionam a vida útil estimada com a profundidade em que a concentração de cloretos atingiu o limite de despassivação do aço são os meios mais eficazes e ilustrativos de apresentar os resultados dos coeficientes de difusão de cloretos.
- Os resultados deste artigo indicam que o hidrofugante de superfície reduziu em 13% a penetração de cloreto no concreto. No entanto, é importante ressaltar que este tratamento mostrou a menor capacidade de reduzir o coeficiente de difusão de cloretos.
- O revestimento de poliuretano e sistema de dupla proteção foram os tratamentos de superfície que apresentaram a melhor eficiência na redução da penetração de cloretos (71% e 67% de redução do coeficiente de difusão de cloretos, respectivamente).

Este trabalho propõe uma forma interessante de interpretar os resultados do coeficiente de difusão de cloretos. A possibilidade de fazer previsões de vida útil, facilidade de interpretação e correlação entre o cobrimento de concreto e a vida útil estimada são as vantagens deste método. Dessa forma, o procedimento de interpretação pode se tornar uma ferramenta importante para prever a vida útil das estruturas de concreto armado. No entanto, é importante observar que essa é uma aplicação baseada apenas no coeficiente de difusão obtido por um ensaio de migração de cloretos. Como considerar outros fenômenos ainda é desconhecido e precisa ser mais pesquisado para aprimorar a aproximação das estimativas de previsão de vida útil com a realidade.

Outro ponto positivo do trabalho é a conversão da capacidade de proteção do sistema de proteção com o cobrimento equivalente em concreto do substrato. Este tipo de abordagem possibilita inferir qual a espessura de cobrimento adicional que um dado sistema de proteção equivale. Porém, não se pode deixar de ressaltar que este tipo de conversão só é válido se for garantido que o material de proteção de superfície mantém suas propriedades de proteção ao longo do tempo de vida útil da estrutura a ser protegida e isso só ocorre se a renovação do sistema for sendo realizada periodicamente.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Escola Politécnica de São Paulo (POLI-USP), à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por tornar esse estudo possível e apoiá-lo financeiramente. Os autores também agradecem à arquiteta Dominique E. Giordano Gonzalez pelas ilustrações.

7. REFERÊNCIAS

- Al-Zahrani, M. M., Al-Dulaijan, S. U., Ibrahim, M., Saricimen, H., Sharif, F. M. (2002), “*Effect of waterproofing coatings on steel reinforcement corrosion and physical properties of concrete*”, Cement and Concrete Composites, v. 24, pp. 127-137.
- Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., González, C. (1999), “*Relation between colorimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1201-91*”, Cement and Concrete Research, v. 29, pp. 417–21.

- Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C., González, C. (2000), “*Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests – part I: comparison between several methods of calculation*”, Materials Structures, v. 33, pp. 21–28.
- ASTM C 1202 – 2012 Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration. American Society for Testing and Materials, USA, 2012.
- Batista, M. (1998), “*Siloxane and silane—perfects hydrophobics agents for all situations*”, Recuperar Magazine, v. 23, pp. 14–19.
- Boletin 152 Durability of concrete structures. Comitê Euro-Internacional Du Béton. CEB 152: Europe, 1992.
- Brough, A. R., Atkinson, A. (2002), “*Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars - Part I. Strength, hydration and microstructure*”, Cement and Concrete Research, v. 32, pp. 865–879.
- BS 8110-1 Structural use of concrete. Code of practice for design and construction. British Standards Institution, England, 1997.
- Castellote, M., Andrade, C. (2006), “*Round-Robin test on methods for determining chloride transport parameters in concrete*”, Materials and Structures, v. 39, pp. 955–90.
- Castro-Borges, P., Helene, P. (2007), “*Service life concepts of reinforced concrete structures - New approach*” in: Proceedings of the Corrosion of Infrastructure, 3º, p. 9-14.
- De Coss, R., Murrieta, G., Castro, P. (1998), “*Effect of weather cycles on chloride diffusion in porous concrete*” in: P. Castro, O. Troconis, C. Andrade (Eds.), Rehabilitation of Corrosion Damaged Infrastructure, NACE International, Houston: TX (USA), pp. 285-293.
- Delucchi, M., Barbucci, A., Cerisola, G. (1998), “*Crack-bridging ability and liquid water permeability of protective coatings for concrete*”, Progress in Organic Coatings, v. 33, pp. 76-82.
- EN-206-Part 1 Concrete – Especification, performance, production and conformity. European Committee for Standardization, Europe, 2007.
- Ibrahim, M., Al-Gahtani, A. S., Maslehuddin, M., Almusallam, A. A. (1997), “*Effectiveness of concrete surface treatment materials in reducing chloride-induced reinforcement corrosion*”, Construction and Building Materials, v. 11, n. 7-8, pp. 443-451.
- Gjorv, O. E. (2014), “*Durability design of concrete structures in service environments*” (New York, EUA: CRC Press), 2st edn., pp. 249.
- Helene, P. (1993), “Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado”, Tese de Livre Docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 231.
- Helene, P. (2000), “*Durabilidad. Interpretación y evaluación de resultados. Manual de Diagnosis e Intervención en Estructuras de Hormigón Armado*” (Barcelona, Espanha: Col·legi d’Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona), 1th edn., p. 87-102.
- Jacob, T., Hermann, K. (1998), “*Protection of concrete surfaces: hydrophobic impregnations*”, Construcción y Tecnología, pp. 18–23.
- Jones, J. W. (2002), “Method of Hardening and Polishing concrete floors, walls, and the Like”, United States Patents. Patent number: US 6,454,632 B1. Sep. 24, 2002.
- Kagi, D. A., Ren, K. B. (1995), “*Reduction of water absorption in silicate treated concrete by post-treatment with cationic surfactants*”, Building and Environment, v. 30, n. 2, p. 237-243.
- Bentur, A., Diamond, S., Berke, N. S. (1997), “*Steel Corrosion in Concrete – Fundamentals and Civil Engineering Practice*” (London, Inglaterra: E&FN SPON), 1th edn., pp. 197.
- Luping, T., Nilsson, L. (1992), “*Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field*”, ACI Materials Journal, v. 89, n. 1, pp. 49–53.
- Mariconi, G., Tittarelli, F., Corinaldesi, V. (2002), “*Review of silicone-based hydrophobic treatment and admixtures for concrete*”, Indian Concrete Journal, v. 76, n. 10, pp. 637-642.

- Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2009), "Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption", Construction and Building Materials, v. 23, pp. 1476-1484.
- Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2008), "Efficacy of Surface Hydrophobic Agents in Reducing Water and Chloride Ion Penetration in Concrete", Materials and Structures, v. 41, n. 1, pp. 59-71.
- Medeiros, M. H. F., Hoppe Filho, J., Helene, P. (2009), "Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions", Marine Structures, v. 22, pp. 128-141.
- Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2009), "Durability and protection of reinforced concrete", Techne, v. 151, pp. 50-54.
- Medeiros, M. H. F., Pereira, E., Figura, A. S., Tissot, F. M., Artioli, K. A. (2015), "Avaliação da eficiência de sistemas de proteção de superfície para concreto: absorção de água, migração de cloretos e ângulo de contato", Matéria (UFRJ), v. 20, pp. 145-159.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. (2008), "Concrete: Structure, Properties, and Materials", (New Jersey, EUA: Prentice Hall), 3th edn.
- Melo Neto, A. A., Cincotto, M. A., Repette, W. L. (2009), "Drying autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement", Cement and Concrete Research, v. 38, pp. 565-574.
- Seneviratne, A. M., Sergi, G., Page, C. L. (2000), "Performance characteristics of surface coatings applied to concrete for control of reinforcement corrosion", Construction and Building Materials, v. 14, pp. 55-59.
- Thompson, J. L., Silsbee, M. R., Gill, P. M., Scheetz, B. E. (1997), "Characterization of silicate sealers on concrete", Cement and Concrete Research, v. 27, n. 10, pp. 1561-1567.
- Tolêdo Filho, R. D., Ghavami, K., George, L. (2003), "England and Karen Scrivener Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability", Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 2, pp. 185-196.
- Uemoto, K. L., Agopyan, V., Vittorino, F. (2001), "Concrete protection using acrylic latex paint: Effect of the pigment volume content on water permeability", Materials Structures, v. 34, pp. 172-177.
- Vipulanandan, C., Liu, J. (2005), "Performance of polyurethane-coated concrete in sewer environment", Cement and Concrete Research, v. 35, pp. 1754–63.
- Vries, J., Polder, R. B. (1997), "Hydrophobic treatment of concrete", Construction and Building Materials, v. 11, n. 4, pp. 259-265.