

## Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos

*Service life predictions for high performance reinforced concrete with metakaolin and silica fume in marine environment*

### **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Departamento de Engenharia Civil,  
Universidade Federal do Paraná, Brasil  
medeiros.ufpr@gmail.com

### **Andressa Gobbi**

Departamento de Engenharia Civil,  
Universidade Federal do Paraná, Brasil  
andressagobbi@yahoo.com.br

### **J. A. Groenwold**

Departamento de Engenharia Civil,  
Universidade Federal do Paraná, Brasil  
nine.tjes@uol.com.br

### **Paulo Helene**

Departamento de Engenharia Civil,  
Escola Politécnica,  
Universidade de São Paulo, Brasil.  
paulo.helene@poli.usp.br

### **Resumo**

Em ambientes de atmosfera marinha, o grande problema, quanto à durabilidade do concreto armado, é o ataque por íons cloreto. A previsão do tempo de vida útil, em ambientes desse tipo, é algo ainda em estudo e sem consenso no meio técnico e científico. Esse trabalho avança nesse sentido, propondo um caminho para interpretar dados de difusão de cloretos no concreto armado de alta resistência contendo adição de metacaulim e de sílica ativa. Os resultados mostraram que o metacaulim e a sílica ativa aumentaram a vida útil de serviço em ambientes contaminados com cloretos em 240% e 440%, respectivamente. Isto evidencia a eficiência da adição de metacaulim e da sílica ativa para a produção de concretos mais duráveis em regiões com grande influência de maresia.

**Palavras-chave:** Concreto, adição, metacaulim, sílica ativa, durabilidade, ambiente marinho.

### **Abstract**

*In marine environments, the big problem related to concrete durability is a chloride ion attack. Service life prediction in this type of environment is still without consensus by technical and scientific researchers. This work presents advances by proposing a way to interpret data from chloride ions diffusion in high-strength concrete containing metakaolin and silica fume as admixtures. The results showed that metakaolin and silica fume increased service life in a marine environment by 240 per cent and 440 per cent, respectively. This evidenced the high efficiency of the metakaolin and silica fume admixtures as a way of producing more durable concretes for regions highly influenced by saltwater spray.*

**Keywords:** Concrete, admixture, metakaolin, silica fume, durability, marine environment.

## 1. Introdução

O concreto armado é o material estrutural mais utilizado nas construções no mundo inteiro. Esse material começou a ser utilizado por volta de 1850, mas, nessa época, não havia preocupação com a sua durabilidade, existindo certa predisposição a considerá-lo como um material com vida útil praticamente infinita. Entretanto, há alguns anos atrás, a durabilidade do concreto passou a ser considerada como um assunto importante, para os engenheiros e para toda a sociedade.

## 2. Materiais e métodos

O cimento utilizado, nesse trabalho, é denominado CPV ARI, cimento Portland com alta resistência inicial. O metacaulim e a sílica ativa apresentaram massa específica de 2,65kg/dm<sup>3</sup> e 2,18kg/dm<sup>3</sup>, respectivamente. A composição química do metacaulim e da sílica

Um dos principais mecanismos de degradação do concreto armado é a corrosão de armaduras e um dos principais agentes agressivos que causa a corrosão no concreto armado é o íon cloreto. Este íon agressivo está presente, principalmente, em regiões costeiras, atmosferas industriais, reservatórios de água tratada e piscinas.

O benefício causado pelo metacaulim e a sílica ativa como adição no concreto inibindo a penetração de cloretos

já é bastante conhecido (Hisada et. al., Bamforth & Thomas, 1999; Cabrera et. al., Papadakis, 2000; Boddy et. al., 2001; Kou et. al., 2006). Entretanto, é necessário estudar maneiras de quantificar o aumento na vida útil causado por essas adições minerais. Esse trabalho avança nesse ponto, considerando uma forma prática e fácil de quantificar o aumento de vida útil causado pelo uso de adições em concretos de alta resistência expostos a ambientes marinhos.

ativa está apresentada na Tabela 1.

Como o agregado graúdo, para a preparação dos concretos, foi utilizada uma pedra granítica britada (densidade aparente=1.424kg/m<sup>3</sup> e massa específica=2.742kg/m<sup>3</sup>), classificada, de acordo com a NBR 7211, como bri-

ta de graduação 2. O agregado miúdo utilizado foi areia natural de rio (densidade aparente=1.480kg/m<sup>3</sup> e massa específica=2.600kg/m<sup>3</sup>), classificada como areia fina (zona 2), de acordo com a NBR 7211.

| Adição       | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | SO <sub>2</sub> | NaO  | K <sub>2</sub> O | Álcalis totais (Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> *) |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|------|------------------|---|
| Metacaulim   | 51,57            | 40,5                           | 2,8                            | ---  | --- | ---             | 0,08 | 0,18             | 0,20  |
| Sílica ativa | 21,3             | 5,3                            | ---                            | 64,4 | 2,2 | 1,9             | 0,2  | 0,6              | 0,59  |

\*Na<sub>2</sub>O<sub>e</sub> = Na<sub>2</sub>O+0,658K<sub>2</sub>O.

Tabela 1

Composição química das adições.

## Dosagem

Os parâmetros abaixo foram mantidos constantes para a dosagem de concreto desse trabalho.

- Três relações aglomerante/agregados: 1:2,8; 1:3,6 e 1:4,4.
- Proporção de adição: 10%.
- Consistência medida pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, ajustada para 80mm ± 10mm.

A Tabela 2 apresenta as proporções de mistura, massa específica dos concre-

tos (γ<sub>c</sub>) e consumo de cimento (C) de cada proporção de mistura.

É importante ressaltar que as adições de metacaulim e sílica ativa resultaram em uma redução no teor de argamassa de 48% para 46%. Isto ocorreu porque parte de um material mais denso (Cimento Portland) foi substituída por um material menos denso (metacaulim ou sílica ativa). Isto resultou em um maior volume de pasta e, consequente-

mente, foi possível reduzir a quantidade de argamassa em massa.

Todos os corpos de prova foram curados a 23°C ± 2°C e 98% de umidade relativa, para os ensaios de resistência a compressão e de migração de cloretos. Cilindros de Φ10x20cm foram utilizados para o procedimento dos ensaios de resistência à compressão e migração de cloretos.

| Pasta/ agregado | Abreviação | Substituição       | Cimento:adição:agr. miúdo:agr. graúdo: a/c | γ <sub>c</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) | C (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------|------------|--------------------|--|-------------------------------------|------------------------|
| 1:2,8           | R          | Referência (0%)    | 1,0:0,0:0,82:1,98:0,24                     | 2424                                | 600                    |
|                 | M          | Metacaulim (10%)   | 0,9:0,1:0,75:2,05:0,26                     | 2361                                | 582                    |
|                 | S          | Sílica ativa (10%) | 0,9:0,1:0,75:2,05:0,26                     | 2479                                | 589                    |
| 1:3,6           | R          | Substituição       | 1,0:0,0:1,21:2,39:0,28                     | 2475                                | 507                    |
|                 | M          | Referência (0%)    | 0,9:0,1:1,12:2,48:0,29                     | 2409                                | 492                    |
|                 | S          | Metacaulim (10%)   | 0,9:0,1:1,12:2,48:0,30                     | 2389                                | 487                    |
| 1:4,4           | R          | Substituição       | 1,0:0,0:1,59:2,81:0,32                     | 2470                                | 432                    |
|                 | M          | Referência (0%)    | 0,9:0,1:1,48:2,92:0,33                     | 2359                                | 411                    |
|                 | S          | Metacaulim (10%)   | 0,9:0,1:1,48:2,92:0,34                     | 2451                                | 427                    |

Tabela 2

Proporções de mistura do concreto.

## Ensaio de penetração de cloretos segundo a ASTM 1202/08

Esse ensaio foi conduzido de acordo com as especificações da ASTM C1202/08. Depois do tempo de cura, fatias de 50mm de espessura e 100mm de diâmetro foram cortadas da porção central dos cilindros. A ASTM C1202/08 recomenda a extração de somente uma fatia de cada corpo de prova, para prevenir variações nos resultados causados por diferenças entre a porosidade das camadas. Entretanto, tendo como base tra-

balhos anteriores (Medeiros et. al., 2009; Medeiros, 2008), foram retiradas duas fatias de cada corpo de prova.

Depois disso, os corpos de prova foram saturados a vácuo como prescrito na ASTM C1202/08. Cada fatia de concreto foi posicionada entre duas células de acrílico com 280 cm<sup>3</sup>. Uma das células foi preenchida com uma solução de NaOH 0,3N e a outra, com uma solução de NaCl a 3,0%. As células foram conectadas a uma fonte de energia de 60V por 6 horas, de modo que a célula de NaOH se tornou o ânodo e a célula de NaCl se tornou o cátodo. A representação esquemática da célula de migração de cloretos está ilustrada na Figura 1.

Depois de 6 horas em análise, a carga total passante pelo corpo de prova (em Coulomb) foi obtida calculando a integral da corrente que passou pelo corpo de prova durante o período do ensaio.

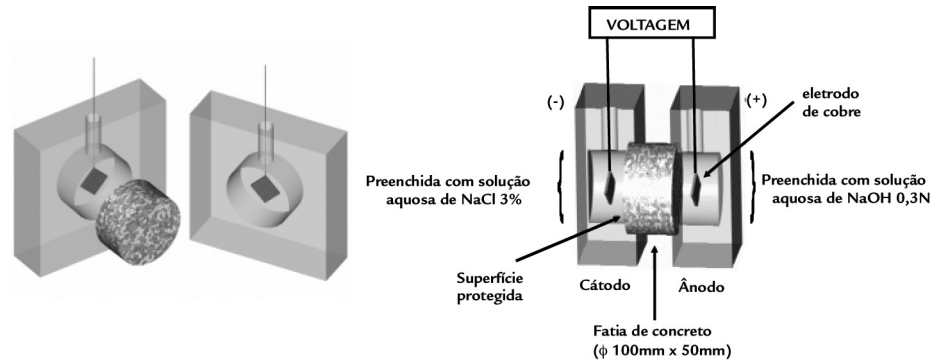


Figura 1

Disposição experimental da célula de migração de cloretos.

## 3. Resultados

### Diagrama de dosagem

A Figura 2 mostra o diagrama de dosagem dos concretos desse estudo. Esse gráfico apresenta uma vista geral da influência de cada parâmetro da dosagem (consumo de aglomerantes, relação água/aglomerantes e relação agregados/cimento) na resistência à compressão do concreto. Assim, a Figura 2 permi-

te comparar os detalhes de dosagem do concreto de referência (sem adições) com os concretos com adição mineral (metacaulim ou sílica ativa).

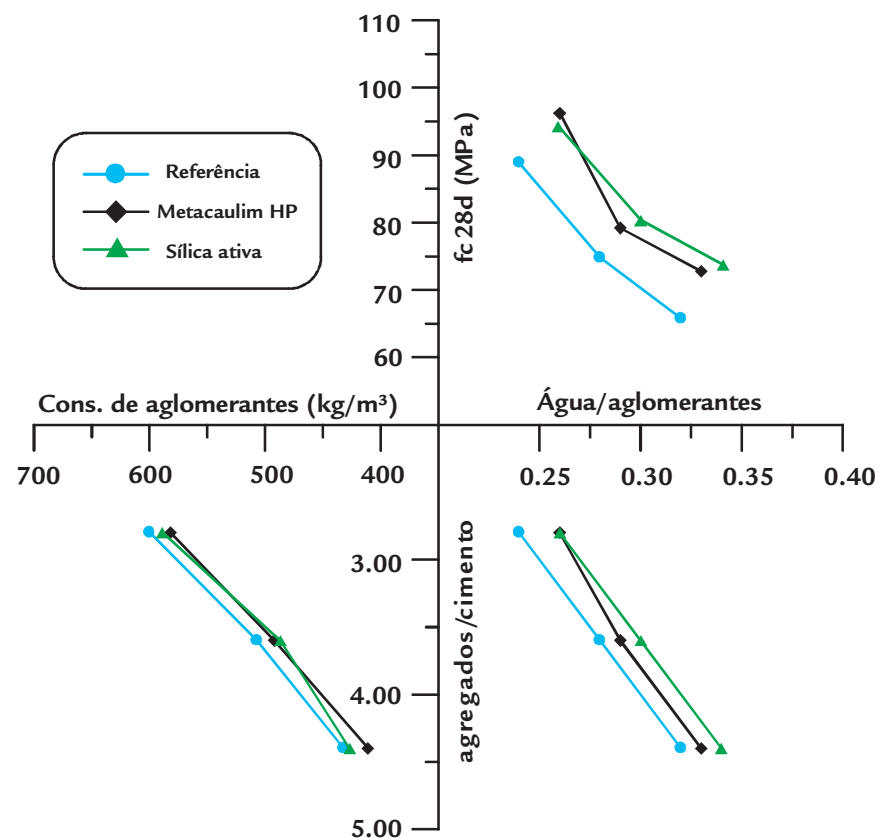


Figura 2

Diagrama de dosagem do concreto (abatimento= 80±10mm; tempo de cura=28dias).

## Ensaio de migração de cloretos

A Tabela 3 apresenta a carga passante total obtida de acordo com a ASTM1202/08. Os dados mostram que, o uso de metacaulim e da sílica reduziu significativamente a carga passante em comparação com o concreto de referência. A sílica ativa apresentou maior eficiência que o metacaulim, mas foi demonstrado que ambas as adições são muito eficientes em reduzir o ataque de cloretos em estruturas de concreto armado.

De acordo com a Tabela 3, o metacaulim apresentou uma taxa de redução, na carga passante, entre 76,2% e 81,1% e a sílica entre 85,3% e 87,3%. Isto evidencia a elevada proteção causada pelas adições estudadas nesse trabalho, que é fator de extrema importância para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos.

A Figura 3 relaciona o consumo

| Agl.:agreg. | Carga passante (C) | Índice de redução (%) |
|-------------|--------------------|-----------------------|
| 1 : 2,8 R   | 915                | ---                   |
| 1 : 2,8 M   | 179                | 80,4                  |
| 1 : 2,8 S   | 118                | 87,7                  |
| 1 : 3,6 R   | 974                | ---                   |
| 1 : 3,6 M   | 185                | 81,1                  |
| 1 : 3,6 S   | 143                | 85,3                  |
| 1 : 4,4 R   | 1295               | ---                   |
| 1 : 4,4 M   | 308                | 76,2                  |
| 1 : 4,4 S   | 168                | 87,0                  |

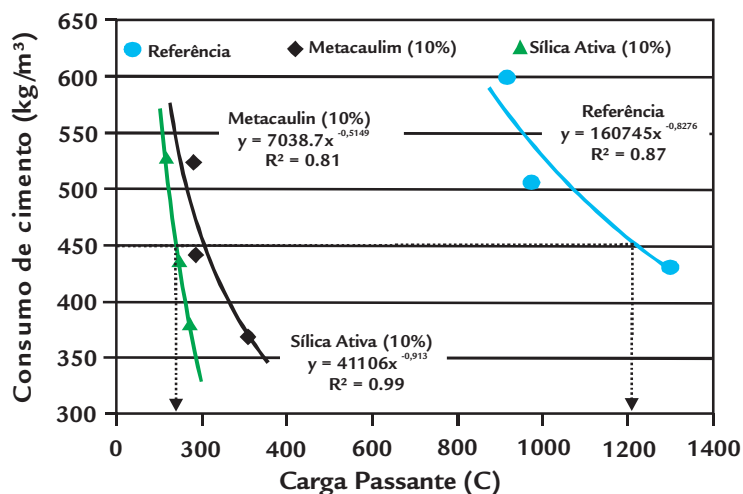


Tabela 3

Carga passante de acordo com a ASTM 1202/08 (cura=28 dias; abatimento=  $80 \pm 10$  mm).

Uma maneira interessante de analisar os resultados é o uso da recomendação de Berke e Hicks (1992), na qual a relação entre os dados de carga pas-

sante e o coeficiente de difusão de cloretos é considerada. Assim, esses autores propuseram a Eq.1 como uma maneira empírica de estimar o coeficiente de difu-

$$C_{da} = 0,0103 \times 10^{-8} Q_{(60V-6h)} \quad (1)$$

Onde:

$C_{da}$  = Coeficiente de difusão aparente ( $cm^2/s$ ).

$Q_{(60V-6h)}$  = carga total passante (voltagem=60V durante 6 horas de teste). Usando a Eq. 1, foi possível elabo-

Figura 3

Carga passante X consumo de cimento (cura=28 dias; abatimento=  $80 \pm 10$  mm).

são dos cloretos, utilizando os dados de carga passante de acordo com a ASTM C 1202. Essa equação foi citada e muito utilizada por Andrade; Whiting(1996).

## 4. Discussão

A previsão da vida de serviço é uma área que precisa de grandes melhorias visando à durabilidade de estruturas de concreto armado. Atualmente existem vários modelos desenvolvidos nessa área, contudo sua validação ainda precisa de

ser estudada e disseminada.

Uma simples e prática maneira de interpretar os dados dos coeficientes de difusão de cloretos é o uso das leis de difusão de Fick. Esse procedimento já foi utilizado pelos autores em trabalhos an-

teriores, para estudar a eficácia de tratamentos de superfície em concreto armado (Medeiros, 2008; Medeiros & Helene, 2009), e está descrito nesses trabalhos.

O método é baseado na segunda lei de Fick e usa os dados dos coeficien-

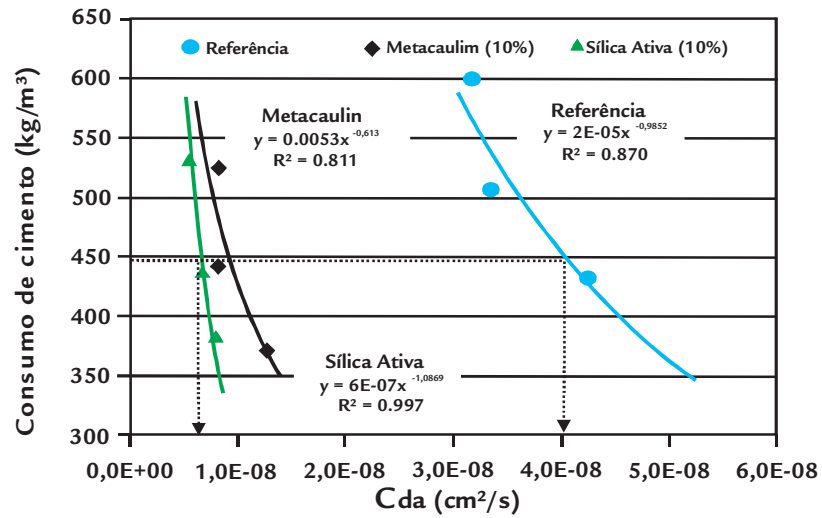


Figura 4  
Coeficiente de difusão de cloretos estimado (cura=28 dias; abatimento = 80±10 mm).

tes de difusão de cloretos para cada caso relacionando a vida útil de serviço com a profundidade, onde a concentração de cloretos alcançou o limite crítico para despassivação das armaduras.

É importante verificar que isto é uma aplicação baseada exclusivamente no fenômeno da difusão de cloretos. Sua extrapolação para outro mecanismo de penetração, como absorção, convecção

ou a mistura deles, deve ser conduzida cuidadosamente. É necessário realizar mais pesquisas sobre esses fenômenos para desenvolver uma maneira de fazer essas considerações. Entretanto a aplicação proposta, nesse trabalho, é válida porque ela permite uma comparação quantitativa entre materiais diferentes e fornece a avaliação da estimativa da vida útil de serviço.

Helene (2000) apresentou as Eq. 2 e Eq. 3 com base na segunda lei de Fick. Essas equações foram utilizadas neste trabalho para analisar os resultados dos coeficientes de difusão de cloretos, permitindo a construção de um gráfico que correlaciona a penetração de cloretos com a vida útil de serviço da estrutura de concreto armado (Figura 5).

$$PC = 2(z) \sqrt{Dt} \tag{2}$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{C_{C1} - C_0}{C_s - C_0} \tag{3}$$

Onde: D é o coeficiente de difusão de cloretos (cm²/ano), t é a vida útil de serviço (anos), erf (z) é a função erro de Gauss, PC (penetração de cloretos) é a profundidade onde a concentração de cloretos alcançou o ponto crítico para despassivação do aço (cm), C<sub>0</sub> é a concentração inicial de cloretos, C<sub>s</sub> é a concentração de cloretos superficial (%), C<sub>C1</sub> é a concentração de cloretos ao longo da profundidade e do tempo (%) e C<sub>prf</sub> é a concentração de cloretos limite crítico para despassivar a armadura (por massa de cimento).

Para elaborar a Figura 5, foi necessário fixar alguns parâmetros, como: C<sub>s</sub> =1,8 e C<sub>prf</sub>=0,4% por massa de cimento. Além disso, para produzir uma comparação de concretos aplicáveis, nas mesmas condições de execução, foram escolhidos concretos com a mesma resistência à compressão e consistência medida pelo

abatimento do tronco de cone.

Desta maneira, foi utilizado, como referência, um concreto de 80MPa de resistência à compressão e seu consumo de aglomerante foi extraído do diagrama de dosagem (Figura 2).

Para o consumo de aglomerante correspondente a 80Mpa, para cada caso estudado (referência, metacaulim, sílica ativa), os valores das quantidades de cimento foram calculados e os respectivos coeficientes de difusão de cloretos foram estimados, utilizando a Figura 4. Assim, os dados utilizados, para a construção da Figura 5, são apresentados na Tabela 4.

A Figura 5 mostra a relação entre o cobrimento de concreto e a vida útil de serviço. É possível observar que, para um cobrimento de concreto igual a 4 cm, a vida útil de serviço da estrutura é de, aproximadamente, 5 anos, para o con-

creto de referência, 17 anos (240% de aumento), para o concreto com adição de metacaulim (10% de substituição do cimento) e 27 anos (440% de aumento), para o concreto com adição de sílica ativa (10% de substituição do cimento).

É importante enfatizar que a previsão da vida de serviço apresentada, nesse trabalho, somente é válida nas condições abaixo:

- A estrutura de concreto armado está no começo da sua vida útil de serviço (começando o período de iniciação).
- O mais rápido agente degradador é o ataque por cloretos.
- Concreto sujeito à imersão em água contaminada com íons cloreto.
- Nenhum outro fator acidental externo afeta as propriedades do cobrimento de concreto.

Tabela 4  
Coeficientes de difusão de cloretos correspondentes à resistência à compressão de 80MPa (cura = 28 dias).

| Casos Estudados | Consumo de aglomerante (kg/m³) | Quantidade de Cimento (kg/m³) | C <sub>da</sub> (cm²/s) |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Referência      | 550                            | 550                           | 3,336E-08               |
| Metacaulim      | 492                            | 443                           | 1,000E-08               |
| Sílica ativa    | 487                            | 438                           | 6,658E-09               |

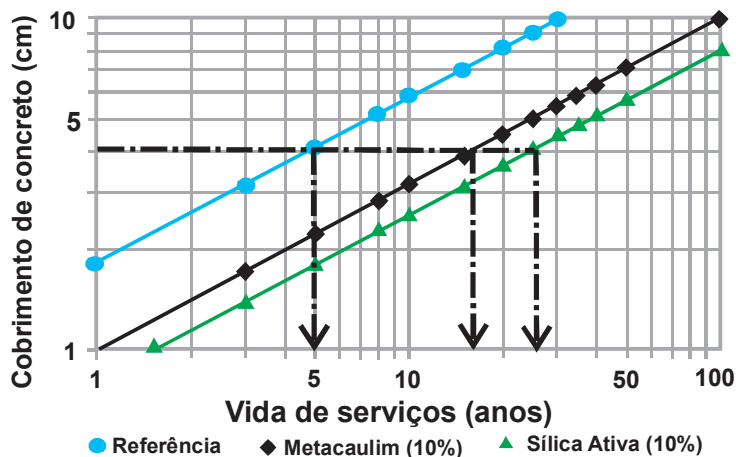


Figura 5  
Influência das adições na relação: vida útil de serviço X cobrimento do concreto.

## 5. Conclusões

As conclusões expressas aqui se aplicam para as características desse trabalho e dos materiais empregados nesse estudo. Qualquer extrapolação, para outros materiais ou circunstâncias, deve ser conduzida cuidadosamente.

Esse trabalho propõe uma maneira interessante de interpretar resultados de coeficientes de difusão de cloretos. A possibilidade de fazer previsões da vida útil de serviço, facilidade de interpretação e correlação entre cobrimento do concreto e vida útil de serviço são as vantagens desse método. Esse procedimento de in-

terpretação pode, assim, se tornar uma ferramenta importante para prever a vida de serviço de estruturas de concreto armado. Entretanto é importante verificar que esta é uma aplicação baseada exclusivamente no fenômeno da difusão de cloretos. Como considerar os outros fenômenos, como carbonatação e ataque por sulfatos, ainda é algo desconhecido.

Foi demonstrado que o metacaulim e a sílica ativa são capazes de reduzir a carga passante no ensaio de migração de cloretos em 76-80% e 85-88%, respectivamente. Isso demonstra a grande eficiência do

metacaulim e da sílica ativa para produzir concretos duráveis destinados a regiões altamente influenciadas pela maresia.

O método para estimar o aumento da vida útil, utilizado, nesse trabalho, permitiu concluir que o tempo de vida útil de serviço aumentou em 240% para adição do metacaulim e 440% para adição da sílica ativa. Tal mecanismo foi utilizado para substituir parte do cimento portland. Essa comparação foi feita com concretos de mesma resistência à compressão e consistência, ou seja, concretos para o mesmo tipo de aplicação.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade de São Paulo (POLI-USP), Universidade Federal do Paraná (UFPR),

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de

São Paulo (FAPESP) por tornarem esse estudo possível, dando suporte financeiro ao mesmo.

## 7. Referências Bibliográficas

- ANDRADE, C., WHITING, D. A comparison of chloride ion diffusion coefficients derived from concentration gradients and non-steady state accelerated ionic migration. *Materials and Structures*, v. 29, p. 476-484, 1996.
- BAMFORTH, P.B., THOMAS, M.D.A. Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 487-495, 1999.
- BERKE, N.S., HICKS, M.C. Estimating the life cycle of reinforced concrete decks and marine piles using laboratory diffusion and corrosion data. *Corrosion forms and control of infrastructure*, ASTM STP 1137, V. Chacker ad. ASTM. Philadelphia, 1992. p. 207-231.
- BODDY, A., GRUBER, K.A., HOOTON, R.D., Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 759-765, 2001.
- CABRERA, J. G., HASSAN, K. E., MALIERE, R. S. The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 22, p. 267-271, 2000.
- HELENE, P. Durabilidad. Interpretación y evaluación de resultados. In: Manual de Diagnóstico e Intervención en Estructuras de Hormigón Armado, Barcelona: *Collegi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona*, 2000. p. 87-102.
- HISADA, M., NAGATAKI, S., OTSUKI, N. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of chloride ion migration through mortar. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, p. 443-448, 1999.



- KOU, S.C., LAM, L., POON, C.S. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, v. 20, p. 858-865, 2006.
- MEDEIROS, M.H.F., HOPPE FILHO, J., HELENE, P. Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions. *Marine Structures*, v. 22, n. 2, p. 128-141, 2009.
- MEDEIROS, M.H.F. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos*. São Paulo: Universidade de São Paulo, Brasil, 2008. (Tese de Doutorado).
- MEDEIROS, M.H.F., HELENE, P., Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. *Construction & Building Materials*, v. 23, p. 1476-1484, 2009.
- PAPADAKIS, V.G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 291-299, 2000.

---

Artigo recebido em 08 de agosto de 2012. Aprovado em 25 de outubro de 2012.



**Divulgue sua empresa  
e seus produtos para os  
formadores de opinião do  
setor mineiro-metalúrgico.**

**ANUNCIE NA REM - REVISTA ESCOLA DE MINAS.**

**Pedidos de inserção, negociações e consultas:**

**RBC EDITORAÇÃO ELETRÔNICA**

**Luciano Borba**

**(31) 3551 4730**

**[diretor.comercial@rem.com.br](mailto:diretor.comercial@rem.com.br)**