

Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas

Chloride migration test to concrete: influence of the number of slices extracted

Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Departamento de Construção Civil (DCC),
Programa de Pós-Graduação em
Construção Civil (PPGCC),
Universidade Federal do Paraná (UFPR),
medeiros.ufpr@gmail.com

André Yukio Borba

Departamento de Construção Civil,
Universidade do Paraná.
andre.yukio@yahoo.com.br

Juarez Hoppe Filho

Departamento de Engenharia Civil,
Universidade Federal da Bahia.
juarez.hoppe@gmail.com

Paulo Roberto do Lago Helene

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

Resumo

Ensaio de migração de cloretos são usados para mensurar a capacidade do concreto em inibir o ataque por cloretos. Muitos pesquisadores realizam esse ensaio em uma fatia de concreto extraída da parte central dos corpos de prova cilíndricos, descartando cerca de 75% do concreto usado para moldar os corpos de prova. Esse fato gerou a questão: Seria possível extrair mais fatias de um mesmo corpo de prova sem se perder a confiança nos resultados? O principal objetivo desse trabalho é responder a essa pergunta. Além disso, outro objetivo desse estudo foi mostrar a diferença da penetração de cloretos entre as faces finais e as superfícies internas das vigas e lajes de concreto. Os resultados indicaram que é possível usar mais fatias de um único corpo de prova para um teste de migração de cloretos. Além disso, foi demonstrado que houve significativa diferença da penetração de cloretos entre as superfícies acabadas (com desempenadeira) e as superfícies provenientes das paredes das fôrmas.

Palavras-chave: Ambiente marinho, ataque por cloreto, ensaio de migração, concreto, análise de variância, durabilidade.

Abstract

Chloride migration tests are used to measure the capacity of the concrete to inhibit chloride attack. Many researchers carry through this test in a slice of concrete extracted from the central part of cylindrical specimens, discarding about 75% of the concrete used to mold the specimens. This fact generated the question: would it be possible to extract more slices from a same specimen without losing the confidence in the results? The main purpose of this work is to answer to this question. Moreover, another aim of this study was to show the difference of chloride penetration between finished faces and the formwork surfaces of concrete beams and slabs. The results indicated that it is possible to use more slices of a single specimen for a chloride migration test. Moreover, it was demonstrated that significant difference of chloride penetration exists between the finished surface and the formwork surface of the specimens.

Keywords: Marine environment, chloride attack, migration test, concrete, variance analysis, durability.

1. Introdução

Muitos pesquisadores têm se dedicado a medir o coeficiente de difusão de cloretos como um parâmetro de comparações quantitativas de diferentes concretos a serem usados em estruturas expostas a ambientes marinhos. Entretanto a determinação desse parâmetro, para ensaios de difusão, consome muito tempo, precisando de meses para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos. Por causa disso, em 1981, Whiting desenvolveu um experimento que demanda poucas horas para obtenção de resultados de avaliação de penetração de cloretos no concreto (Geiker et al., 1995). O procedimento do ensaio idealizado por Whiting é ainda recomendado pela ASTM C1202/97, ensaio que não permite a determinação do coeficiente de difusão de cloretos, mas é um caminho possível para comparações qualitativas. Contudo muitos estudos, para se deter-

minar o coeficiente de difusão de cloretos, a partir de ensaios de migração, têm sido desenvolvidos (Luping & Nilsson, 1992; Andrade, 1993; Andrade et al., 1999; Truc et al., 2000; Castellote et al., 2001; Yang, 2005; Medeiros & Helene, 2009; Medeiros et al., 2012), gerando a possibilidade de executar comparações quantitativas. Esse artigo trata da aplicação de um desses métodos propostos.

Muitos pesquisadores (Yang et al., 2005; Tang & Sørensen, 2001; Medeiros & Helene, 2009; Castellote et al., 2001; Yang et al., 2007) que usam testes de migração de cloreto extraem uma fatia de 50 mm de largura do núcleo central do corpo de prova cilíndrico (100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento). Esse procedimento resulta no descarte de cerca de 75% do concreto usado para moldar os corpos de prova. Esse fato fez com que os autores desse trabalho levantas-

sem as seguintes questões. 1) Seria possível extrair mais fatias de um mesmo corpo de prova sem perder a confiabilidade dos resultados? 2) As compactações das diferentes camadas de um único corpo de prova são tão diferentes que modificam significativamente os resultados?

A necessidade de reduzir o número de corpos de prova moldados no programa experimental da tese de doutorado de um dos autores desse artigo motivou esse trabalho. Dessa maneira, o principal objetivo desse trabalho é responder as questões anteriormente apresentadas, além de estudar a diferença da penetração de cloretos entre a face superior (superfície acabada com desempenadeira de aço) e base do molde (superfície em contato direto com a forma) das vigas e lajes. A análise de variância foi utilizada como ferramenta estatística para se obterem conclusões confiáveis.

2. Procedimento experimental

Duas proporções de misturas de concreto foram utilizadas neste trabalho, com diferentes quantidades de cimento e relação água/cimento. Para cada pro-

porção de mistura, 8 corpos de prova cilíndricos foram moldados (100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento). Depois de moldados e curados, os corpos

de prova foram cortados em fatias como indicado na Figura 1. A Tabela 1 apresenta o planejamento do experimento, assim como as proporções de mistura adotadas.

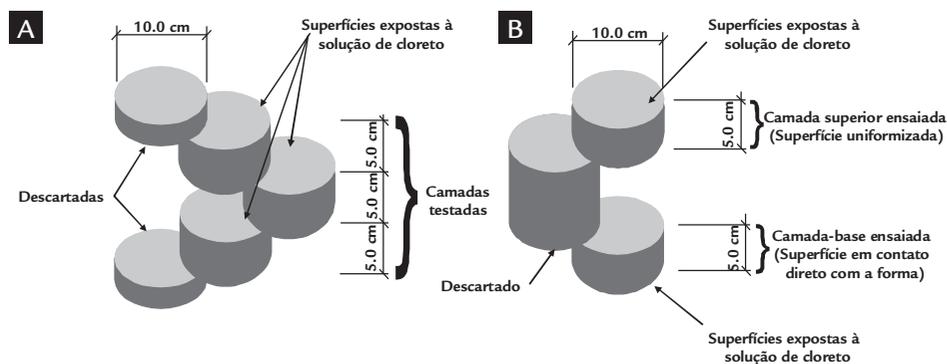


Figura 1
Disposição do corte das amostras (4 amostras para cada proporção de mistura)
(A) Corte em três camadas.
(B) Corte nas camadas de topo e de base.

Comparação de diferentes camadas

Proporção da mistura	Número de amostras	Número de fatias testadas por camadas	Número de fatias por amostra [ver Figura 1 (A)]
1: 4,5	4	4	3
1: 6,0	4	4	3

Comparação entre a face superior (superfície acabada com desempenadeira de aço) e superfície da base (superfície em contato direto com a fôrma)

Proporção da mistura	Número de amostras	Número de fatias testadas por camadas	Número de fatias por amostra [ver Figura 1 (B)]
1: 4,5	4	4	2
1: 6,0	4	4	2

Tabela 1
Resumo do experimento para análise de variância.

Materiais

O concreto foi produzido com o cimento CII E-32 (cimento composto com

escória), cuja composição química está apresentada na Tabela 2. O agregado graúdo foi

uma brita de origem granítica e o agregado miúdo foi uma areia natural de rio.

Os detalhes das proporções de misturas são apresentados na Tabela 3. Após a mistura, uma mesa vibratória foi uti-

lizada, para se garantir a compactação adequada. A cura adotada consistiu em acondicionar os corpos de prova em câ-

maras úmidas com umidade relativa de 100 % e 23°C ± 2°C de temperatura por 91 dias.

Tabela 2
Composições químicas e propriedades físicas do cimento.

Composições químicas (%)										
Cimento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cal livre	Equivalente alcalino 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

* Na₂O_e = Na₂O + 0,658 K₂O

Tabela 3
Proporcionamentos dos concretos empregados.

Cimento : agregado	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)	Massa específica (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa) a 28 dias
1 : 4,5	0,50	358,0	644,4	966,6	179,0	2155	32,2
1 : 6,0	0,65	281,0	722,2	963,8	182,6	2148	24,8

Abatimento do tronco de cone = 90±10 mm.

Ensaio de migração de íons

Esse ensaio foi conduzido de acordo com a norma ASTM C1202/97, exceto para tensão aplicada (30 V), que foi reduzida para diminuir o efeito Joule (Medeiros et al., 2006). Após o tempo de cura, fatias de 50 mm e 100 mm de diâmetro foram cortadas dos corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, como descrito anteriormente. Quatro fatias foram usadas para representar cada camada de estudo. Dessa maneira, 12 fatias do centro (4 de cada uma das 3 camadas representadas na Figura 1(A)) e 8 fatias das extremidades (4 da superfície acabada e 4 em contato com a fôrma) foram utilizadas. Essas fatias foram saturadas de acordo com o procedimento da ASTM 1202/97.

As fatias saturadas foram colocadas entre duas células acrílicas, cada célula com 280 cm³ de capacidade volumétrica. Uma célula foi preenchida com uma solução aquosa de NaOH 0,3N e a outra com solução aquosa com 3% de NaCl, como ilustrado na Figura 2. Os dois pólos da célula foram conectados à fonte de tensão de 30 V como também ilustrado na Figura 2.

A voltagem foi mantida até 30 horas depois do começo do ensaio de migração. Em seguida, a fonte de energia foi desligada e as fatias de concreto foram seccionadas na direção do fluxo de cloretos. Depois, uma solução aquosa de AgNO₃ 0,1 M foi aspergida na superfície de concreto recém-fraturado e a profundidade de penetração

de cloretos foi medida. Isto é possível porque esse procedimento causa a formação de regiões brancas e marrons com fronteira de separação entre elas bem distinta. A região branca é devida à precipitação de AgCl e, portanto, representa a área que contém cloreto. A região escura corresponde à zona sem cloretos. A frente de coloração branca corresponde aos cloretos livres e solúveis em água. Desse modo, medindo-se a profundidade da frente branca, mede-se a profundidade de penetração de cloretos no concreto (Medeiros & Helene, 2009; Meck & Sirivivatnanon, 2003; Ait Mokhtar et al., 2007; Medeiros et al., 2009). Esse procedimento está de acordo com as recomendações de Luping e Nilson (1992).

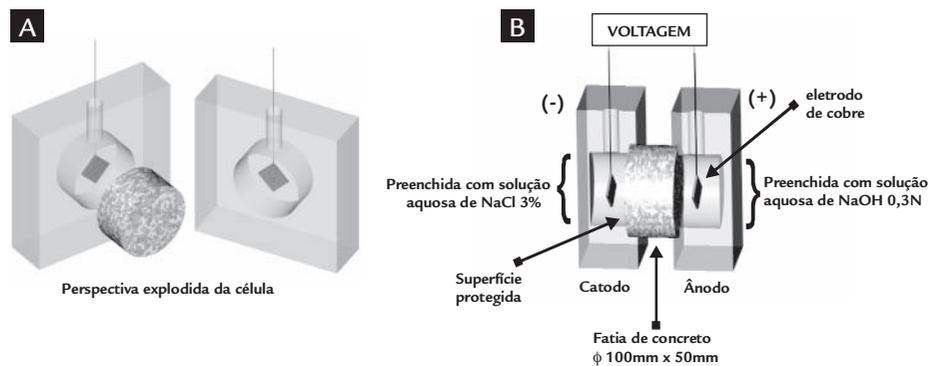


Figura 2
Arranjo experimental da célula do ensaio de migração de íons (Medeiros, 2008).

Estimativas do coeficiente de difusão de cloretos

O método de ensaio usado nesse trabalho para estimar o coeficiente de difusão de cloretos está de acor-

do com o procedimento descrito por Geiker et al. (1995) e Luping; Nilson (1992). Dessa maneira, a Eq [1] foi

utilizada para se calcularem os coeficientes de difusão de cloretos.

$$D = \frac{R \cdot T}{z \cdot F \cdot E} \cdot \frac{x_d - a \cdot x_d^b}{t} \tag{1}$$

Onde:
 D = coeficiente de difusão de cloretos (m²/s).
 R = constante dos gases (8.314472 J/mol.K).
 T = temperatura (298 K).

z = valência do íon (para cloreto = -1).
 F = constante de Faraday (96485.3383 J/V.mol).
 E = campo elétrico (-600 V/m).

x_d = profundidade de penetração (m).
 t = tempo de ensaio (s).
 a = 1,061
 b = 0,589 (para E = 600 V/m).

3. Resultados e discussão

Comparando camadas

A Figura 3 mostra uma comparação da penetração de cloretos entre as 3 camadas, tanto para as proporções de mistura 1:4,5, como para 1:6,0.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os dados das análises de variância usados para testar a validade das conclusões desse trabalho. Esses resultados indi-

cam (com 99% de significância) que não existe diferença nos resultados de penetração de cloretos, nas diferentes camadas de um único corpo de prova.

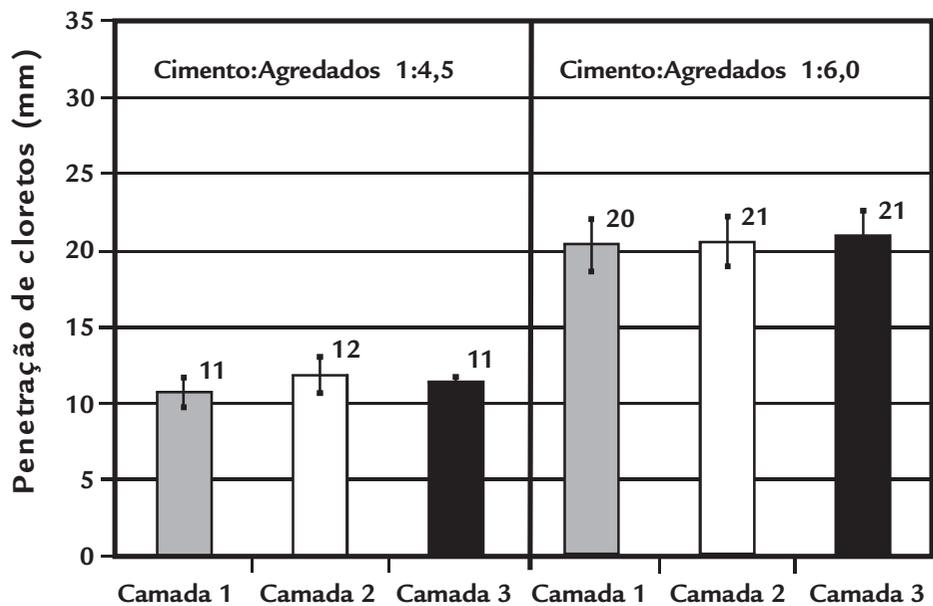


Figura 3 Penetração de cloretos, comparando três camadas de amostras cilíndricas (100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento).

Significância = 99%					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	F _{valor}	F _{crítico}
Camadas	19105,7	2	9552,8	0,0109	10,9
Corpos de prova	4149,6	3	1383,2	0,3021	9,8
Resíduos	5450,7	6	908,4		
Total	28706,0	11			

* Se F_{valor} > F_{crítico}, então existe influência das variáveis estudadas.

Tabela 4 Análise de variância para penetração de Cl⁻ (camadas X corpos de prova e cimento: agredados = 1: 6,0).

Significância = 99%					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	F _{valor}	F _{crítico}
Camadas	2,565	2	12,825	2,18	10,92
Corpos de prova	2.993.333	3	0,9977777	1,70	9,78
Resíduos	3.521,667	6	0,5869444		
Total	9,08	11			

* Se F_{valor} > F_{crítico}, então existe influência das variáveis estudadas.

Tabela 5 Análise de variância para penetração de Cl⁻ (camadas X corpos de prova e cimento: agredados = 1: 4,5).

Usando a equação proposta por Luping & Nilson (1992) [Eq. (1)] e os resultados da profundidade de penetração de cloretos (pelo teste colorimétrico), os coeficientes de difusão de clore-

tos do concreto foram calculados. Esses dados estão representados na Figura 4 e provam que a difusão de cloretos, através das três camadas extraídas a partir do centro de um corpo de prova, apre-

senta o mesmo coeficiente de difusão de cloretos. Isto confirma a viabilidade em se usar mais de uma camada de cada corpo de prova, para um ensaio de migração de cloretos.

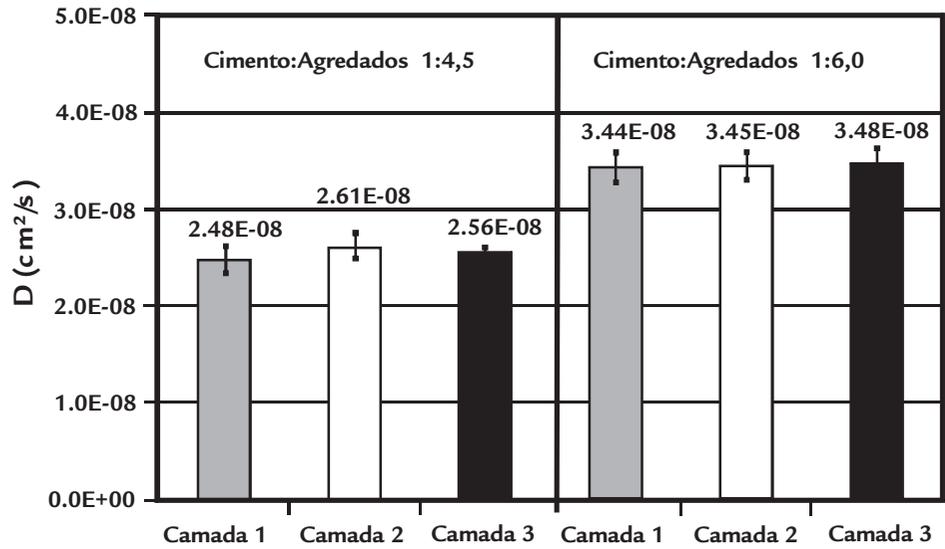


Figura 4
Coeficiente de difusão de cloretos, comparando três camadas de corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento).

Comparando as superfícies do topo e da base

A Figura 5 apresenta os valores de penetração de cloretos do topo e da base das superfícies dos corpos de prova de duas proporções de misturas de concretos utilizadas no presente trabalho. Está claro que a superfície (de acabamento final) dos corpos de prova apresenta menor restrição, para a penetração de cloretos, do que a superfície da base (superfície de contato com a fôrma). Isto é explicado pela ocorrência de microfissuras sobre as superfícies do corpo de prova causada

pela evaporação da mistura de água, logo após a moldagem.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os dados da análise de variância, que comprovam, com 99% e 95% de significância, para cimento/agregado igual a 1:4,5 e 1:6, respectivamente, que existe diferença na penetração de cloretos na base e no topo dos corpos de prova de concreto.

Os coeficientes de difusão dos cloretos mostrados na Figura 6 referem-se às superfícies de acabamento e de base

(faces internas) e foram calculados usando a Equação 1 e o ensaio de migração de cloretos associado à determinação colorimétrica de penetração de cloretos. Esses resultados indicam que o coeficiente de difusão da camada superior é maior do que o da camada de base dos corpos de prova. Fazendo uma comparação com situações práticas, estes resultados indicam que a penetração de cloretos é mais fácil através das superfícies finais (de rasadura) de vigas e lajes de concreto.

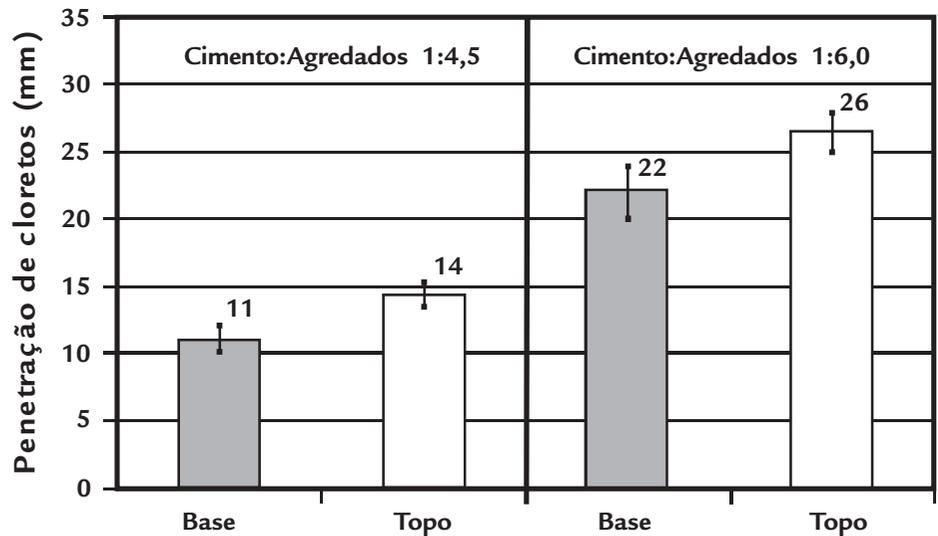


Figura 5
Penetração de cloretos, comparando as superfícies de topo e da base dos corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento).

Significância = 99%

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	F _{valor}	F _{crítico}
Topo/base	231104,8	1	2,00E+05	158,81	34,12
Corpos de prova	1037,8	3	345,9	0,24	29,46
Resíduos	4365,6	3	1455		
Total	236508,2	7			

Tabela 6
Análise de variância para penetração de Cl⁻ (topo e base X corpos de prova e cimento:agregados = 1:6,0).

* Se $F_{valor} > F_{crítico}$, então existe influência das variáveis estudadas.

Significância = 99%					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	F _{valor}	F _{crítico}
Topo/base	231104,8	1	2,00E+05	158,81	34,12
Corpos de prova	1037,8	3	345,9	0,24	29,46
Resíduos	4365,6	3	1455		
Total	236508,2	7			

* Se $F_{valor} > F_{crítico}$, então existe influência das variáveis estudadas.

Tabela 7
Análise de variância para penetração de Cl⁻ (topo e base X corpos de prova e cimento:agregados = 1:4,5).

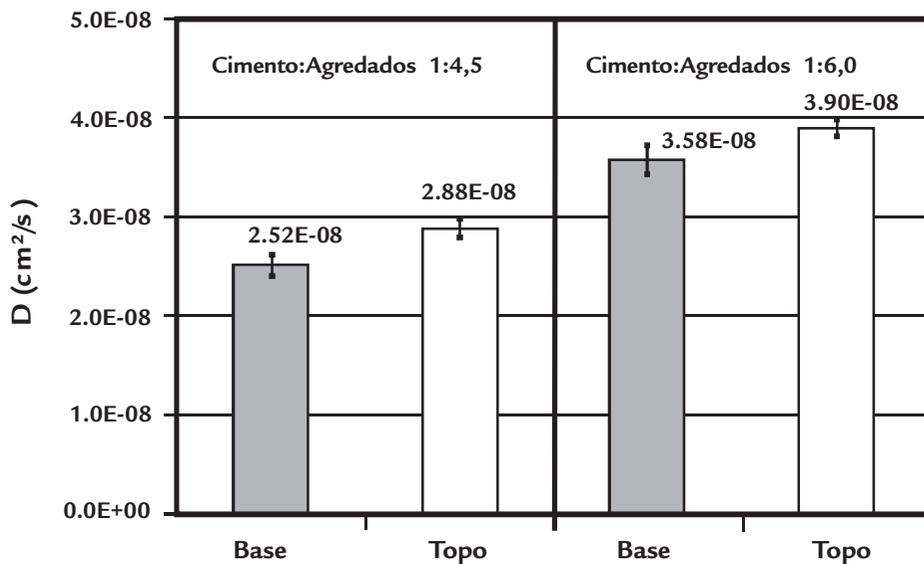


Figura 6
Coeficiente de difusão de cloretos, comparando superfícies do topo e da base dos corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento).

4. Conclusões

A partir do estudo apresentado nesse documento, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- Não existe influência significativa nos resultados de profundidade de penetração de cloretos, coeficiente de difusão de cloretos e porosidade das três fatias distintas extraídas da porção central de um único corpo de prova cilíndrico (100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento). Isso significa que é possível usar mais de uma fatia de um corpo de prova para um ensaio de migração de cloretos.

- A penetração de cloretos, nas superfícies de acabamento, é maior que na base (nas faces em contato com a fôrma) do corpo de prova. Isto é causado, em parte devido ao maior volume de poros maiores que 10 nm apresentados pelas superfícies finais e, em parte, pela ocorrência de microfissuras na superfície do topo dos corpos de prova (dados comprovados por Medeiros et al., 2009). Essas microfissuras ocorrem por causa da rápida evaporação de água nas primeiras horas depois da moldagem dos corpos de prova.

- Como já esperado, ficou claro que não existe influência significativa do corpo de prova em um teste de migração de cloretos. Além disso, o procedimento de ensaio é capaz de diferenciar concretos de qualidades distintas (cimento:agregados = 1:4,5 e a/c = 0,50; cimento:agregados = 1:6 e a/c = 0,65).

É importante verificar que esses resultados foram obtidos utilizando-se uma mesa vibratória, para se garantir uma compactação adequada. Outro tipo de compactação pode produzir resultados diferentes.

5. 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 FAPESP (Fundação de Apoio à Pesquisa do

Estado de São Paulo) por tornarem esse estudo possível, dando suporte financeiro ao mesmo.

6. Referências Bibliográficas

AÏT MOKHTAR, K., LOCHE, J. M., FRIEDMANN, H., AMIRI, O., AMMAR, A. Steel corrosion in reinforced concrete. In: Report n°. 2-2-Concrete in marine environment. MEDACHS – Interreg IIIB Atlantic Space – Project n° 197. Marine Environment Damage to Atlantic Coast Historical and transport works or Structures: methods of diagnosis, repair and of maintenance, 2007.

- ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research*, v. 23, p. 724-742, 1993.
- ANDRADE, C., CASTELLOTE, M., ALONSO, C., GONZÁLEZ, C. Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1201-91. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 417-421, 1999.
- ASTM C 1202 - 97. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. American Society for Testing and Materials, USA, 1997.
- CASTELLOTE, M., ANDRADE, C., ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber - Comparison with natural diffusion tests. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 1411-1420, 2001.
- GEIKER, M., GRUBE, H., LUPING, T., NILSSON, L., ANDRADE, C. Laboratory test methods. In: J. KROPP, H.K. HILSDORF (eds) RILEM REPORT 12 - Performance criteria for concrete durability, E & FN Spon, London, 1995.
- HOPPE FILHO, J., MEDEIROS, M. H. F., PEREIRA, E., HELENE, P., ISAIA, G.C. High volume fly ash concrete with and without Hydrated Lime: chloride diffusion coefficient from accelerated test. *Journal of Materials in Civil Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000596
- 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.
- MECK, E., SIRIVIVATNANON, V. Field indicator of chloride penetration depth. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 1113-1117, 2003.
- MEDEIROS, M. H. F., MORAES, B. P., HELENE, P. Chloride migration test in concrete technology - limitations and cares in the interpretation. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CORROSÃO (LATINCORR - 2006). Fortaleza, 2006. p. 1-12.
- MEDEIROS, M. H. F. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos*. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008. 140p. (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 and building materials*, v. 23, p. 1476-1484, 2009.
- MEDEIROS, M. H. F., HOPPE FILHO, J., HELENE, P. Influence of slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions. *Marine structures*, v. 22, p. 128-141, 2009.
- MINDESS, S., YOUNG, J. F. *Concrete*. United States: Prentice-Hall, 1981.
- TANG, L., SØRENSEN H. E. Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete. *Materials and Structures*, v.277, n. 34, p. 479-485, 2001.
- 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.
- YANG, C. C. A comparison of transport properties for concrete using the ponding test and the accelerated chloride migration test. *Materials and Structures*, v. 277, n. 38, p. 313-320, 2005.
- YANG, C. C., WANG, L. C., WENG, T. L. Using charge passed and total chloride content of penetrating silane sealer on the transport properties of concrete. *Materials Chemistry and Physics*, v. 85, p. 238-244, 2004.
- YANG, C. C., CHIANG, S. C., WANG, L. C. Estimation of the chloride diffusion from migration test using electrochemical current. *Construction and Building Materials*, v. 21, p. 1560-1567, 2007.