

## Estudo de ataque de cloreto em betões autocompactantes de alto desempenho com adjuvantes mitigadores de retração e diferentes relações água/aglomerante

Sakata, Rafael Dors <sup>(1)</sup>, Repette, Wellington Longuini <sup>(2)</sup>, Gómez, Luis Alberto <sup>(2)</sup>  
e Onghero, Lucas <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

<sup>(2)</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6326>

### RESUMO

A retração pode gerar fendilhas no betão autocompactante de alto desempenho (CAAAD) diminuindo sua durabilidade, para diminuir ou eliminar a retração do betão são utilizados adjuvantes mitigadores de retração. Esta pesquisa tem como objetivo mostrar o comportamento de CAAAD que foram produzidos com adjuvantes mitigadores de retração e com diferentes relações água/aglomerantes, em relação à resistência ao ataque de cloretos através do ensaio acelerado de penetração de cloretos, análise do teor de cloretos e análise da corrente passante nos primeiros minutos do ensaio acelerado de penetração de cloretos. Concluiu-se que os betões produzidos com os adjuvantes mitigadores de retração não alteraram significativamente as propriedades de resistência ao ataque de cloretos dos betões estudados, também foi verificado que há boas correlações entre o ensaio acelerado de penetração de cloretos e o teor de cloretos que entraram nas amostras e que é possível diminuir o tempo do ensaio acelerado de penetração de cloretos para alguns minutos. Em relação aos betões produzidos com diferentes relações a/agl, sem adjuvante, os resultados demonstraram que quanto menor a relação a/agl melhor é o desempenho do betão frente ao ingresso de agentes agressivos.

**PALAVRAS-CHAVE:** betão autocompactante de alto desempenho, cloretos, adjuvantes mitigadores de retração.

### 1.- INTRODUÇÃO

Ao unir as propriedades benéficas do betão de alto desempenho e do betão autocompactante se desenvolveu um novo tipo de betão, o betão autocompactante de alto desempenho (CAAAD), que possuía a óptima fluidez e estabilidade do betão autocompactante além da alta resistência e durabilidade do betão de alto desempenho [1]. O CAAAD melhora a durabilidade das peças de betão armado tanto no quesito de desempenho quanto no quesito execução.

Um ponto negativo no uso de betões com baixas relações água/cimento é o aumento da retração autogénea, esta retração está relacionada à retirada de água dos poros capilares pela hidratação do cimento, a autodessecação, que aumenta a tensão exercida pela água nos poros capilares, retraindo a pasta. As fendilhas geradas pela retração autogénea podem provocar redução na resistência do betão, diminuição da durabilidade, perda de pré-tensões em aplicação de protensões e problemas com estética e limpeza [2]. Para diminuir os efeitos das retrações são utilizados os adjuvantes mitigadores de retração.

Os adjuvantes redutores de retração são utilizados para reduzir a retração de betões e argamassas, propileno glicol e polioxi-alquilenol éter são alguns dos compostos químicos utilizados. A redução da retração é obtida pela redução da tensão superficial da água dos poros do betão, sendo observadas reduções de 25% a 50% da retração por secagem [3]. Ao diminuir a tensão superficial da fase aquosa do poro de betão, o uso de adjuvantes redutores de retração diminuem a retração autogénea causada pela autodessecação [4].

O adjuvante compensador de retração tem como princípio induzir tensões de compressão de modo a compensar as tensões de tração resultantes da restrição da retração no betão. O principal responsável pela expansão induzida pelo adjuvante expansor é a formação da etringita, esta normalmente é considerada inconveniente, podendo causar danos irreversíveis quando formada após o endurecimento do betão [5].

Os adjuvantes compensadores de retração mais utilizados são a base de sulfoaluminato de cálcio e à base de cal virgem, sendo os à base cal virgem pouco utilizados por ser de difícil controlo em razão da sua quase que imediata reação com a água [5].

Partículas de polímero superabsorvente armazenam grande quantidade de água, por isso são chamadas de materiais incorporadores de água. Este material, quando incorporados ao betão, tem a capacidade de liberar a água armazenada à medida que ocorre a redução de humidade nos poros do betão, este fenómeno é chamado de cura interna que diminui a autodessecação, responsável por parte considerável da retração autogénea [4].

Os polímeros superabsorventes são materiais desenvolvidos, em princípio, para absorver água ou soluções aquosas. Os mais comuns são os poliacrilatos de ligações cruzadas covalentes e poliacrilamidas/poliacrilatos copolimerizados [6].

## **2.- OBJETIVO**

O objetivo do presente trabalho é verificar o comportamento de betões autocompactantes de alto desempenho, em relação à penetração de cloretos, com diferentes adjuvantes mitigadores de retração e com diferentes relações água/aglomerante.

## **3.- PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Para comparação da influência do uso de adjuvantes mitigadores de retração na durabilidade, foram produzidos betões com relações a/agl 0,25 e 0,32 nos quais se utilizou

adjuvante redutor de retração (ARR) nos teores de 0,5%, 1% e 2%, em relação a massa de cimento, além de adjuvante compensador de retração (ACR) nos teores de 5% e 10%, em substituição ao cimento, apenas para o betão com relação água/aglomerante 0,25 utilizou-se o teor de 15%. Além destes para o betão com relação a/ag de 0,378 foi utilizado um polímero superabsorvente no teor (SAP) de 0,04%, em relação a massa de cimento.

Para se verificar a influência da relação água/aglomerante na durabilidade dos betões foram ensaiados betões produzidos sem adjuvantes mitigadores de retração com os seguintes valores de relação água/aglomerante: 0,25;0,295;0,32 e 0,378.

Os betões utilizados nesta pesquisa fizeram parte de um projecto mais amplo, onde foram estudadas, além da durabilidade, as propriedades no estado endurecido do betão, as propriedades no estado fresco e a retração.

#### 4.- MATERIAIS

A Todos os betões tiveram o mesmo volume de pasta e agregados e a mesma proporção entre os agregados miúdos e graúdos. Foi fixada a abertura do ensaio de espalhamento entre 66 e 75, atendendo à classe SF2 da ABNT NBR 15823-1 [7], enquadrando os betões como autocompactantes, excepto o betão dosado com adjuvante promotor de cura interna, o polímero superabsorvente, que se enquadra como betão convencional. Para atingir o espalhamento especificado foram utilizados diferentes teores de adjuvantes superplastificantes à base de policarboxilatos, o ADVA CAST 500, à base de policarboxilatos, com massa específica de 1,04 g/cm<sup>3</sup> e fabricado pela Grace.

O cimento Portland utilizado foi o de alta resistência inicial (CP V ARI), de massa específica 3,02 kg/dm<sup>3</sup>, sendo este escolhido por apresentar as menores quantidades de adições entre os cimentos comercializados actualmente.

Os betões foram produzidos com 10% de sílica de fumo em relação à massa de cimento, fornecida pela Elken, contendo grau de pureza de 95% e massa específica 2,22 kg/dm<sup>3</sup>.

Foram utilizados dois tipos de areia natural, uma areia fina de duna e outra areia média de cava, a areia fina possui massa específica de 2,64 kg/dm<sup>3</sup> e módulo de finura igual a 0,98, a areia média possui massa específica de 2,55 kg/dm<sup>3</sup> e módulo de finura igual a 2,99.

O agregado graúdo utilizado é de origem granítica, pertencente à zona granulométrica 4,75/12,5 (brita 0), conforme ABNT NBR 7211 [8], a massa específica da brita é de 2,64 kg/dm<sup>3</sup> e módulo de finura igual a 5,89.

Foram utilizados dois adjuvantes mitigadores de retração, um redutor de retração e um compensador de retração e um agente de cura interna. O adjuvante redutor de retração utilizado foi o Eclipse, fabricado pela Grace. O adjuvante líquido possui coloração transparente e a sua massa específica é de 0,91 g/cm<sup>3</sup>, a base química do Eclipse é o polipropileno glicol, conforme indicado pelo fabricante. O adjuvante compensador de retração utilizado foi o cimento P CSA (Calcium Sulpho Aluminate), um sulfoaluminato de

cálcio na forma granular, fabricado pela Denki Kagaku Kogyo Kabushiki Kaisha (DENKA).

O agente de cura interna é um polímero superabsorvente, à base de policrilato de sódio e fabricado pela Grace, este material não é comercializado no Brasil pela fabricante. O PSA foi fornecido na forma granular.

Os betões possuem 35% do volume total de betão composto por agregado graúdo, do volume restante 30% é composta por agregado miúdo, sendo este composto por 40% de areia natural fina e 60% de areia natural média. Também foi utilizado 10% de sílica de fumo em relação a massa de cimento. A tabela 4 mostra os traços utilizados nos betões 0,25; 0,295; 0,32 e 0,378.

**Quadro 1.** Composições de CAAAD estudadas no programa experimental.

<i>Materiais</i>	<i>Traço em massa (kg/kg)</i>			
a/ag	0,25	0,295	0,32	0,378
Cimento	1	1	1	1
Sílica de fumo	0,111	0,111	0,111	0,111
Areia natural fina	0,438	0,472	0,491	0,535
Areia natural grossa	0,286	0,308	0,321	0,349
Brita 0	1,306	1,407	1,463	1,593
a/c	0,278	0,328	0,356	0,42

## 5.- MÉTODOS

Os betões foram misturados em uma betoneira e após 24 h os provetes foram desmoldados e colocados na câmara húmida, com temperatura de  $23 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $95 \pm 2\%$ , onde permaneceram no mínimo por 400 dias.

As resistências mecânicas a compressão dos betões ficaram em entre 80 e 100 Mpa, apenas o betão produzido com 15% de ACR teve uma resistência bem mais baixa, de 28Mpa, onde se verificou que esta é uma dosagem excessiva para o betão.

Foram utilizadas 4 amostras de cada composição para os ensaios de penetração acelerada de íons cloreto, para o ensaio de concentração de cloretos foram utilizados 1 amostra de cada composição.

O ensaio acelerado de penetração de cloretos foi realizado com base na norma americana ASTM C 1202 [9], este ensaio fornece a medida da resistência à penetração de cloretos. Os ensaios que foram realizados se diferenciam da norma ASTM C 1202 em três pontos: os eléctrodos utilizados foram fabricados com telas de aço inox e fios de cobre, diferente da peça de cobre prescrita na norma; a voltagem e o tempo de ensaio foram de 18V e 20 horas, gerando os mesmos 360V.h do ensaio da norma ASTM C 1202, isso foi definido para que

não houvesse aumento de temperatura durante o ensaio dos provetes, o que poderia alterar os resultados; o volume das câmaras das células de migração tinham volume de aproximadamente um litro, para isto foi utilizado um prolongador que aumenta a capacidade das câmaras. Um sistema semelhante para a realização de ensaios de penetração acelerada de cloretos foi utilizado por Calçada [10].

Os ensaios foram realizados em laboratório com temperaturas ambientes na faixa de  $27 \pm 3$  °C. Para realizar os ensaios, os provetes cilíndricos de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, foram divididos com serra circular adiamantada em corte húmido, perpendicularmente a sua altura. Os provetes tiveram a face lateral (perímetro do disco) impermeabilizada com resina de base epóxi.

As amostras dos pós de betão foram retiradas com o auxílio de uma furadeira e broca de  $\varnothing = 10$ mm, foram extraídas amostras até 5mm de 5 a 10mm de profundidade. Os pós extraídos foram secos em estufa a  $105$  °C por 24 horas, posteriormente 2g de pó foram utilizados para extração ácida dos cloretos. A determinação do teor de cloretos totais foi feito pelo método de cromatografia iônica conforme SM 4110-B, o equipamento utilizado foi um cromatógrafo 883 Basic IC Plus da Metrohm, com coluna Metrosep A Supp 5 150/4.0 e taxa de injeção de 0,7 ml/min, a preparação das amostras foi realizada em meio ácido conforme ASTM C1152 [11].

## 6.- RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1.- Penetração de cloretos

A média dos valores de carga passante e os valores da dispersão de um desvio padrão podem ser observadas na Fig. 1, para este ensaio quanto menor for a quantidade de carga passante melhor é o betão frente à penetração dos íons cloreto. Ao analisar os resultados, percebe-se que os betões de relação a/agl 0,25 com adjuvantes mitigadores de retração tiveram valores de cargas passantes menores, indicando que os adjuvantes melhoraram o desempenho destes betões quanto a penetração de cloretos, porém o betão com 15% de adjuvante compensador de retração não seguiu este padrão. Os betões produzidos com adjuvantes mitigadores de retração com relação a/agl 0,32 obtiveram valores ligeiramente maiores que a referência, porém analisando a dispersão dos resultados não houve diferenças significativas. O uso do polímero superabsorvente também não produziu diferenças significativas nos resultados de penetração de cloretos, quando comparado com o betão sem o adjuvante.

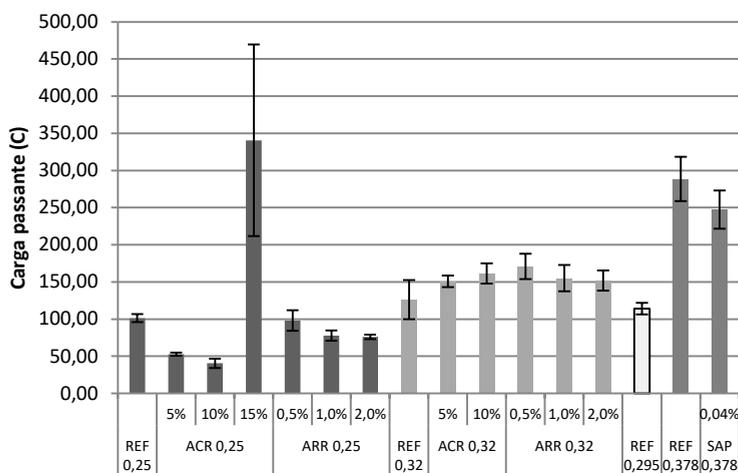


Figura 1. Valores de carga passante no ensaio acelerado de penetração de cloretos.

A norma ASTM C 1202/2012 indica a qualidade do betão à penetração de cloretos conforme o valor de carga total passante, sendo que menores de 100 C é indicada penetração negligenciável ao íon cloreto, e de 100 a 1000 C uma penetração muito baixa. As amostras com relações a/agl 0,25 expressam em sua maioria penetrabilidade negligenciável do íon cloreto, os demais betões se situam na categoria de penetrabilidade muito baixa dos íons cloretos.

Quanto as diferentes relações a/agl utilizadas, pode-se verificar que os resultados dos betões com relações a/agl 0,25, 0,295 e 0,32 obtiveram valores bastante próximos, com o valor de carga passante crescendo com o aumento da relação a/agl, o betão com relação a/agl 0,378 obteve um valor 1,84 vezes maior que o betão com relação 0,25. Portanto quanto maior a relação a/agl maior será a penetração dos íons cloreto devido a maior porosidade presente nos betões com maiores relações a/agl.

## 6.2.- Penetração de cloretos nos primeiros minutos

Nos ensaios realizados não houveram grandes variações dos valores de corrente passante medidos entre os quatro provetes, também não foi verificado aumento expressivo de temperatura. Como não houve aumento de temperatura das soluções o patamar das correntes passantes foi estável.

Como não houveram variações consideráveis nas medidas de corrente passante, constatou-se que ao multiplicar a média das correntes iniciais pelo tempo do ensaio (72.000 segundos) obtém-se valores muito próximos dos resultados do ensaio completo, conforme pode ser verificado na Fig. 2, onde as barras da esquerda são os valores medidos no ensaio e as barras da direita são os valores das cargas iniciais extrapoladas para todo o tempo de ensaio. Portanto uma opção para tornar mais rápidos os ensaios é a realização da medição das cargas passantes iniciais, que poderia ser realizada por poucos minutos, e extrapolação

destas cargas iniciais para o restante do tempo de ensaio, isto para ensaios que utilizem baixas diferenças de potencial e que não apresentem aumento de temperatura.

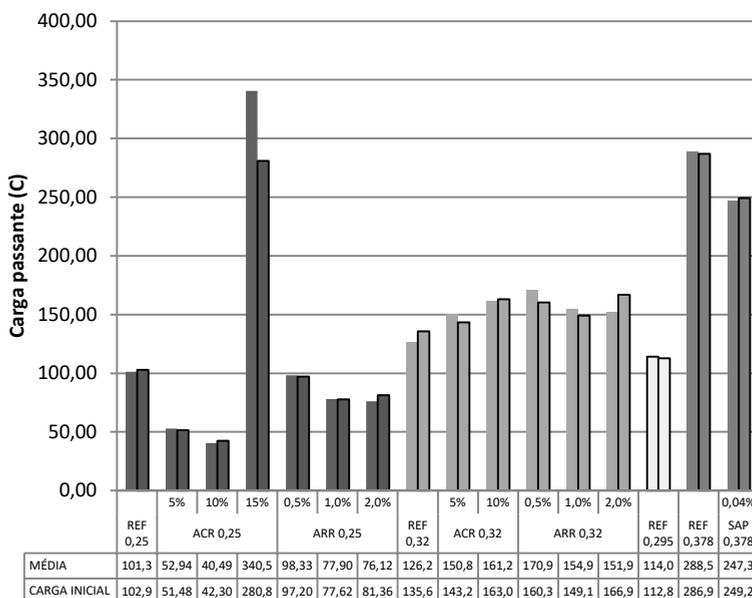


Figura 2. Correntes passantes na média dos ensaios realizados e na extrapolação das médias das cargas iniciais.

### 6.3.- Concentração de íons de cloreto

A Figura 3 mostra os valores das concentrações de íons cloreto, em relação à massa de betão, nas distâncias de 0 a 5 mm (barras da esquerda) e de 5 a 10mm (barras da direita) de profundidade, nos provetes ensaiados nos ensaios acelerados de penetração de cloretos. Analisando os resultados, percebe-se que para os betões de relação a/agl 0,25 o uso dos adjuvantes redutores e compensadores a penetração dos íons cloreto diminuíram a entrada de cloretos, indicando que os adjuvantes melhoraram o desempenho destes betões quanto a penetração de cloretos, porém o betão com 15% de adjuvante compensador de retração não seguiu este padrão.

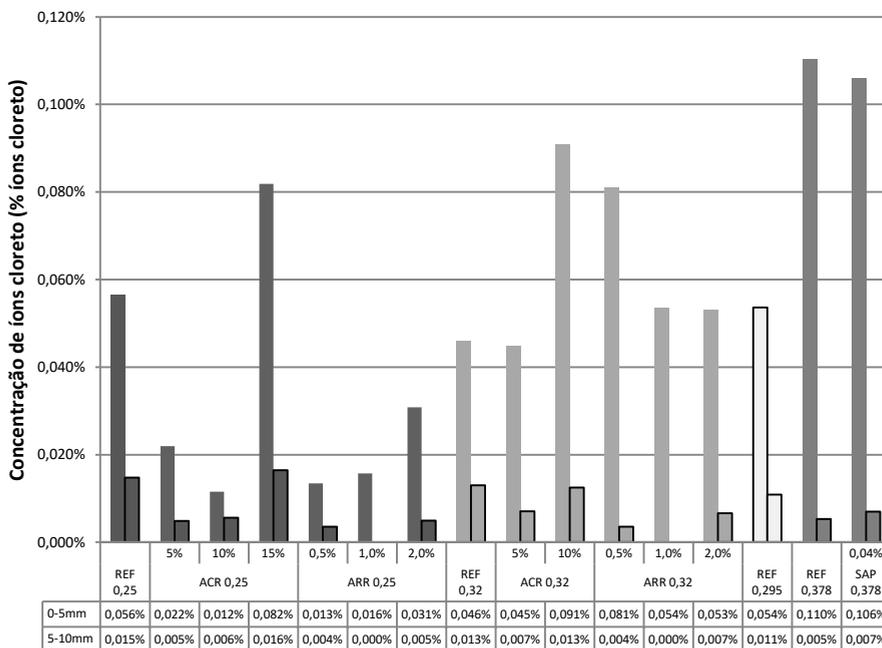


Figura 3. Concentrações de íons cloreto (% íons cloreto no betão) nas distâncias de 0 a 5mm e de 5 a 10mm de profundidade.

A maioria dos betões produzidos com adjuvantes mitigadores de retração com relação a/agl 0,32 obtiveram valores ligeiramente maiores que a referência, porém o uso de 10% de adjuvante compensador de retração e 0,5% de adjuvante redutor de retração apresentaram valores expressivamente maiores que a referência.

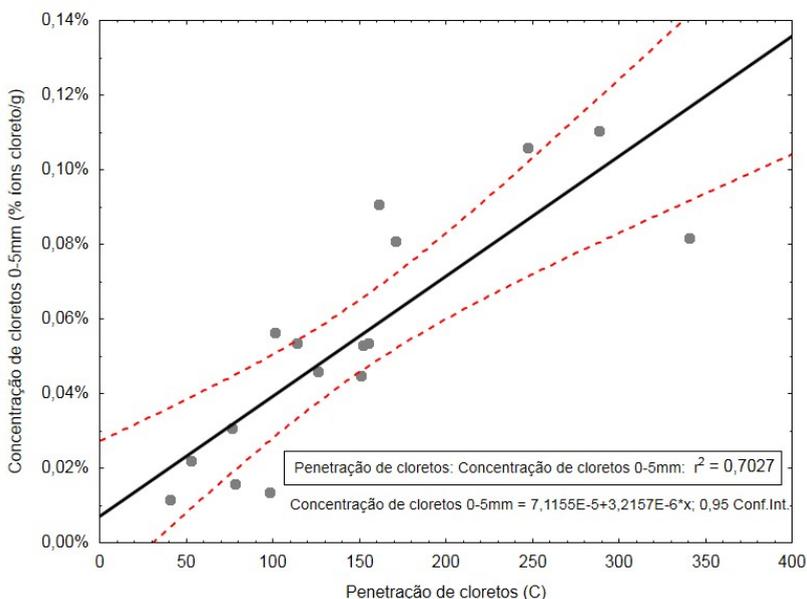
O uso do polímero superabsorvente apresentou valor próximo ao da referência, não alterando muito o resultado.

Nos betões sem adjuvantes mitigadores de retração pode-se verificar que os resultados dos betões com relações a/agl 0,25, 0,32 e 0,295 obtiveram resultados bastante próximos, porém o betão com relação a/agl 0,378 obteve um valor 195% maior que o betão com relação 0,25, indicando que quanto maior a relação a/agl maior foi a penetração dos íons cloreto.

Os baixos valores de concentração das amostras retiradas de 5 a 10mm indicam que a maior parte dos íons cloretos que ingressaram no betão estavam na faixa de 0 a 5mm.

Observa-se na Fig 4 que a penetração de cloretos e a concentração de cloretos de 0 a 5 mm tem uma correlação forte ( $r^2 = 0,7027$ ) e que são directamente proporcionais. Portanto isto indica que o ensaio de penetração de cloretos é eficiente para medir a qualidade dos betões frente a penetração dos íons cloreto, sem que sejam necessárias análises químicas e

demorados ensaios de difusão, pois quanto maior o valor de corrente total passante, maior a quantidade íons cloreto que ingressaram no betão.



**Figura 4.** Correlação entre penetração de cloretos e concentração de cloretos de 0 a 5mm.

## 7.- CONCLUSÕES

Os betões produzidos com os adjuvantes mitigadores de retração não alteraram significativamente os parâmetros de durabilidade dos betões estudados, portanto, podem ser utilizados em estruturas de betão que necessitem de elevada durabilidade, excluindo o betão produzido com 15% de adjuvante compensador de retração, que apresentou ser uma dosagem excessiva. Observou-se que relação água/aglomerante é um dos factores mais importantes no proporcionamento dos betões quando se busca uma alta durabilidade, pois ele afecta directamente na estrutura dos poros que por sua vez tem grande influência na penetração de agentes agressivos.

Em relação aos resultados de penetração de cloretos, os dados obtidos foram bastante satisfatórios, onde todos os betões analisados obtiveram penetrabilidade de íons cloreto muito baixa ou negligenciável conforme ASTM C 1202 [11].

Os resultados da análise de concentração de cloretos nos 5 primeiros milímetros demonstraram uma boa correlação com os resultados de penetração de cloretos ( $r^2=0,7027$ ), portanto a carga passante pelo ensaio de penetração acelerada de cloretos realmente indica a maior ou menor capacidade de entrada dos íons cloreto nos betões.

O ensaio de penetração acelerada de cloretos, conforme metodologia utilizada pode ter seu tempo drasticamente reduzido de 20 horas para apenas 10 minutos, extrapolando a carga que passa pelo corpo de prova durante estes 10 minutos para as 20 horas, desta forma o resultado da carga total passante será muito próximo do valor caso o ensaio seja realizado por completo. Porém devido ao pouco tempo de ensaio, no caso de ser realizado em 10 minutos, a concentração de cloretos nos primeiros milímetros será muito menor do que se o ensaio fosse realizado por completo.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Sabet, F. A., Libre, N. A., Shekarchi, M., ‘Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash’, *Construction and Building Materials* **44** (2013) 175-184.
- [2] Bentz, D. P., Jensen, O. M., ‘Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking’, *Cement & Concrete Composites* **26** (2014) 677-685.
- [3] Hartmann, C., Jeknavorian, A., Silva, D., Benini, H., ‘Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos.’ In: ‘Concreto – Ciência e Tecnologia.’ 1st Edn (Ibracon, São Paulo, 2011).
- [4] Repette, W. L. ‘Concretos para Fins Especiais e de Última Geração.’ In: ‘Concreto – Ciência e Tecnologia.’ 1st Edn (Ibracon, São Paulo, 2011).
- [5] Melo Neto, A.A., ‘Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada’, Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, (São Paulo, 2008).
- [6] Jensen, O. M., Hansen, P. F., ‘Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background’, *Cement and Concrete Research* **31** (2001) 647-654.
- [7] NBR 15823-1:6: Concreto auto-adensável. Rio de Janeiro, 2010.
- [8] NBR 7211. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- [9] ASTM C1202-12. Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration. PA: ASTM International, 2012.
- [10] Calçada, Luciana M. L., ‘Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto’, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, (Florianópolis, 2004).
- [11] ASTM C1152-12. Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. PA: ASTM International, 2012.