



MÉTODOS DE ENSAIOS ACELERADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO ÍONS CLORETO E SUA COMPARAÇÃO COM O ENSAIO NT BUILD 443

FANTON, Tássia (1); BENDER, João Antônio Modernel (2); MULLER, Franciele (3); GUIMARÃES, André Tavares da Cunha (4)

- (1) Universidade Federal De Santa Maria, tassiafanton@gmail.com
(2) Universidade Federal De Santa Maria, seed44863@hotmail.com
(3) Universidade Federal De Santa Maria, francielemullerribeiro@gmail.com
(4) Universidade Federal De Santa Maria, atcg@vetorial.net

RESUMO

Uma das maneiras de prever a vida útil de uma estrutura de concreto armado inserida em um ambiente que contenha a presença do agente agressivo íon cloreto é a partir da determinação do coeficiente de difusão íons cloreto. No entanto, a determinação desse parâmetro por meio de difusão pura, a partir de ensaios normatizados, demanda um período mínimo de contaminação de 35 dias. Assim sendo, o presente estudo teve como objetivo analisar o comportamento do coeficiente de difusão íon cloreto (D) em um traço de concreto dosado com cimento do tipo pozolânico a partir da aplicação de dois métodos alternativos de ensaio, um contendo uma solução contaminante de NaCl com concentração de 250g/dm³ e outro contendo uma solução saturada de NaCl. As idades de contaminação analisadas variaram entre 7, 14, 21 e 35 dias. Os resultados obtidos para o coeficiente de difusão a partir do ensaio NaCl 250g/dm³ apresentaram resultados satisfatório para a idade de contaminação de 21 dias, já para o método em solução saturada os resultados foram satisfatórios em idade de contaminação de 7 dias quando comparados com o ensaio NT BUILD 443. Além disso, analisou-se o comportamento da concentração superficial de cloretos (Cs) no tempo para os ensaios alternativos, onde verificou-se que a Cs para o ensaio em solução saturada foi a que menor apresentou variação no tempo. Deste modo, evidencia-se que talvez a utilização de uma solução contaminante com elevada concentração de cloretos para concretos que apresentam baixo valor de D, seja mais eficaz, uma vez que a solução de CRANK (1975) para a segunda lei de Fick, adota como simplificação a Cs sendo constante no tempo.

Palavras-chave: Vida útil, Íon cloreto, Coeficiente de difusão.

ABSTRACT

One of the ways to predict the useful life of a reinforced concrete structure exposed in an environment containing the presence of the chloride ion aggressive agent is by determining the chloride diffusion coefficient. The determination of this parameter by means of pure diffusion, under standardized tests, requires a minimum contamination period of 35 days. Thus, the objective of this work is analyzing the behavior of the chloride diffusion coefficient (D) in concrete dosed with pozzolan cement by application of two alternative test methods, one containing a NaCl contaminant solution with a concentration of 250g/dm³ and another containing a saturated solution of NaCl. The contamination ages analyzed ranged from 7, 14, 21 and 35 days. The results obtained for the diffusion coefficient by the NaCl test with concentration of 250 g/dm³ presented satisfactory results for the age of contamination of 21 days and for the method in saturated solution the results were satisfactory at the 7 days when compared with the NT BUILD 443. In addition, the behavior of the surface chloride concentration (Cs) in time was analyzed for the alternative test methods, where it was verified that the the Cs for the test in saturated solution presented the lowest variation in time. Thus, there is possible evidence

that the use of a contaminant solution with a high concentration of chlorides for concretes with low D value is more efficient, since the solution of CRANK (1975) for the second law of Fick adopts as simplification to Cs being constant in time.

Keywords: Usefull life; chloride ion; diffusion coefficient

1 INTRODUÇÃO

Muito tem-se discutido sobre o estudo da durabilidade de estruturas de concreto armado ainda em sua fase de projeto, ou seja, da adoção de providências necessárias para que o elemento estrutural possa garantir requisitos de funcionalidade, resistência e estabilidade a longo de sua vida útil, sem que haja uma perda significativa da sua utilidade ou se faça necessário uma manutenção excessiva não programada (BERTOLINI, 2010). Assim sendo, torna-se imprescindível o conhecimento da interação entre a estrutura projetada e o meio onde está inserida, do ponto de vista físico químico, bem como da modelagem dos fenômenos ali presentes (CUNHA, 2013). Logo, quando se trata da exposição das estruturas de concreto armado em ambientes que contenham a presença do agente agressivo íon cloreto, o qual é um dos principais causadores da corrosão nas armaduras, a resistência do concreto ao ingresso desse agente agressivo é um fator determinante para a vida útil da estrutura (HELENE, 1993).

Então, para fornecer aos projetistas parâmetros que visem prever como uma determinada estrutura de concreto armado irá se comportar em um ambiente que possui a presença de íons cloreto é necessário utilizar de um procedimento experimental que permite avaliar uma grandeza de forma a caracterizar o comportamento do concreto com relação à penetração de cloretos (BERTOLINI, 2010). O coeficiente de difusão íons cloreto é um indicador de durabilidade utilizável para a prevenção da corrosão de armaduras (RIBEIRO, 2014).

Logo, a avaliação de desempenho para uma estrutura exposta em um ambiente marítimo, por exemplo, pode ser realizada através da determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto. O coeficiente de difusão, pode ser obtido através de um perfil que envolve a medição de teores de íons cloretos em profundidades conhecidas do elemento analisado em um determinado tempo. A partir disso, com o uso da solução da segunda Lei de Fick, apresentada por Crank (1979), Equação 1, pode-se analisar resistência do concreto a penetração de íons cloreto em sua rede de poros.

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}}\right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$C(x, t)$ = concentração de íons de cloretos em relação à massa de cimento na profundidade (x) a partir da superfície do concreto em um dado tempo (t).

C_0 = concentração inicial de íons de cloreto no interior do concreto.

C_s = concentração superficial de cloretos admitida como constante.

D_{ap} = coeficiente de difusão aparente considerado constante.

t = tempo.

x = profundidade.

erfc – função complementar erro de Gauss

Torna-se interessante evidenciar que a determinação do coeficiente de difusão por meio experimental, a partir de ensaios que envolvam difusão pura, é a mais confiável e pode ser realizada com ensaios normatizados por um período mínimo de contaminação de 35 dias (NT BUILD 443 (1995); prEN 12390-11:2014; ASTM 1556: 2004; T259:1980), consumindo grande quantidade de tempo. Levando isso em consideração, verifica-se a necessidade do estudo de métodos de ensaios precisos e ágeis que visem verificar o comportamento do concreto quando exposto em um ambiente com a presença de cloretos. Além disso, é imprescindível considerar o fato de que um grande esforço no meio científico vem sendo aplicado no âmbito de desenvolver ensaios que consigam determinar de forma mais ágil a resistência a penetração de cloretos nos concretos, sejam esses ensaios envolvendo difusão ou migração. (T277:1993; HUANG e YANG, 2018; LING e YANG, 2014; YANG et al, 2007; CASTELLOTE e ANDRADE, 2006)

Tendo isso em vista, a presente pesquisa visa analisar o comportamento do coeficiente de difusão (D) em concretos na condição saturada, a partir de ensaios com menor tempo de contaminação e com uma solução contaminante apresentando maior concentração de cloretos do que o previsto no ensaio normatizado NT BUILD 443 (1995), além disso, pretende-se analisar também, o comportamento da concentração superficial de cloretos (C_s) ao longo do tempo uma vez que a solução da segunda lei de Fick realizada por Crank (1979) adota que a mesma se mantém constante ao longo do tempo. Para tanto, é importante salientar que foi utilizado um traço de concreto dosado com cimento do tipo pozolânico, os ensaios foram realizados em idades de contaminação que variam entre 7, 14, 21 e 35 dias, a partir do que é chamado nesta pesquisa de Método Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³ e Método Acelerado em Solução Saturada – NaCl 400g/dm³ de forma que os resultados obtidos serão comparados com encontrados a partir da aplicação do ensaio normatizado NT BUILD 443 (1995).

2 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Características do concreto analisado

Para o presente estudo realizou-se a confecção de um traço de concreto dosado com cimento pozolânico. Optou-se por esse tipo de cimento, visto que em pesquisas anteriores esse aglomerante apresentou um melhor

comportamento em relação a ação de íons cloreto quando comparado a outros cimentos (CRAUSS, 2010; BURIGO, 2017). Assim sendo, na tabela a seguir é apresentada a proporção dos materiais utilizada na dosagem do concreto.

Tabela 01 – Materiais utilizados na dosagem do concreto

Material	Unidade	Consumo
Cimento	kg/m ³	493
Areia	kg/m ³	785
Brita 1	kg/m ³	925
Água	kg/m ³	197
*superplastificante	%	2,50
Fator água/cimento	-	0,40
*referente ao peso de material cimentício		

Fonte: Próprio autor

Realizada a confecção do concreto moldou-se as amostras a partir de uma única betonada, em corpos de prova cilíndricos (CPs), com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, salienta-se que todo o processo de moldagem e cura dos CPs obedeceu ao exposto na NBR 5738:2003. Passados 28 dias da data da moldagem dos CPs realizou-se o ensaio de resistência à compressão de acordo com NBR 5739:2007, sendo o valor obtido de 43,50MPa. É válido expor, também, que antes de serem submetidas à contaminação as amostras permaneceram em cura úmida por um período de seis meses.

Passado o período de cura, os CPs foram fatiados em 4 partes de aproximadamente 4cm. Após isso, tendo em vista que os ensaios acelerados são realizados com o concreto estando saturado, as amostras foram submetidas ao processo de saturação por fervura conforme os itens 6.2 e 6.3 da NBR 9778:2009, estando, assim, prontas para serem contaminadas.

2.2 Contaminação com NaCl e extração das amostras na forma pulverulenta.

Levando em consideração que para os todos ensaios utilizados nessa pesquisa as amostras deverão ser contaminadas a partir da imersão em uma solução de cloreto de sódio (NaCl) mais água, foi necessário revestir com resina epóxi as laterais e uma das faces planas das amostras a fim de se garantir estanqueidade nas faces revestidas e, assim, um fluxo unidirecional da solução contaminante. Realizada a aplicação da resina epóxi e estando a mesma seca, as amostras foram imersas em uma solução de água destilada saturada com hidróxido de cálcio por um período de três dias, esse processo foi realizado tendo em vista recuperar

qualquer massa de água que a amostra possa ter perdido durante o seu processo de revestimento.

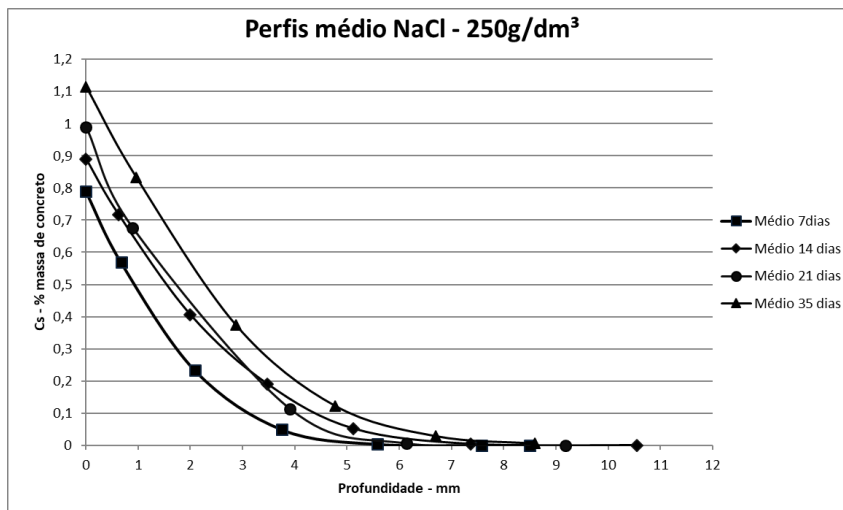
A partir disso, procedeu-se a contaminação das amostras, de forma que, para o método Acelerado Modificado NaCl 250g/dm³ as amostras foram introduzidas em recipientes que continham uma solução de 250 g +/- 1g de cloreto de sódio para 1dm³ de água destilada. O volume empregado da solução foi necessário para cobrir as amostras por completo e, ainda, manter uma relação mínima entre o quociente do volume da solução contaminante de NaCl pela superfície da amostra exposta ao contaminante de 12,5ml/cm². O procedimento para o método em solução saturada adotou uma relação de 400g de NaCl para 1dm³ de água destilada, já a contaminação das amostras submetidas à análise pelo método Acelerado NT BUILD (1995) – NaCl 165g/dm³ ocorreu de forma análoga, modificando-se apenas a concentração da solução que agora é de 165g de NaCl para 1 dm³ de água destilada. Finalizada a contaminação as amostras foram armazenadas em laboratório com temperatura controlada de 23°C até a data de sua extração.

Efetivado o tempo de contaminação, deve-se realizar a extração do material na forma pulverizada. Para isso, utilizou-se de um equipamento, projetado para tal finalidade. O processo de obtenção das amostras pulverizadas foi efetuado em 11 camadas sendo que a primeira e a segunda camada foram extraídas com a profundidade de 1mm e o restante com 2mm o controle das profundidades das camadas foi efetuado através do uso de um paquímetro em três pontos ao longo do diâmetro exposto à extração da amostra, obtendo-se assim a profundidade média das camadas. Depois de pulverizadas as amostras foram armazenadas em sacos hermeticamente fechados, para posterior obtenção dos perfis de penetração de cloretos por potenciometria volumétrica, os perfis obtidos, bem como os resultados encontrados serão discutidos a seguir.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

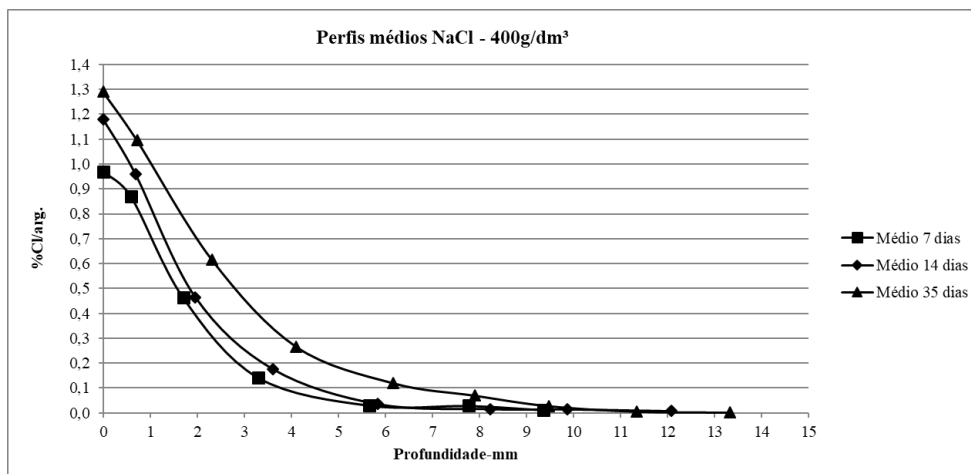
A partir da aplicação da potenciometria volumétrica tornou-se possível traçar os perfis de penetração de cloreto, os quais relacionam a concentração superficial de cloretos em relação à massa de concreto com a profundidade. Assim sendo, as Figuras 01 e 02 apresentam os perfis médios de penetração de cloretos a partir da regressão do método dos mínimos quadrados para os métodos de contaminação Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³ e Método Acelerado Saturado - NaCl 400g/dm³, respectivamente.

Figura 01 – Perfis médios de penetração de cloretos – NaCl 250g/dm³



Fonte: Próprio autor

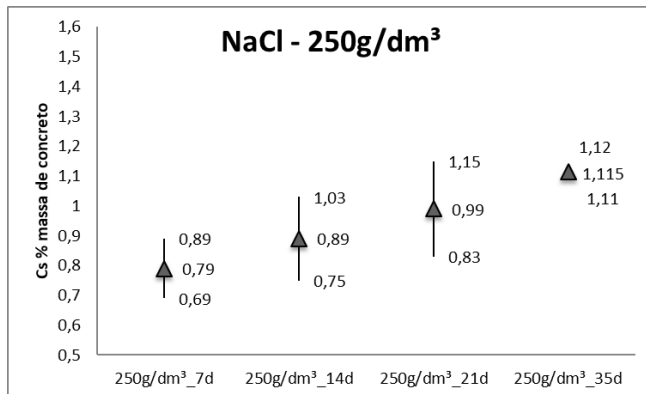
Figura 02 – Perfis médios de penetração de cloretos – NaCl 400g/dm³



Fonte: Próprio autor

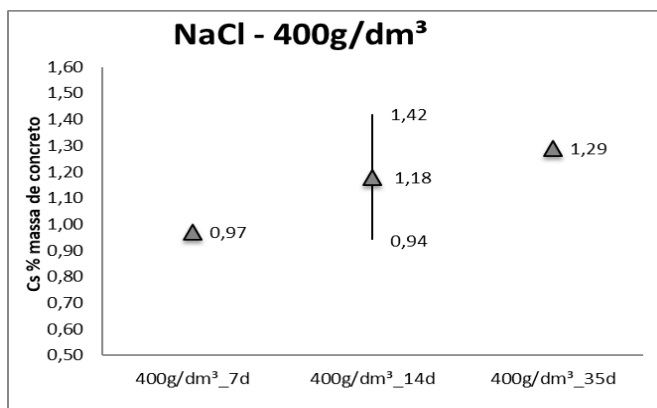
Analisando as Figuras 01 e 02, apresentadas anteriormente, pode-se notar que os valores médios da concentração superficial de cloretos (Cs) obtidos para aplicação do ensaio Acelerado Modificado NaCl 250g/dm³ e para o ensaio Acelerado Modificado Saturado – NaCl 400g/dm³ apresentaram variação do Cs ao longo do tempo. Desta forma, tendo em vista tornar mais clara tal constatação é apresentado a seguir as Figuras 03 e 04 as quais relacionam os valores máximos, médios e mínimos para o Cs obtidos pelos ensaios Acelerado Modificado NaCl 250g/dm³ e Acelerado Modificado Saturado – 400g/dm³ nas diferentes idades de contaminação.

Figura 03 – Valores máximos, mínimos e médios para Cs – NaCl 250g/dm³



Fonte: Próprio autor

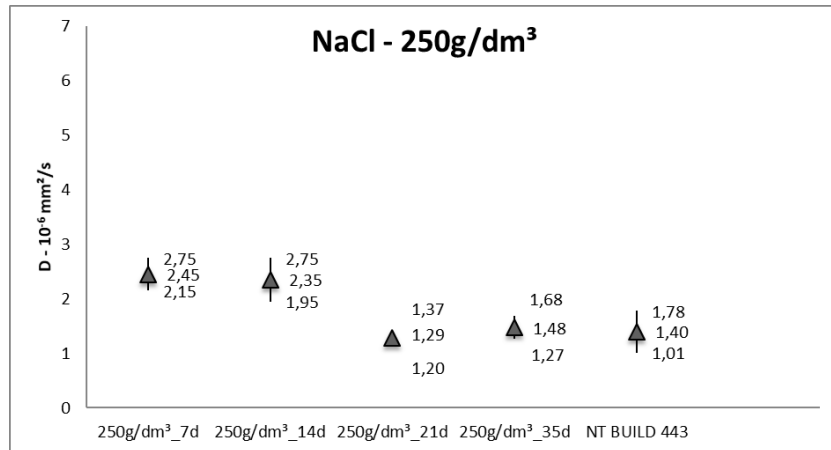
Figura 04 – Valores máximos, mínimos e médios para Cs – NaCl 400g/dm³



Fonte: Próprio autor

Já no que diz respeito ao coeficiente de difusão (D) encontrado através do Método Acelerado Modificado NaCl 250g/dm³ o mesmo apresentou valores muito próximos nas idades de 21 e 35 dias quando comparado com o ensaio normatizado NT BUILD 443 (1995) NaCl 165g/dm³ na idade de contaminação de 35 dias, conforme evidenciado na Figura 05.

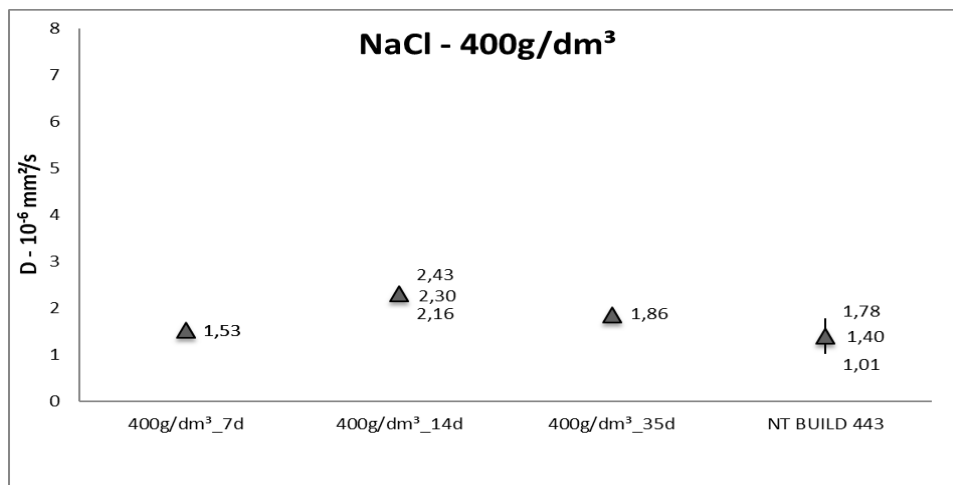
Figura 05 – Valores máximos, mínimos e médios para D – NaCl 250g/dm³



Fonte: Próprio autor

Com relação aos resultados obtidos para o ensaio Acelerado Modificado Saturado – 400g/dm³ pode-se verificar que o valor do coeficiente de difusão (D) encontrados pelo para a idade de contaminação de 7 dias ficou muito próximo do valor médio encontrado pelo método normalizado NT BUILD 443 (1995), conforme apresentado na Figura 06.

Figura 06 – Valores máximos, mínimos e médios para D – NaCl 250g/dm³



Fonte: Próprio autor

3.1 Análise da Influência do Cs nos resultados do D

Visando analisar quão significativa é a variação do Cs nos resultados obtidos para o coeficiente de difusão íons cloretos (D), haja vista, que a solução da segunda Lei de Fick considera que o Cs é constante ao longo do tempo, utilizou-se da constatação realizada por (Guimarães et al, 2011), a qual apresenta uma relação linear entre o coeficiente de difusão considerando o Cs variando ao longo do tempo e o coeficiente de difusão considerando Cs constante ao longo do tempo, dessa forma, surge, então, uma constante de proporcionalidade “Y”, conforme Eq. 2. Além disso, é válido expor, que na sua análise, Guimarães et. al (2011) considera que a variação da concentração superficial de cloreto (Cs) é

uma função exponencial do tempo, de acordo com a Eq. 3. Por fim, o autor constata que o coeficiente de proporcionalidade “Y” varia linearmente com o expoente “n” da função exponencial C_s no tempo, conforme é apresentado na Eq. 4.

$$D_{Cs\ const} = Y \cdot D_{Cs\ var} \quad (\text{Equação 2})$$

$$C_s = k \cdot t^n \quad (\text{Equação 3})$$

$$Y = 1,25n + 1 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$D_{Cs\ const}$ = coeficiente de difusão considerando C_s constante no tempo

$D_{Cs\ var}$ = coeficiente de difusão considerando C_s variável no tempo

Y = coeficiente de proporcionalidade

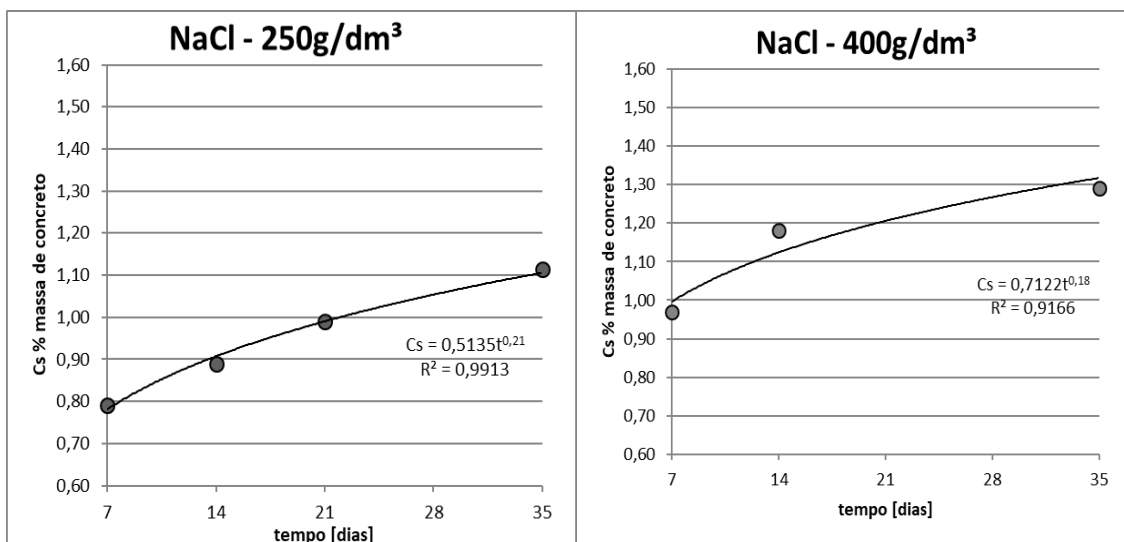
C_s = concentração superficial de cloretos

k = constante de proporcionalidade

t = tempo

Desta forma, visando aplicar o constatado por Guimarães et al (2011) plotou-se um gráfico relacionado os valores do C_s no tempo, para ambos os métodos de ensaio analisados e, através de um ajuste de curva exponencial, relacionou-se a variação do C_s no tempo como uma função exponencial, determinando-se, assim, o valor de “n”, conforme apresentado na Figura 08.

Figura 06 – Valores máximos, mínimos e médios para D – NaCl 250g/dm³



Fonte: Próprio autor

Desta maneira, através da Equação 3, constatou-se que o coeficiente de proporcionalidade “Y” para o Método Acelerado Modificado – NaCl 250g/dm³ equivale a 1,26, provocando assim, um acréscimo de 26 no

valor do D obtido considerando Cs constante ao longo do tempo. Já no que diz respeito ao ensaio Acelerado Modificado Saturado – NaCl 400g/dm³ obteve-se um coeficiente de proporcionalidade “Y” igual a 1,23 o que provoca um aumento de 23% no valor do D considerando Cs constante ao longo do tempo.

Além disso, salienta-se que Guimarães et al (2011) realizou um estudo sobre um concreto dosado com cimento (Cem I 42.5R) possuindo uma relação a/c de 0,50, variando as idades de contaminação em 7, 21 e 35 dias em uma solução contaminante de NaCl - 165g/dm³, verificando assim que o concreto estudado apresentou uma variação muito pequena do Cs ao longo do tempo para um coeficiente de difusão relativamente alto na ordem de $10,38 \cdot 10^{-6}$ mm²/s. Tal constatação difere do encontrado na pesquisa, no entanto, é válido expor que os valores para o coeficiente de difusão encontrados na pesquisa são bem inferiores aos analisados por Guimarães et al (2011), assim sendo, o fato do Cs vir a variar ao longo do tempo pode estar relacionando com a interligação da rede de poros, de modo que quanto mais interligada for essa rede mais rápido o valor do Cs se estabiliza no tempo.

4 CONCLUSÃO

Partindo do exposto anteriormente pode-se concluir que o valor dos coeficientes de difusão calculados para o traço de concreto analisado, foram satisfatórios nas idades de contaminação de 21 e 35 dias quando aplicado o método de ensaio Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³ e comparado esses valores com o ensaio NT BUILD 443. Já no que diz respeito aos resultados obtidos com o ensaio Acelerado Modificado Saturado- NaCl 400g/dm³ um valor satisfatório foi alcançado na idade de 7 dias quando o método é comparado com o ensaio normatizado.

Com relação à concentração superficial de cloretos observou-se que a mesma variou com o passar do tempo no traço de concreto estudado na aplicação dos dois métodos de ensaios propostos. Porém, quando analisada a interferência dessa variação nos valores do coeficiente de difusão calculado com a concentração superficial sendo constante ao longo do tempo, o método acelerado modificado saturado apresentou uma menor variação no valor do D.

Além disso, verificou-se que o fato do Cs vir a variar ou não ao longo do tempo pode estar relacionado com o comportamento do material quando o mesmo é exposto em ambientes com presença de cloretos, de modo que, em concretos que apresentem uma rede de poros mais interligada, ou seja, os que apresentam menos resistência ao ataque de cloretos, o Cs venha a estabilizar de maneira mais rápida quando comparado a um concreto que apresenta um melhor comportamento frente ao ataque desse agente agressivo, causando, assim, uma variação do Cs ao longo do tempo.

Além disso, pode-se destacar também que a solução proposta por Crank (1979) da segunda lei de Fick, a qual considera que a concentração superficial de cloretos e que o coeficiente de difusão se mantêm constante ao longo do tempo, é muito bem aplicável aos concretos que apresentaram um maior valor para D, ou seja, aqueles que possuem uma rede de poros mais interligada. Assim sendo, alerta-se para o fato que o coeficiente de difusão para concretos resistentes a penetração de cloretos, calculados com as simplificações de que o Cs e o D são constantes ao longo do tempo, podem não expor o seu valor real.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2003.
- _____. **NBR 5739**: Concreto-Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos-Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. "**Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration**". AASHTO T259-80 , Washington, D.C., U.S.A., 1980.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. "**Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride**", AASHTO T277-93, Washington, D.C., U.S.A., 1993
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion**. ASTM, C. 1556-04. Pennsylvania, Estados Unidos, p. 7, 2004.
- BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- BUILD, N. T. 443. **Concrete, hardened: accelerated chloride penetration**. Nordtest method, 1995.
- BURIGO, Gabrielle Melo. **Estudo sobre o efeito da difusão de cloreto no concreto com alteração na relação água/cimento e no tipo de cimento**. Engenharia Civil-Pedra Branca, 2017.
- CASTELLOTE, M.; ANDRADE, Carmen. Round-Robin test on methods for determining chloride transport parameters in concrete. **Materials and Structures**, v. 39, n. 10, p. 955, 2006.
- CRANK, John et al. **The mathematics of diffusion**. Oxford university press, 1979.

- CRAUSS, Camila. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. 2010.
- CUNHA, Manuel et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. Elsevier Brasil, 2013.
- GUIMARÃES, A. T. C. et al. Behaviour of chloride content at the surface of concrete in submerged test conditions. **In: International Conference on Durability of Building Materials and Components**. Porto: Portugal. 2011.
- HUANG, Kang-Shiun; YANG, Chung-Chia. Using RCPT determine the migration coefficient to assess the durability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 822-830, 2018.
- LIN, K. T.; YANG, C. C. A simplified method to determine the chloride migration coefficient of concrete by the electric current in steady state. **Computers and Concrete**, v. 13, n. 1, p. 117-133, 2014.
- prEN 12390-11:2014 (European standard), **Testing hardened concrete – Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion**, April 2014.
- RIBEIRO, D. V. et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise**. Editora Campus, 2014.
- YANG, C. C.; CHIANG, S. C.; WANG, L. C. Estimation of the chloride diffusion from migration test using electrical current. **Construction and building materials**, v. 21, n. 7, p. 1560-1567, 2007.