



VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

MÉTODOS DE ENSAIOS ACELERADOS: DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EM CONCRETOS NA CONDIÇÃO SATURADA

Tassia Fanton¹, João Antonio Modernel Bender², Leandro Gularte Blois³, Franciele Müller⁴, André T. C. Guimarães⁵

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: tassiafanton@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: bender@furg.br

³ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: leandroblois.eng@gmail.com

⁴ Universidade Federal do Rio Grande - Escola de Engenharia
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: francielemullerribeiro@gmail.com

⁵ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: atcg@vetorial.net

RESUMO

O coeficiente de difusão de cloretos indica a capacidade que um determinado tipo de concreto resiste à penetração de cloretos, sendo assim, utilizado para a previsão da vida útil de serviço de uma determinada estrutura de concreto armado exposta em ambientes que contenham esse tipo de agente agressivo. Sua determinação experimental é demorada consumindo grande quantidade de tempo. Visando isso, o presente estudo analisa o comportamento do coeficiente de difusão (D) em concretos na condição saturada, testando uma concentração maior de NaCl e idades de contaminação inferiores às previstas nos ensaios normatizados, além disso, objetiva-se analisar o comportamento da concentração superficial de cloretos (Cs) ao longo do tempo. Assim sendo, concluiu-se que o valor de Cs, para um concreto dosado com cimento pozolânico, apresentou variação, com tendência crescente ao passar da idade. Além disso, o valor de D, obtido pelo método proposto, apresentou valores próximos aos obtidos pelos ensaios normatizados em idades de contaminação de 21 e 35 dias.

1. INTRODUÇÃO

Muito se tem discutido acerca da durabilidade das estruturas de concreto armado e protendido, em sua fase de projeto, visto que, a resistência do material deixou de ser a única característica cobijada entre os projetistas. Segundo Helene (1993), a vida útil de uma estrutura de concreto armado ou protendido, está diretamente ligada ao período de tempo necessário para que agentes agressivos penetrem na rede de poros ou fissuras do concreto, atingindo a

armadura e provocando sua corrosão. Para a garantia da vida útil, ou seja, do período pelo qual uma estrutura conserva as suas características mínimas de funcionalidade, resistência e aspectos exigidos, torna-se indispensável o estudo de fatores que possam vir a ocasionar a destruição da película passiva que se forma sobre o aço envolvido pelo concreto. A película passiva é uma proteção química conferida ao aço devida à alta alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto. A perda ou ruptura dessa proteção, ainda que localizada, pode desencadear um processo de deterioração, na maioria das vezes, progressivo e autoacelerante (Ribeiro *et al.*, 2014). O filme passivante que envolve o aço é estável quando o *pH* da solução no interior do concreto endurecido for maior que 12 e quando não houver presença de cloretos (Guimarães, 2000). Para estruturas em concreto armado, expostas em ambiente marítimo, a resistência ao ingresso de cloretos é um fator determinante para a sua vida útil, uma vez que, dentre os íons despassivantes, os cloretos são os principais causadores da corrosão nas armaduras (Rincón *et. al.*, 1998).

Quando um concreto se encontra exposto em um ambiente rico em sais, o mesmo pode ser contaminado através de agentes presentes no meio em que esse material foi inserido. Isso ocorre devido ao seu carácter poroso e a existência de uma solução alcalina na sua rede de poros, assim, os íons de cloro podem penetrar no interior do concreto e serem transportados desde superfície mais exposta até as camadas mais internas. Dentre os mecanismos de transporte de cloretos através da rede de poros ou fissuras, destaca-se a difusão. Tal mecanismo ocorre por meio de um gradiente de concentração, e não por um diferencial de pressão (Rodrigues, *apud* Neville, 1997). Tomando-se como exemplo um corpo de concreto submerso na água do mar, toda a rede de poros se encontra saturada de água, e o transporte ocorre devido ao gradiente de concentração que existe entre as camadas mais externas, com maior concentração de cloretos, em relação às camadas mais internas, as quais possuem menor concentração de íons cloreto (GIL, 2009). Uma das expressões matemáticas mais empregadas para efetuar a previsão da velocidade de penetração de cloretos, é a solução da segunda Lei de Fick a qual considera *D* e *C_s* constantes (CRANK, 1975). Geralmente, a previsão da vida útil das estruturas de concreto é realizada através da medição dos teores de íons cloreto em profundidades conhecidas do elemento analisado em um determinado tempo. A partir desses dados, torna-se possível traçar o perfil de penetração de cloretos e determinar, assim, o coeficiente de difusão de cloretos (*D*).

A determinação do coeficiente de difusão, em laboratórios, pode ser realizada com um período de contaminação mínimo, de acordo com ensaios normatizados, de 35 dias. Levando isso em consideração, torna-se possível observar a necessidade da existência de métodos de ensaios precisos e ágeis capazes de avaliar como os materiais de uma determinada estrutura irão se comportar em ambientes que possuem a presença de cloretos. Além disso, é imprescindível considerar o fato de que trabalhos científicos, principalmente nos cursos de pós-graduação, dispõem de um curto período de tempo para serem desenvolvidos o que justifica a importância de obter-se resultados em um curto intervalo de tempo. Desta forma, este trabalho, investiga o comportamento do coeficiente de difusão (*D*) e da concentração superficial de cloretos (*C_s*) quando ensaios são realizados em uma solução com concentração de cloretos superior aos métodos normatizados, com idades de contaminação de 7, 14, 21 e 35 dias.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Características do concreto estudado

Para a presente pesquisa realizou-se a confecção de um único traço de concreto, onde em sua dosagem utilizou-se cimento pozolânico com resistência à compressão aos 28 dias de idade de 32MPa e resistente ao ataque de sulfatos (CP IV 32 RS), optou-se por esse aglomerante, visto que, em pesquisas anteriores o mesmo apresentou um melhor comportamento perante aos demais tipos de cimentos quando exposto em ambientes que possuem presença de íons cloreto. Na Tabela 01 é apresentada a quantificação dos materiais utilizados na confecção do traço de concreto em questão.

Tabela 01 – Materiais utilizados na dosagem do concreto

Material	Unidade	T7
		CP IV 32 RS
Cimento	kg/m ³	493
Areia	kg/m ³	785
Brita 1	kg/m ³	925
Água	kg/m ³	197
SP - *superplastificante	%	2,50
Fator água/cimento	-	0,40
(*) : % referente ao peso de material cimentício		

As amostras de concreto foram moldadas, a partir de uma única betonada, em corpos-de-prova (CPs) cilíndricos com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, todo o processo de moldagem e cura obedeceu o exposto na *NBR 5738:2015 - Procedimento para moldagem e cura dos corpos-de-prova*. Após 28 dias da data de moldagem dos CPs, foi realizado o ensaio de resistência à compressão, sendo apresentado um valor de 43,5MPa para tal. Além disso, é válido salientar, que as amostras permaneceram em cura úmida por um período de seis meses a contar da sua data de moldagem, tempo necessário para que as reações de hidratação ocorressem quase por completo. Passado esse período, os CPs foram fatiados em 4 partes com altura aproximada de 4cm, desconsiderando-se, 1cm em cada extremidade do CP, conforme exposto na Fig. 01.

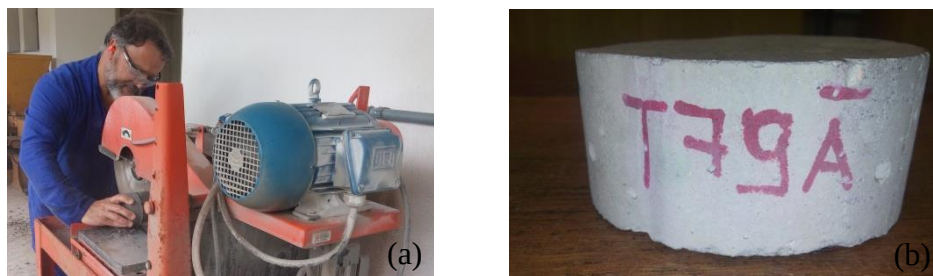


Figura 01 – Procedimento de corte das amostras de concreto. (a) Fatiamento dos CPs. (b) Perfil das amostras utilizadas na pesquisa.

2.2 Processo de saturação das amostras

Como os ensaios acelerados são executados com o concreto estando saturado, foi necessário realizar o procedimento de saturação nas amostras. Para isso, as mesmas foram imersas em água destilada à temperatura de 23°C durante 72 horas, sendo que 1/3 do seu volume foi submerso nas primeiras 4h, 2/3 nas 4h subsequentes, sendo completamente imersas nas 64h restantes. Passado esse período, foi aferido o peso das amostras em intervalos espaçados de 24 horas, até que duas pesagens consecutivas não diferissem mais que 0,5% entre si. É válido explicar, que as pesagens foram realizadas enxugando a superfície das amostras com toalhas absorventes, ou seja, a massa aferida foi da amostra com superfície seca. Completada essa etapa, as amostras foram transferidas para um recipiente cheio de água destilada e foram levadas à ebulição, permanecendo ali por 5h. Em seguida, as amostras foram resfriadas por perda natural de calor. Realizado todo esse processo, o grau de saturação das amostras é considerado como sendo de 100%. Na Figura. 02 são detalhados os procedimentos realizados na saturação das amostras.



Figura 02 – Procedimento utilizado para estabelecer a saturação das amostras. (a) Amostras imersas em 1/3 do seu volume. (b) Amostras completamente imersas por um período de 64h. (c) Ebulição das amostras por 5h.

2.3 Contaminação com NaCl e armazenamento das amostras

Para verificar o comportamento do coeficiente de difusão (D) ao longo do tempo foram realizados ensaios a partir de três métodos. Para o método que recebeu o nome nesta pesquisa de Acelerado Modificado $NaCl$ 250g/dm³, realizou-se a contaminação das amostras para as idades de 7, 14, 21 e 35 dias. Já para os método normatizado Acelerado *NT BUILD 443* (1995) $NaCl$ 165g/dm³ a idade de contaminação foi de 35 dias e para o método tradicional, o qual é já consagrado e remete a concentração de cloretos da água do mar, $NaCl$ 0,5M a idade foi de 90 dias.

Levando em consideração o fato de que para os métodos de ensaios as amostras deverão ser imersas em uma solução de cloreto de sódio mais água, torna-se necessário revestir com resina epóxi as laterais e uma das faces

planas das amostras, garantido assim estanqueidade nessas faces e um fluxo unidirecional do contaminante. Após a aplicação do revestimento e estando ele seco, 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 o intuito de recuperar massa de água que a amostra possa ter perdido durante o seu processo de revestimento e secagem da resina epóxi.

A contaminação para o método Acelerado *NT BUILD 443* (1995) *NaCl* 165g/dm³, procedeu-se de forma que as amostras foram introduzidas em recipientes que continham uma solução de 165g +/- 1g de cloreto de sódio (*NaCl*) para 1dm³ de água destilada. O volume da solução empregado foi necessário para cobrir as amostras por completo e, ainda, manter uma relação mínima entre o cociente do volume da solução de *NaCl* pela superfície da amostra exposta ao contaminante de 12,5 ml/cm². O procedimento de contaminação para as amostras nos métodos Acelerado Modificado *NaCl* 250g/dm³ e *NaCl* 0,5M ocorreu de forma análoga, modificando-se apenas a concentração da solução que agora é, respectivamente, de 250g de *NaCl* para 1 dm³ de água destilada e 30,92g de *NaCl* para 1dm³ de água destilada. A partir disso, as amostras ficaram armazenadas no laboratório com temperatura controlada de 23°C até a data de sua extração, conforme exposto na Fig.3.



Figura 03 – Processo de contaminação das amostras. (a) Amostra identificada e revestida com resina epóxi. (b) Amostra imersa em solução de *NaCl*. (c) Armazenamento das amostras em laboratório com temperatura controlada.

É válido salientar que para cada método de ensaio e cada idade de contaminação foram ensaiadas duas amostras, obedecendo, assim, o exposto na *NT BUILD 443* (1995), exceto par ao método *NaCl* 0,5M onde foi analisada apenas uma amostra para a idade de 90 dias de contaminação e para o método acelerado modificado 250g/dm³ idade de contaminação de 14 dias, visto que, até o presente momento, devido ao tempo de execução dos ensaios não foi possível obter-se resultados para mais uma amostra.

2.4 Extração do material para elaboração dos perfis de penetração de cloretos

Depois de efetivado o tempo de contaminação realizou-se a extração do material de forma pulverizada. Assim sendo, após a retirada das amostras do recipiente de armazenamento e devida aferição da massa com superfície seca, efetuou-se a limpeza da face exposta ao contaminante, através de lixamento e jato de ar comprimido. A realização desta limpeza possui o intuito de evitar uma concentração elevada de cloretos na camada inicial causada por resíduos de *NaCl*, a qual poderá interferir no primeiro ponto do perfil de penetração de cloretos.

Realizada a limpeza, a amostra é colocada em um equipamento, especialmente projetado para efetuar a sua obtenção na forma pulverulenta. Esse processo foi efetuado em 10 camadas sendo cada uma delas com profundidade aproximada de 2mm, o controle das profundidades foi realizado por meio de um paquímetro em três pontos ao longo do diâmetro da amostra tomando-se, assim, a profundidade média.

Após pulverizadas as amostras foram armazenadas em sacos fechados hermeticamente, conforme exposto da Fig. 04, para posterior obtenção do perfil de penetração de cloretos por potenciometria.



Figura 04 – Processo de extração das amostras. (a) Extração em equipamento projetado para obtenção das amostras de forma pulverizada. (b) Armazenamento da amostra pulverizada.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

Através do ensaio de potenciometria foi possível obter os perfis de penetração de cloretos para as amostras em cada idade de contaminação. A Figura 05 expõem os perfis obtidos para o de Método Acelerado Modificado NaCl 250g/dm³ nas idades de 7, 14, 21 e 35 dias de contaminação. A Figura 06 apresenta a regressão pelo método dos mínimos quadrados do perfil médio para as idades de 7, 21 e 35 dias.

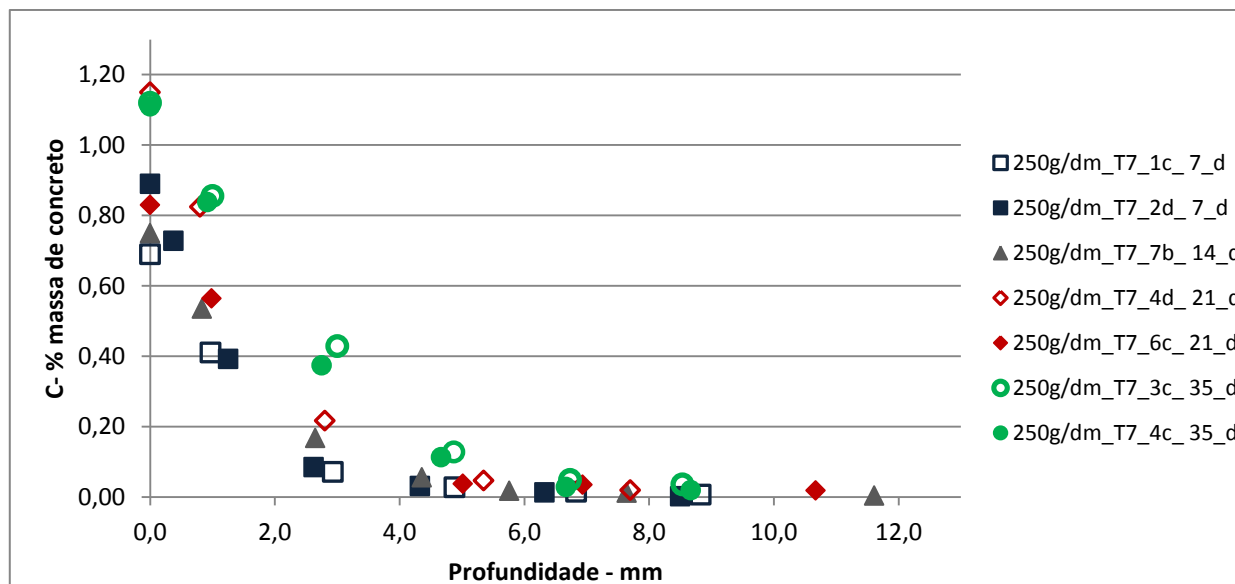


Figura 05 – Perfis de penetração de cloretos para as idades de 7, 14, 21 e 35 dias de contaminação, através do método acelerado modificado NaCl 250 g/dm³.

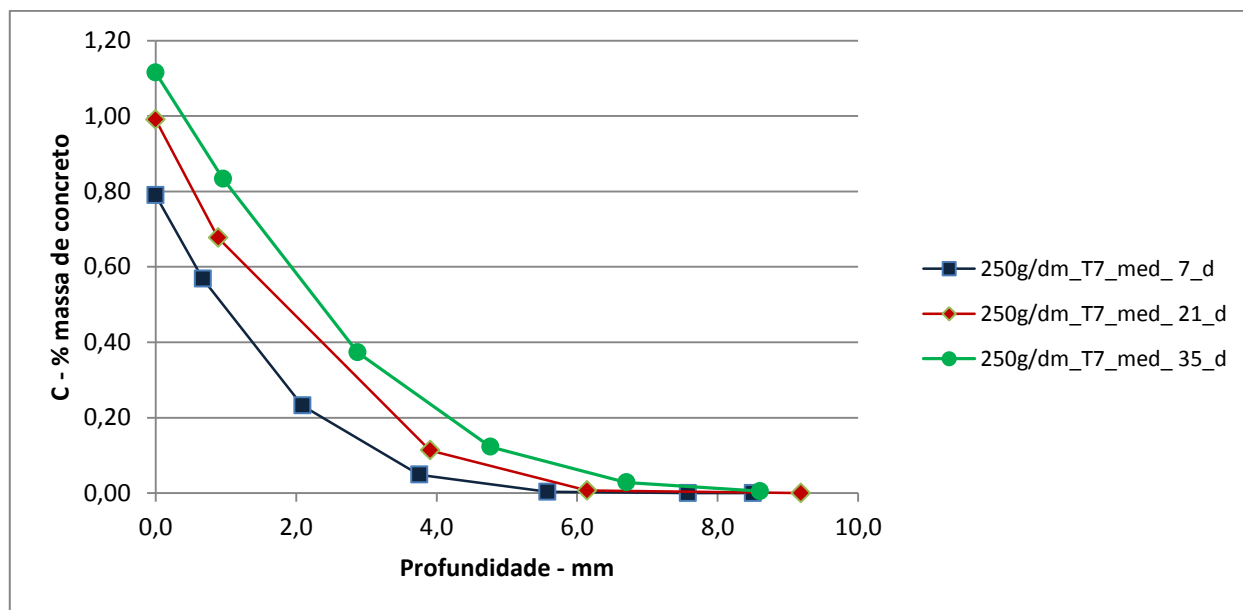


Figura 06 – Perfis médios obtidos pela regressão mínimos quadrados através do ensaio acelerado modificado NaCl 250g/dm³

Na Figura 06 apresentada anteriormente, pode-se perceber que os valores médios da concentração superficial de cloretos (Cs), obtidos para o método de ensaio acelerado modificado NaCl 250g/dm³, apresentaram determinada variação, com tendência crescente ao passar da idade de contaminação. Para uma melhor visualização é apresentada a Fig. 07 onde através do valor médio obtido para o Cs fica claro o aumento desse valor.

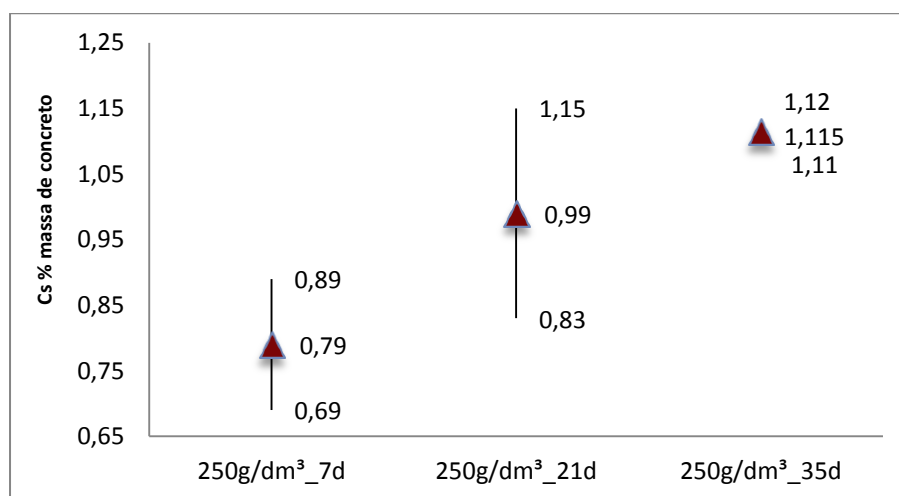


Figura 07 – Valores máximos, mínimos e médios para o Cs

Com relação aos valores encontrados para o coeficiente de difusão, através do Método Acelerado Modificado *NaCl* 250g/dm³, o mesmo apresentou resultados muito próximos nas idades de 21 e 35 dias quando comparado com os valores obtidos pelo método normatizado, Acelerado da Norma Europeia *NT BUILD* 443 (1995) *NaCl* 165g/dm³ com idade de contaminação foi de 35 dias. É valido explanar, que a comparação para a idade de 14 dias do método acelerado modificado, bem como para o método de 0,5M *NaCl* ainda não pode ser realizada, haja vista, que até o presente momento tem-se apenas o resultado de uma amostra. Assim sendo, a Tabela 02 apresenta os resultados, obtidos até então, para o coeficiente de difusão a partir dos ensaios analisados.

Tabela 02 – Métodos de ensaios e valores para o D

Traço	Testemunho	t. Cont	D . $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$	Dmédio . $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$
T7-165g/dm³	POZ_165_T7_1d	35 dias	1,78	1,40
	POZ_165_T7_7c		1,01	
	POZ_250_T7_1c	7 dias	2,75	2,45
	POZ_250_T7_2d		2,15	
T7- 250g/dm³	POZ_250_T7_7b	14 dias	1,95	1,95
	POZ_250_T7_4d	21dias	1,20	1,29
	POZ_250_T7_6c		1,37	
	POZ_250_T7_3c	35 dias	1,68	1,48
	POZ_250_T7_4c		1,27	
T7 - 0,5M	POZ_0,5_T7_5b	90 dias	1,75	1,75

Para uma melhor visualização dos resultados a Fig 08 apresenta os valores obtidos para os coeficientes de difusão no método acelerado modificado *NaCl* 250g/dm³ para as idades de 7, 21 e 35 dias, onde nota-se sobreposição significativa das barras de variação para as idades de 21 e 35 dias de contaminação, quando comparadas ao método normatizado acelerado *NT BUILD* 443 (1995) *NaCl* 165g/dm³.

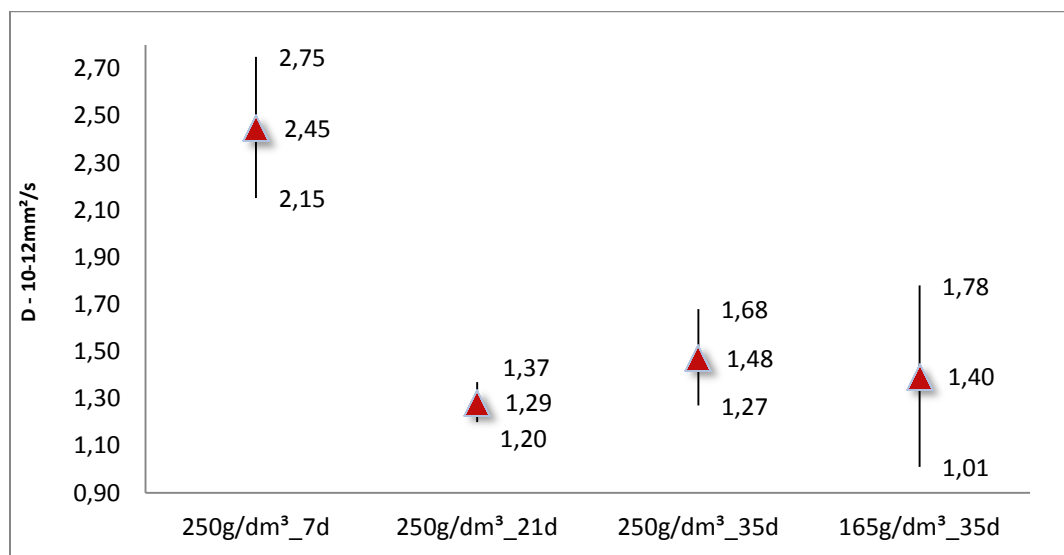


Figura 08 – Valores máximos, mínimos e médios para o D

Por fim, foi realizado um teste de hipóteses para as amostras do método acelerado modificado NaCl 250g/dm³ nas idades de contaminação de 21 e 35 dias comparando os resultados obtidos para o coeficiente de difusão com o encontrado para o método normatizado acelerado NaCl 165g/dm³. Assim sendo, utilizou-se o teste t de student, com um nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$). Para a hipótese inicial adotou-se que a diferença entre as duas médias, a serem comparadas, é nula, ou seja, as médias são iguais, já na hipótese alternativa, considerou-se que as médias que estão sendo comparadas possuem diferença.

Através do software Excel realizou-se o teste t entre duas amostras possuindo variâncias diferentes e assim obteve-se o resultado de que a hipótese inicial não deve ser descartada, ou seja, o coeficiente de difusão encontrado nas idades de 21 e 35 dias para o método modificado acelerado NaCl 250g/dm³ possui valores médios muito próximos ao do obtido pelo ensaio normatizado NaCl 165g/dm³, concordando com o constatado anteriormente.

5. CONCLUSÃO

Os valores dos coeficientes de difusão calculados, apresentaram valores muito próximos, quando as amostras estudadas foram imersas em diferentes concentrações de íons cloreto, uma apresentando uma quantidade de aproximadamente 5 vezes mais (165g/dm³) e a outra entorno de 8 vezes superior (250g/dm³). a concentração da água do mar

Além disso, os valores encontrados para o Método Acelerado Modificado - NaCl 250g/dm³ apresentou valores de D muito próximos para as idades de 21 e 35 dias quando comparado aos valores encontrados pelo método normatizado.

Diferentemente do observado por Guimarães et al, 2011, onde foi constatado que a concentração superficial de cloretos C_s não variou para as idades de 7, 21 e 35 dias de contaminação, em uma concentração de 165g/dm³ de NaCl . Neste trabalho, observou-se a tendência do aumento desse valor com o passar do tempo, obtendo um C_s maior na idade de 35 dias de contaminação para uma concentração de NaCl - 250g/dm³. É válido salientar que a dosagem do concreto utilizado nesta pesquisa, bem como o tipo de cimento difere do utilizado por Guimarães et al, 2011, além disso, os valores encontrados para D também possuem diferença, verificando que o concreto utilizado nesta pesquisa possui um melhor comportamento quando exposto em ambientes com presença de cloretos, visto que, o coeficiente de difusão encontrado é menor do que obtido por Guimarães et al, 2011 em sua pesquisa. Assim, o fato do C_s vir a variar ou não com o passar do tempo pode estar relacionado com o comportamento do material quando o mesmo é exposto em ambientes com presença de cloretos. De forma que em concretos que apresentem uma rede de poros mais interligada, ou seja, os que apresentam menos resistência ao ataque de cloretos, o C_s venha a estabilizar de maneira mais rápida quando comparado a um concreto que apresenta um melhor comportamento frente o ataque desse agente agressivo, podendo assim o C_s variar.

Assim sendo, para proporcionar uma maior credibilidade ao estudo, estão sendo realizados ensaios envolvendo concretos dosados com cimento CP V 32 RS e com adição de microssílica, além de uma contaminação com soluções com uma maior concentração de NaCl .

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5738, 2015. Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova
- CRANK, J. The Mathematic of Diffusion, second Ed., Oxford Univ. Press, Oxford, UK 1975.
- GIL, C. A. Influencia del contenido de humedad del hormigón sobre la difusividade del ión cloruro. Madrid, 2009. Tese (Doutorado). Universidad Autónoma de Madrid.
- GUIMARÃES, A.T.C. Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos. São Paulo, 2000. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.
- GUIMARÃES, A. T .C. GIL, C. A. LLORCA, M. A. C. ALMENAR, G. V. Behaviour of Chloride Content at the Surface of Concrete in Submerged Test Conditions. In: XII DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto, Portugal. Abril 2011.
- HELENE, P.R.L. Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado. São Paulo, 1993. 231p. Tese (LivreDocência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 3.ed. São Paulo: PINI, 2008.
- NT BUILD 443, Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration, NORDTEST, Espoo, Finland, November 1995.
- PEREIRA, V. G. A. Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- RIBEIRO, D. V. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. 1ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- RODRIGUES, F. T. Medição do grau de saturação e a difusão de íons de cloretos em concretos executados com cimento de alta resistência inicial. Rio Grande, 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande.