

Effects of temperature gradients on moisture and salt transport in concrete structures.

R. M.M. Ribas¹, G. Santos¹, V. Okita¹

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330,84017-220, Paraná/Ponta Grossa, Brasil
rhayssa@alunos.urfpr.edu.br, gsantos@utfpr.edu.br, okitaviviane@gmail.com

Abstract. In maritime zones, with high salt ions incidence, the concrete structures corrosion frequently occurs. The salt mist is full of salt ions and can be transported by de wind until the civil constructions, penetrating in its pores. These ions can accelerate the deterioration of steel reinforcement and concentrate in some points, crystallizing, and increasing the intern pressure until the concrete breaks creating fissures and cracks, becoming more susceptible to others deterioration factors. Thereby, in this study, the heat, moisture and salt transport were modelled to a concrete block reached by ions chloride (Cl-) salt mist. The conservation equations were discretized in finite volumes, being solved in attached form, using the MTDMA (MultiTriDiagonal-Matrix Algorithm). Comparations using the isothermal and non-isothermal conditions were made, and the results showed the big influence of the temperature gradients in determination of the concentration of moisture and salt through the sample.

Keywords: Salt transport, concrete, temperature gradient.

1 Introdução

O concreto é o material mais utilizado no mundo quando se trata de construção civil, isto porque ele apresenta as características ideais para esse uso, pois pode adquirir várias formas e tamanhos e quando seco, apresenta resistência similar à de rochas naturais. Estas duas características em conjunto com sua maior resistência a água, quando comparado ao aço e a madeira, o tornam o material preferido dos engenheiros e arquitetos para suas obras. O preparo deste material bem como a composição de seus componentes na mistura (água, cimento, areia e agregados) pode alterar significativamente sua densidade e porosidade, propriedades que tem influência direta na permeabilidade e resistência das estruturas das construções. (Pedroso [1])

Por ser um material largamente empregado na construção civil, os prejuízos econômicos causados pela corrosão de suas estruturas são também expressivos. Esta degradação pode ocorrer tanto no concreto quanto na armadura, comprometendo a construção como um todo. Existem diversos fatores que pode comprometer uma estrutura. Segundo Gentil [2], eles podem ser biológicos pela ação de bactérias e fungos, físicos pela variação de temperatura, mecânicos como vibrações e cargas ou químicos pela ação de ácidos e sais. Helene [3] destaca que os principais agentes agressivos ao concreto ocorrem pela ação de ácidos e sulfatos, os quais contribuem para a redução do pH e secundariamente para despassivação da armadura, a qual é sensível a ação do gás carbônico (CO₂-) e também de íons cloreto (Cl-).

A ação do cloreto pode afetar gravemente a armadura e causar danos ao concreto. Esta ação ocorre principalmente em zonas marítimas pela ação da névoa salina com alta concentração destes íons, a qual é levada até as estruturas de concreto pelo vento. Uma vez em contato com a superfície, os íons cloreto são levados pela água através dos poros, podendo chegar até armadura, iniciando um processo de corrosão. Eles podem se concentrar em alguns pontos e com a redução da umidade, se cristalizarem, aumentando a pressão interna até que a estrutura se rompa criando fissuras e trincas, sendo mais suscetível a outros agentes de deterioração. (Derluyn *et al.* [4])

Alguns estudos podem ser encontrados na literatura abordando o transporte de sal e umidade para o interior

dos poros do concreto. Chunquiu *et al.* [5] fazem uma análise numérica da umidade durante ciclos de embebição e secagem em concreto, alegando que o comportamento do transporte da água pode ser diferente durante estes processos. Já no estudo de Zanden *et al.* [6], o modelo criado inclui o transporte de umidade e de sal para o interior do meio poroso, incluindo várias situações de condição de contorno e o impacto do transporte em cada uma delas. Derluyn *et al.* [4] e Poupeleer [7] apresentam modelos para o transporte de umidade, calor e sal, incluindo uma equação para descrever a cristalização. No trabalho de Espinosa *et al.* [8] um modelo representando o stress mecânico causado por pela cristalização em materiais porosos foi desenvolvido e analisado juntamente com um estudo experimental.

Segundo o Relatório da Aliança Global para Edifícios e Construção (em inglês, Global Alliance for Buildings and Construction – GlobalABC), 36% da energia gasta no mundo e 39% das emissões de CO₂ são de responsabilidade do setor da construção civil. Portanto, o estudo da degradação do concreto devido ao transporte de umidade e sal é de grande importância para a melhoria da resistência do material e a redução dos impactos ambientais causados por este setor. (IEA[9])

Sendo assim, o presente estudo busca analisar os efeitos causados pelos gradientes de temperatura no transporte de umidade e sal no interior do meio poroso do concreto. Para esta verificação, um modelo para o transporte em meio poroso com três equações de conservação é apresentado: massa de água, massa de sal e energia. As três equações são resolvidas simultaneamente através do algoritmo MTDMA (MultiTriDiagonal-Matrix Algorithm). Comparações com o transporte isotérmico são apresentadas, mostrando a importância de considerar a equação da conservação da energia, neste tipo de análise.

2 Metodologia

Para este estudo foram levadas em consideração as três principais equações modeladas para o transporte de calor, umidade e sal em meios porosos, assim como descritas em Ribas e Santos [10]. Iniciando pela conservação da energia, o lado direito da eq. (1) é representado pelo divergente do fluxo de calor e um termo fonte, devido a transição de fase (Santos [11]) como:

$$c_m \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q + S \quad (1)$$

onde:

$$c_m = c_0 + \frac{c_l \theta}{\rho_0} \quad (2)$$

sendo c_0 , o calor específico do material seco [J/(kg.K)], c_l , o calor específico da água líquida [J/(kg.K)], ρ_0 , a densidade do material seco [kg/m³], c_m , a capacidade calorífica do material [J/(kg.K)], q , o fluxo de calor [W/m³] e S o termo fonte [W/m³]. Neste caso, a capacidade calorífica do ar úmido foi desprezada.

O fluxo de calor, q , pode ser dividido entre aquele ocasionado pela condução (q_{cond}), descrito pela eq. (3), e pela convecção (q_{conv}), descrito pela eq. (4):

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (3)$$

$$q_{conv} = \underbrace{j_l c_{pl} T}_{\text{fluxo de líquido}} + \underbrace{j_v c_{pv} T}_{\text{fluxo de vapor}} \quad (4)$$

onde λ é a condutividade térmica [W/(m.K)], c_{pl} , o calor específico da água líquida [J/(kg.K)] e c_{pv} , o calor específico à pressão constante do vapor de água [J/(kg.K)].

O termo fonte (S) é atribuído a mudança de fase e é quantificado através do calor latente de vaporização, mostrado pela eq. (5):

$$S = -L(T) \nabla \cdot j_v \quad (5)$$

onde $L(T)$ é o calor latente de vaporização [J/kg] e j_v , o fluxo de vapor (kg/s m²).

Considerando a temperatura de referência de 273 K, a equação da conservação da energia pode ser descrita pela eq. (6) como:

$$c_m \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\left(\lambda - K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} c_{pl} T \right) \nabla T - \left(K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} c_{pl} T - \delta_v c_{pv} T \right) \nabla P_v + \right. \\ \left. K \rho_l c_{pl} T g \right] - L(T) \nabla \cdot (-\delta_v \nabla P_v) \quad (6)$$

sendo K é a condutividade hidráulica [m/s], P_{suc} , a pressão de sucção [Pa], P_v , a pressão de vapor [Pa], δ_v , a permeabilidade difusiva do vapor [s], ρ_l , a densidade do líquido [Kg/m³] e g , a aceleração da gravidade [m/s²].

O transporte de umidade segundo Santos [11] ocorre devido a três principais fatores: difusão do vapor, transporte da fase condensada através da capilaridade e ao transporte de vapor pelo fluxo convectivo de ar. Neste estudo, este último foi desconsiderado por não ser relevante em meios com baixa porosidade. Deste modo, o transporte de umidade foi dividido em dois fluxos: o de líquido e o de vapor. O fluxo de líquido é descrito pela equação de Darcy, eq. (7), para meios insaturados como:

$$j_l = K(\nabla P_{suc} - \rho_l g) \quad (7)$$

O fluxo de líquido pode ser atribuído principalmente a dois fatores: as forças de aderência e a capilaridade, sendo avaliada pela pressão de sucção (∇P_{suc}), e ao efeito da gravidade. Neste caso, o gradiente de pressão de sucção pode ser descrito pela eq. (8) como:

$$\nabla P_{suc} = \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \nabla T + \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} \nabla P_v \quad (8)$$

onde

$$\frac{\partial P_{suc}}{\partial T} = R_v \rho_l \left[-\ln \phi - \frac{T}{\phi} \left(-\frac{P_v}{P_{sat}^2} \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \right] \quad (9)$$

e

$$\frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} = -\frac{R_v T \rho_l}{P_v} \quad (10)$$

A Equação (9) e (10) foram derivadas a partir da Lei de Kelvin, onde ϕ é a umidade relativa, P_{sat} é a pressão de saturação e R_v é a constante dos gases para vapor de água. Já o transporte por difusão de vapor é descrito pela eq. (11) como:

$$j_v = -\delta_v \nabla P_v \quad (11)$$

Deste modo, a conservação da umidade representada na eq. (12), torna-se:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot \left[-K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \nabla T - \left(K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} - \delta_v \right) \nabla P_v + K \rho_l g \right] \quad (12)$$

onde w é o conteúdo de umidade (Kg/m³) e ϕ , a umidade relativa.

O transporte de sal foi baseado no modelo utilizado por Zanden *et al.* [6], onde o processo ocorre devido a dois fenômenos: a convecção quando o sal é levado pela água através dos poros do concreto e a dispersão, que ocorre devido a uma diferença de concentração. Sendo assim o transporte de sal unidimensional pode ser descrito pela eq. (13) como:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial w}{\partial x} C_s + D_s \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) \quad (13)$$

onde C_s é a concentração de sal, D é o coeficiente de difusão da água no concreto [m²/s] e D_s , o coeficiente de dispersão do sal [m²/s], o qual pode ser descrito pela eq. (14):

$$D_s = \frac{D_m}{\tau} + \frac{1}{2} \left(\frac{D}{w} \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \frac{r^2}{D_m} \quad (14)$$

onde τ é a tortuosidade, r é o raio do poro [m] e D_m é o coeficiente de difusão do sal na água [m²/s], que pode ser descrito pela eq. (15) como:

$$D_m(T) = D_0 \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (15)$$

onde D_0 é o coeficiente de difusão do sal na água a temperatura a T_0 (K), E_a é a energia de ativação da substância difundida em concreto e R é a constante universal dos gases (8,314 kJ/ kmol K).

As três equações governantes foram discretizadas através do método dos volumes finitos (Patankar [13]). A

solução acoplada das equações de uma maneira totalmente implícita foi obtida através do algoritmo MTDMA (*MultiTriDiagonal-Matrix Algorithm*), proposto por Mendes *et al.* [12].

3 Resultados

Todas as simulações foram realizadas considerando uma parede de concreto com espessura de 40 cm, uma malha uniforme com 20 volumes e um período de simulação de 2 anos. Adotou-se a superfície direita como interna, enquanto a superfície esquerda foi considerada exposta ao ambiente externo. A névoa salina que atinge a parede, composta por íons cloreto (Cl⁻), possui um coeficiente de difusão em água de $1,26 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ a 20° C. A Figura 1 mostra o domínio analisado.

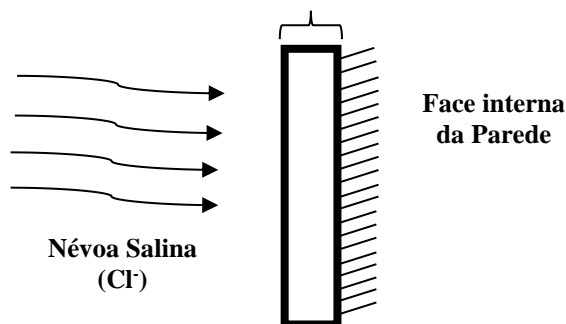


Figura 1- Condições dos testes executados. Fonte: Ribas e Santos [10]

Os três primeiros testes executados foram isotérmicos com a face interna da parede sendo adiabática e impermeável, ou seja, a mesma não permite fluxo de sal e água por seus poros. No início dos testes a umidade relativa era de 88% e não havia sal no interior da amostra, a temperatura inicial foi a mesma da temperatura uniforme, apresentadas na Tabela 1 junto com as condições dos testes performados:

Tabela 1- Condições dos testes isotérmicos executados

<i>Teste</i>	Temperatura uniforme (K)	Umidade relativa na face externa (%)	Concentração da névoa salina na face externa (Kg/m³)
1	283	88	1,52
2	393	88	1,52
3	303	88	1,52

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos para concentração de sal ao longo de cada amostra para os Testes 1, 2 e 3:

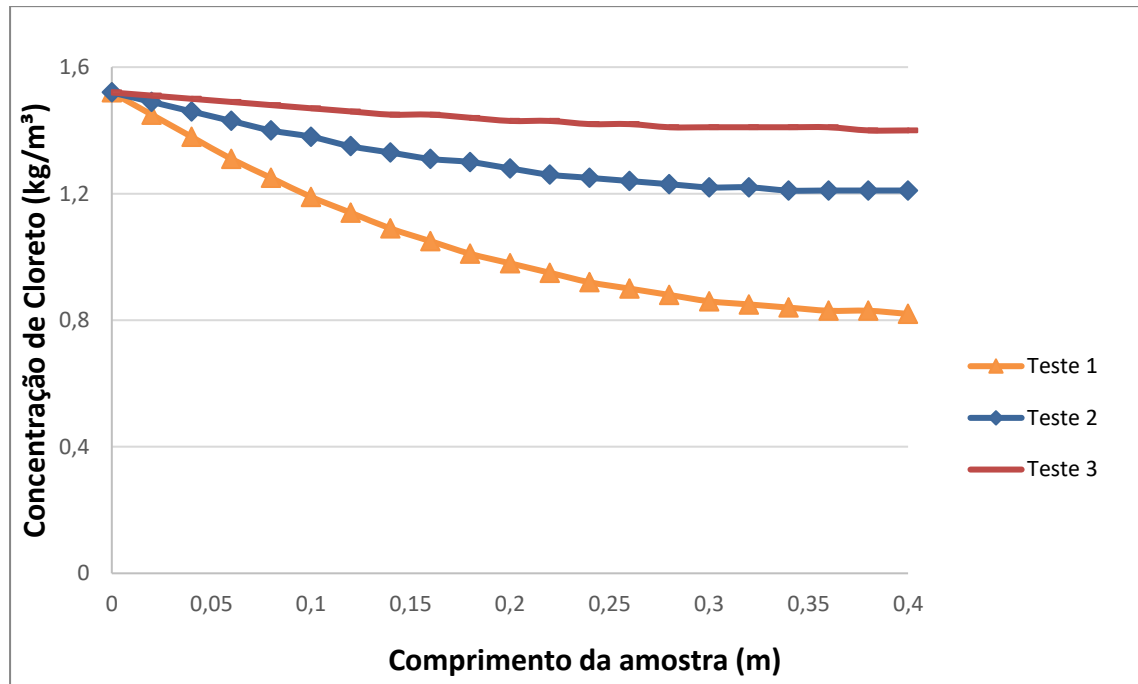


Figura 2- Resultados obtidos para a concentração de sal ao longo da amostra para os Testes 1, 2 e 3

A Figura 2 mostra a concentração de sal distribuída ao longo da amostra, após um período de 2 anos. Pode-se observar que o teste 1, o qual apresenta uma temperatura de 283 K, apresenta um gradiente de concentração de sal maior entre as duas superfícies, quando comparado aos outros testes. Isto ocorre devido a sua temperatura ser mais baixa, o que dificulta a difusão do sal, impedindo que ele se propague rapidamente pela amostra. Em temperaturas mais altas, com coeficientes de difusão maiores, a propagação ocorre de forma mais veloz, como mostra o teste 3.

Os próximos Testes performados foram feitos para em condições não isotérmicas, com ambas as faces da parede impermeáveis a água e com temperaturas diferentes, sua umidade inicial é de 88%, temperatura de 283K e não há presença de sal no interior da amostra. É importante ressaltar que durante estes testes não há possibilidade de entrada de sal por convecção (entrada sal carregado pela água). As condições deles são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2- Condições dos testes não isotérmicos executados

<i>Teste</i>	Temperatura da face externa da parede (K)	Temperatura face interna da parede (K)	Umidade relativa na face externa (%)	Concentração da névoa salina na face externa (Kg/m³)
4	303	283	88	1,52
5	298	283	88	1,52
6	293	283	88	1,52
7	283	303	88	1,52
8	283	298	88	1,52
9	283	293	88	1,52

Os resultados dos testes 4,5 e 6 em relação a distribuição da concentração de sal e de umidade, onde considerou-se a variação da temperatura na parede externa, estão representados nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Já os resultados dos testes 7,8 e 9 encontram-se nas Figuras 5 e 6.

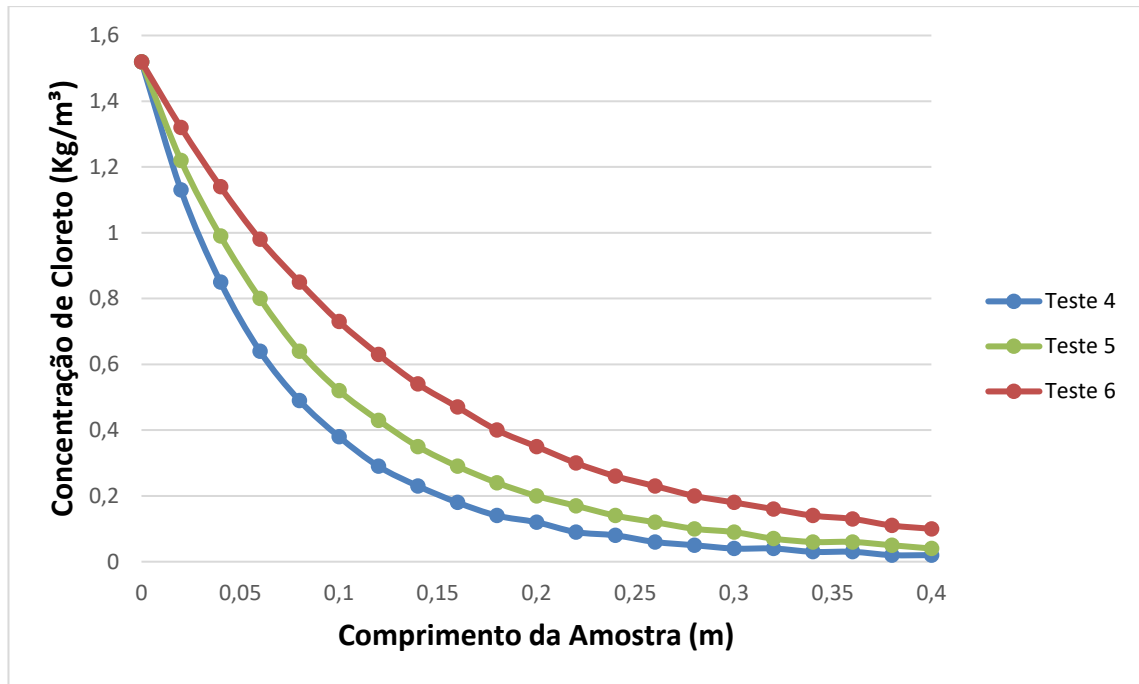


Figura 3- Resultados dos testes 4, 5 e 6 para a Concentração de Cloreto ao longo da amostra

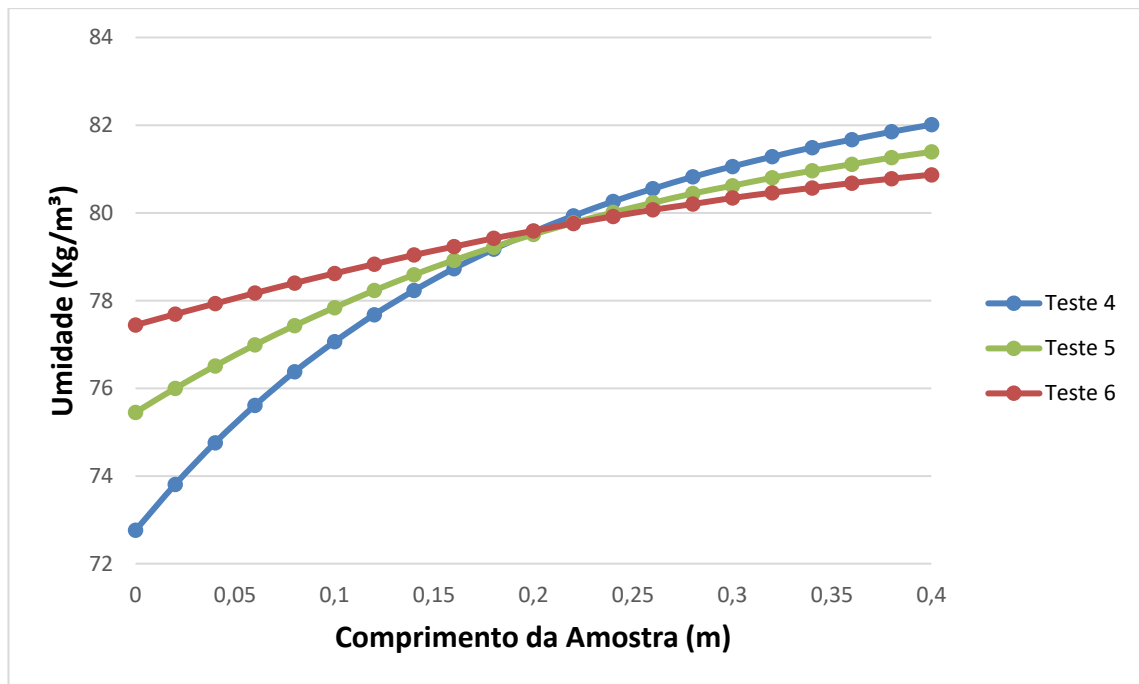


Figura 4- Resultados dos testes 4, 5 e 6 para a umidade ao longo da amostra

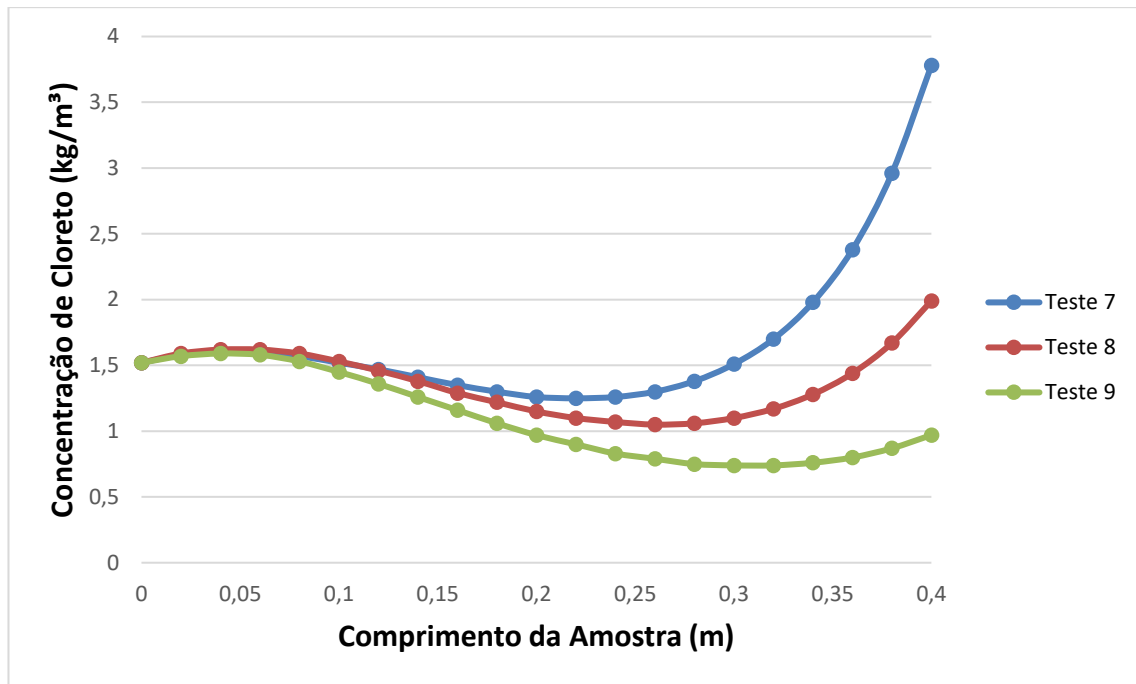


Figura 5- Resultados dos testes 7, 8 e 9 para a Concentração de Cloreto ao longo da amostra

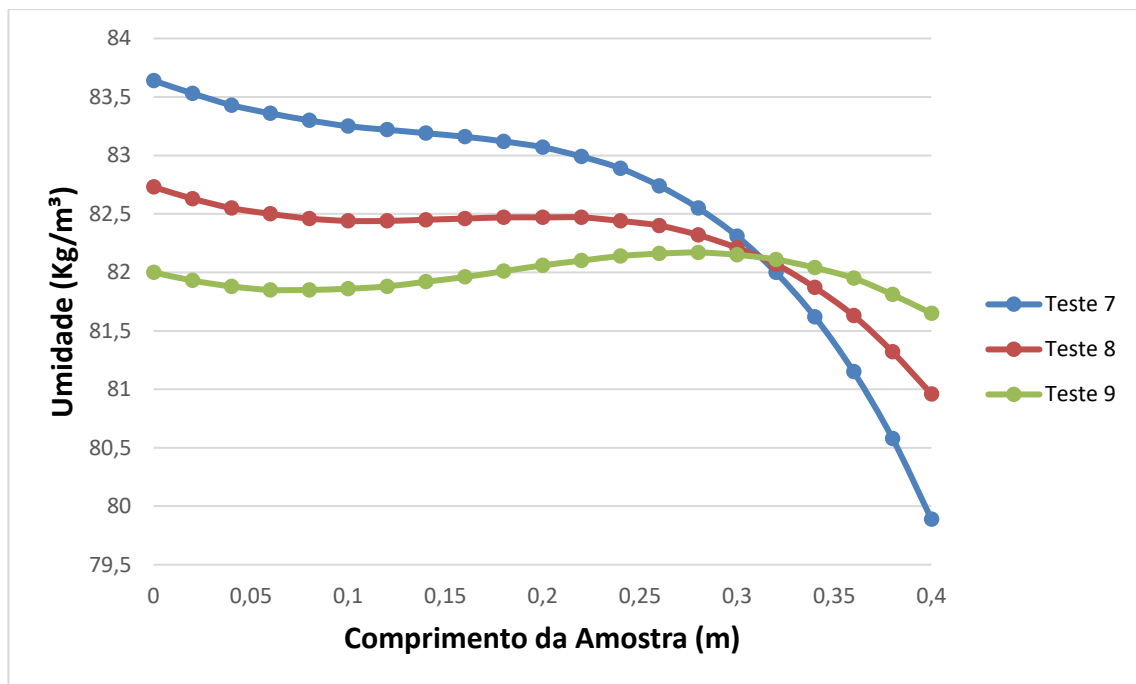


Figura 6- Resultados dos Testes 7, 8 e 9 para a umidade ao longo da amostra

A Figura 3 mostra os resultados dos testes 4, 5 e 6 para a concentração de cloreto ao longo da amostra. Nela pode-se perceber que quando a temperatura da superfície esquerda (externa) é maior, o gradiente de concentração de cloreto também é maior ao longo da amostra. Isso pode ser explicado pela velocidade de difusão do sal que é

maior a temperaturas mais altas e pelo comportamento da água. Na Figura 4, nota-se que a inclinação das curvas é menor com a redução do gradiente de temperatura, ou seja, em temperaturas mais próximas entre as superfícies, como no teste 6, a umidade ao longo da parede tem menor variação. No teste 4 ocorre uma secagem da face esquerda, fazendo com que a água presente na amostra se desloque para a superfície interna, ocasionando uma redução na concentração de sal, como observado na Figura 3.

Nas Figuras 5 e 6, onde inverteram-se as temperaturas das superfícies referentes aos testes 4, 5 e 6, verificam-se os resultados para os testes 7,8 e 9. Nestes testes observa-se uma maior influência causada pela temperatura no transporte do sal. A Figura 5 apresenta a concentração de cloreto muito similar para os 3 testes performados até aproximadamente o meio da amostra. A temperatura da face direita começa a impactar na difusão do sal, tornando o transporte mais rápido onde a temperatura é mais alta (caso do Teste 7), e mais lento em temperaturas mais baixas (Teste 9). A Figura 6 corrobora com os resultados obtidos na Figura 5, onde a umidade mostra-se quase constante para os 3 testes até metade da amostra. A partir deste ponto, a temperatura da face direita começa a causar um maior efeito, secando as amostras com temperatura mais alta e elevando a concentração de cloreto que pode ser observado na figura anterior.

Portanto, verifica-se que o aumento da temperatura causa um aumento da difusão de sal no interior do concreto, permitindo que o mesmo se mova com maior facilidade. De forma semelhante, o aumento da temperatura em uma das faces da parede causa uma secagem naquela região, aumentando a concentração de sal e impactando em seu transporte, pois o movimento da água desloca os íons de sal para outra região.

4 Conclusão

Considerando que o concreto seja o material mais utilizado no mundo na construção civil, a sua corrosão pode trazer grandes prejuízos econômicos. Existem diversas formas para a degradação do concreto, desde estresses mecânicos até a ação de sais. Os íons cloreto (Cl⁻) dissolvidos na umidade da névoa salina, penetram no concreto podendo chegar até sua armadura, começando um processo de corrosão. Por outro lado, com o decorrer do tempo, estes íons também podem cristalizar-se em alguns pontos, causando fissuras nas construções.

Portanto, neste trabalho buscou-se analisar o comportamento do transporte de sal e umidade causado por gradientes de temperatura. Para isto, apresentou-se um modelo matemático para descrever o transporte de calor, umidade e sal em meios porosos. Os resultados apresentados permitem concluir que pequenas diferenças de temperatura causam significativo impacto no transporte de sal e umidade. Sua difusão é mais rápida em locais mais quentes com um aumento da concentração de sal devido a redução da quantidade de água. Deste modo, este trabalho mostrou a importância de se considerar a equação da conservação da energia na análise do transporte de sal e umidade em estruturas de concreto, podendo fornecer informações relevantes para a prevenção de processos de corrosão.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro

Declaração de Autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo material aqui incluído como parte do presente trabalho é de propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

Referencias

- [1] Pedrosa, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Concreto & Construções*, São Paulo, ano XXXVII, n. 53, p. 14-22, 2009. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf. Acesso em: 31/08/2020
- [2] Gentil, V. *Corrosão*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345 p.
- [3] Helene, P. R. L. Introdução a durabilidade no projeto das estruturas de concreto. *Ambiente Construído*, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 45-57, 1997. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3355/1808>. Acesso em: 29/10/2019.
- [4] Derluyn, H.; Moonen, P; Carmeliet, J. Modelling of Moisture and Salt Transport Incorporating Salt Crystallization in Porus Media. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*. [s.l]. v.63, p. 242-255,2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmps.2013.09.005>. Acesso em: 26/03/2017

- [5] Chunqiu, L.; Kefei, L., Chen, Z. Numerical Analysis of Moisture Influential Depth in Concrete During Drying- Wetting Cycles. *Tsinghua Science and Technology*. Beijing, China. v.13. nº 5, p. 696-701, 2008.
- [6] Zanden, A.J.J Van der; Taher, A.; Arends, T. Modelling of water and chloride transport in concrete during yearly wetting/drying cycles. *Elsevier Journal*. [s.l.] v.81, p.120-129, 2015. Ebook
- [7] Poupeleer, A. S. Transport and Crystallization of Dissolved Salts in Cracked Porous Building Materials, 2007. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas)- Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
- [8] Espinosa, R. M.; Franke, L.; Deckelmann, G. Model for the mechanical stress due to the salt crystallization in porous materials. *Elsevier Journal*. Hamburgo. Alemanha. v.22.p.1350-1367,2007. Ebook
- [9] International Energy Agency (IEA) .2019 *Global status report for building and construction*. ISBN: 978-92-807-3768-4. 2019. Disponível em: www.iea.org.
- [10] Ribas, R.M.M; Santos, G.H. Transporte Simultâneo de Calor, Umidade e Sal em Concreto. In: *Ibero- Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, XL, Natal, RN. CILAMCE. 2019
- [11] Santos, G. H. Transferência de Calor, Ar, Umidade Através de Elementos Porosos de Edificações. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [12] Mendes, N.; Philippi; P. C., Lamberts, R. A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, [s.l], v. 45, n. 3, p. 509-518,2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00172-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00172-7). Acesso em: 30 /04/2020
- [13] Patankar, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. 1. ed. Boca Raton: CRC Press,1980