

## **TRANSPORTE SIMULTÂNEO DE CALOR, UMIDADE E SAL EM CONCRETO**

**Rhayssa M. M. Ribas**

**Gerson H. Santos**

*rhayssa87@gmail.com*

*gsantos@utfpr.edu.br*

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR*

*Avenida Monteiro Lobato, s/n - Km 04, 84016-210, Ponta Grossa-PR, Brasil*

**Abstract.** Concrete structures can suffer various types of damage, which can considerably shorten their life. One of the responsible for this process is the transport of salts into the concrete pores. In addition to accelerating the corrosion process in the steel frame, these salts can concentrate at some points (nucleation), causing cracks and fractures in the structure, consequently decreasing its resistance. Thus, the objective of this work is the analysis of how this transport takes place inside the porous structures, simultaneously considering the transport of heat, moisture and salt in the porous medium. The discretization of the governing equations was performed using the finite volume method, and the algebraic equations system was solved through the MultiTriDiagonal Matrix Algorithm (MTDMA) algorithm, which allows the simultaneous solution of the governing equations. For the model verification, several simulations considering different boundary conditions were performed and compared with a model proposed by other authors, showing good similarity between the results. From the results it was possible to observe the influence of moisture transport on the salt displacement inside the concrete, in the drying and imbibition processes.

**Key words:** Salt Transport, Porus Media, Concrete.

## 1 Introdução

A deterioração de construções civis devido ao transporte de sal e umidade nos poros é motivo da redução da vida útil dos materiais, trazendo prejuízos econômicos. Do início do século XX até a década de 80, as construções de concreto eram feitas com base apenas na experiência profissional, ou seja, de forma subjetiva. Com isso a durabilidade das estruturas passava a ser claramente empírica. O avanço tecnológico nos anos subsequentes trouxe modelos de previsão da deterioração em concreto, devido principalmente ao conhecimento do comportamento de gases e líquidos em meios porosos (Medeiros *et al.* [1]).

O grande desenvolvimento gerado por pesquisadores no campo dos fenômenos de transporte, em processos industriais, tem garantido melhorias na eficiência e na durabilidade de materiais. A capacidade de modelar o comportamento de diferentes fluidos, além do transporte de massa e de calor em meios porosos, permite melhorias na eficiência de processos, além de garantir ganhos econômicos e ambientais (Martins [2]).

Engenharia de processos químicos, engenharia ambiental, reservatórios naturais, engenharia mecânica, construção civil são apenas algumas das áreas onde o conhecimento do transporte de substâncias em meios porosos pode ser fundamental. Na engenharia civil, o conceito é amplamente aplicado para estruturas de concreto já que, segundo Pedroso [3], estima-se que anualmente 11 bilhões de toneladas deste material são consumidos no mundo.

Durante o ciclo de vida das estruturas de concreto, estas são submetidas a diversos tipos de esforços e cargas, estresses mecânicos, mudanças climáticas, mudanças de temperatura e ataques químicos. Estas condições causam ao material, diferentes reações que resultam na redução de seu tempo de vida. Um dos grandes motivos desta deterioração pode estar na cristalização do sal no interior do meio poroso. Segundo Derluyn *et al.* [4], os sais presentes no interior de líquidos que penetram os poros podem cristalizar durante a secagem do material, submetendo-o a forças expansivas que eventualmente podem danificar e rachar o concreto. Mas como ocorre o transporte do sal para o interior dos poros do concreto? Com a finalidade de auxiliar no esclarecimento desta questão, este trabalho tem como foco apresentar um modelo matemático para o transporte de umidade, calor e sal para entender este fenômeno e os danos causados pelo mesmo.

De acordo com dados da Organização das Nações Unidas (ONU), o setor da construção utiliza cerca de 40% de toda energia e 25% de toda água consumidas no mundo (Benite [5]). Sendo assim, o estudo da degradação do concreto armado, devido à transposição de sal e umidade, é de suma importância para a redução do custo de vida do material e dos impactos ambientais gerados pelo setor da construção.

Portanto, a motivação para a realização deste trabalho, encontra-se na possibilidade de ajudar a trazer ao setor da construção civil bases científicas, para promover melhorias tecnológicas, que permitam a análise do transporte de calor, umidade e sal, permitindo o desenvolvimento de concretos com maior tempo de vida útil, diminuindo a necessidade de reparos precoces e de novas construções, para a redução de gastos e de impactos ambientais geradas por este setor.

## 2 Modelagem Matemática

### 2.1 Transporte de Umidade

Segundo Santos [6], o transporte de umidade ocorre devido a três fenômenos principais: transporte na fase condensada através da capilaridade, difusão do vapor e transporte de vapor pelo fluxo convectivo de ar (importante para meios com alta porosidade).

Sendo assim, o transporte de umidade é dividido em dois fluxos: o de líquido e o de vapor. O fluxo de líquido ( $j_l$ ) é descrito pela equação de Darcy, Eq. (1), adaptada para meios insaturados:

$$j_l = K(\nabla P_{suc} - \rho_l g) \quad (1)$$

onde  $K$  é a condutividade hidráulica,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\rho_l$  é a densidade do líquido. O fluxo de líquido pode ser atribuído principalmente a dois fatores, o primeiro refere-se as forças de aderência e a capilaridade, sendo avaliada pela pressão de sucção ( $\nabla P_{suc}$ ), o segundo termo leva em conta a aceleração da gravidade obtido através de uma distância relativa na direção vertical. O gradiente de pressão de sucção pode ser descrito pela Eq. (2):

$$\nabla P_{suc} = \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \nabla T + \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} \nabla P_v \quad (2)$$

onde:

$$\frac{\partial P_{suc}}{\partial T} = R_v \rho_l \left[ -\ln \phi - \frac{T}{\phi} \left( -\frac{P_v}{P_{sat}} \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \right] \quad (3)$$

e

$$\frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} = -\frac{R_v T \rho_l}{P_v} \quad (4)$$

A Equação (3) e (4) foram derivadas a partir da Lei de Kelvin. Onde  $\phi$  é a umidade relativa,  $T$  é a temperatura,  $P_v$  é a pressão de vapor,  $P_{sat}$  é a pressão de saturação, e  $R_v$  é a constante dos gases para vapor de água.

Para o transporte de vapor, leva-se em conta o gradiente de pressão do gás (ar úmido) que causa o fluxo de ar dentro do meio poroso transportando o vapor. Portanto, o fluxo de vapor ( $j_v$ ) pode ser calculado pela Eq. (5):

$$j_v = -\delta_v \nabla P_v - \rho_v \frac{k k_{rg}}{\mu_g} \nabla P_g \quad (5)$$

onde  $\delta_v$  é a permeabilidade difusiva ao vapor [s],  $k$  é a permeabilidade intrínseca [m<sup>2</sup>],  $k_{rg}$  é a permeabilidade relativa do ar,  $\mu_g$  é a viscosidade do ar úmido [Pa.s] e  $P_g$  é a pressão de gás.

Deste modo, Santos [6] descreve a conservação da umidade com o termo do conteúdo de umidade  $w$  [kg/m<sup>3</sup>], apresentado na Eq. (6) em função da pressão parcial de vapor e da temperatura na Eq. (7), isto com a finalidade de dar maior robustez para o método de solução Algoritmo da Matriz Tri-Diagonal (TDMA- TriDiagonal Matrix Algorithm):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot j \quad (6)$$

onde  $w$  é a o conteúdo de umidade [kg/m<sup>3</sup>] e  $t$  é o tempo [s],

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial P_v} \frac{\partial P_v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ -K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \nabla T - \left( K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} - \delta_v \right) \nabla P_v + \rho_v \frac{k k_{rg}}{\mu_g} \nabla P_g + K \rho_l g \right] \quad (7b)$$

onde as derivadas

$$\frac{\partial \phi}{\partial P_v} = \frac{1}{P_{sat}} \quad (8)$$

e

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = -\frac{P_v}{P_{sat}^2} \left( \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \quad (9)$$

são obtidas a partir da definição de umidade relativa contida na Eq. (10):

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \quad (10)$$

## 2.2 Transporte de Calor

Para a transferência de calor, Santos [6] utiliza o divergente do fluxo de calor e um termo fonte, devido a transição de fase. Obtendo assim a Eq. (11):

$$c_m \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q + S \quad (11)$$

onde:

$$c_m = c_o + \frac{c_l \theta}{\rho_0} \quad (12)$$

sendo  $c_o$  o calor específico do material seco [J/(kg.K)],  $c_l$ , o calor específico da água líquida [J/(kg.K)],  $\rho_0$ , a densidade do material seco [kg/m<sup>3</sup>],  $c_m$  a capacidade calorífica do material [J/(kg.K)],  $q$ , a quantidade de calor [J/s] e  $S$  o termo fonte [J/s]. Neste caso, a capacidade calorífica do ar úmido foi desprezada.

O fluxo de calor  $q$  pode ser dividido entre aqueles ocasionados pela condução ( $q_{cond}$ ), descrito pela Eq. (13), e pela convecção ( $q_{conv}$ ), descrito pela Eq. (14):

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (13)$$

$$q_{conv} = j_l c_{pl} T + j_a c_{pa} T + j_v c_{pv} T \quad (14)$$

onde  $\lambda$  é a condutividade térmica [W/(m.K)],  $c_{pa}$ , o calor específico à pressão constante do ar seco [J/(kg.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 é quantificada através do calor latente de transição pelo fluxo de vapor, mostrado pela Eq. (15):

$$S = -L(T) \nabla j_v \quad (15)$$

onde  $L(T)$  é o calor latente de vaporização [J/kg].

Adotando-se a temperatura de referência de 0 °C, a equação da conservação da energia, Eq. (16), torna-se:

$$c_m \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \begin{array}{l} \left( \lambda - K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} c_{pl} T \right) \nabla T - \left( K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} c_{pl} T + \delta_v c_{pa} T - \delta_v c_{pv} T \right) \nabla P_v + \\ \left( \rho_a \frac{kk_{rg}}{\mu_g} c_{pa} T + \rho_v \frac{kk_{rg}}{\mu_g} c_{pv} T \right) \nabla P_g + K \rho_l c_{pl} T g \end{array} \right] - L(T) \nabla j_v \quad (16)$$

## 2.3 Transporte de sal

No trabalho de Santos [6], o transporte de ar é levado em conta, porém, este fator pode ser desprezado para materiais com baixa porosidade. Deste modo, esta equação é substituída pelo transporte de sal.

O modelo de Derluyn, *et al.* [4] e de Chen-Charpentier [7] é representado pela Eq. (17):

$$\frac{\partial \varphi C_s}{\partial t} + \nabla q_s + \dot{m}_{cr} = 0 \quad (17)$$

onde  $\varphi$  é a porosidade do meio,  $C_s$  é a concentração do sal,  $\dot{m}_{cr}$  é a massa de sal dissolvido transformando-se em cristal.

O transporte de sal pelo meio poroso ocorre devido a dois fatores, a difusão e a advecção, representados pelo termo  $q_s$  na Eq. (18):

$$q_s = q_{sdif} + q_{sadv} \quad (18)$$

$$q_{sdif} = \varphi D \nabla C_s \quad (19)$$

$$q_{sadv} = \varphi v C_s \quad (20)$$

onde  $D$  é o coeficiente de difusão e  $v$  é a velocidade do líquido.

De forma similar, Zanden, *et al.* [8], explicam o transporte de sal devido aos fenômenos de convecção e dispersão. O primeiro acontece quando o sal dissolvido na água é levado por ela através dos poros do concreto. Já o segundo ocorre quando existe diferença de concentração de sal na água entre os poros, ou devido as diferenças de velocidade da água nos poros. Portanto, o transporte de sal é definido pela Eq. (21).

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial w}{\partial x} C_s + D_s \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) \quad (21)$$

Sendo  $C_s$  a concentração de sal,  $D$  o coeficiente de difusão da água no concreto e  $D_s$  o coeficiente de dispersão do sal no concreto dado pela seguinte Eq. (22):

$$D_s = \frac{D_m}{\tau} + \frac{1}{2} \left( \frac{D}{w} \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \frac{r^2}{D_m} \quad (22)$$

onde  $D_m$  é o coeficiente de difusão do sal na água,  $\tau$  é a tortuosidade do meio e  $r$  é o raio do poro.

Para o presente estudo, a equação usada como base para a discretização foi a do modelo de Zanden, *et al.*, [8], pois neste, a cristalização é desconsiderada, propondo um foco maior apenas no transporte de sal através da estrutura porosa atingindo melhor o objetivo a que se propõe este trabalho.

### 3 Discretização das Equações Governantes

Para a discretização das equações governantes foi empregado o método dos volumes finitos, introduzido por Patankar [9], neste método representam-se as equações governantes para cada nó do sistema escolhido, ou seja, cada nó apresentará uma equação para o calor, uma para a umidade e uma para o sal, em um domínio unidimensional, com objetivo de obter um sistema de equações algébricas compatível com o método de resolução empregado, sendo tratado na seção 2.3.

A Figura 1 apresenta as letras W e L para representar os nós vizinhos, localizados no centro dos volumes de controle. Desta forma, como proposto em Santos [6], os coeficientes de transporte são calculados a partir da média harmônica na interface dos volumes de controle.

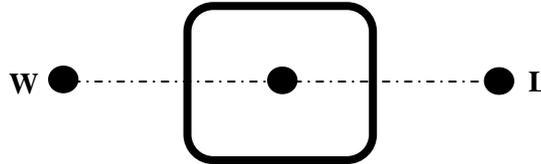


Figura 1. Volume de controle unidimensional

A discretização das equações governantes foi feita utilizando coordenadas cartesianas e um sistema implícito para as derivadas temporais com um intervalo de tempo  $\Delta t$  ao longo de um elemento de volume (Santos [6]).

O resultado da discretização para a conservação de umidade, sal, e calor para os nós intermediários é apresentado nas Eq. (23), (24) e (25), respectivamente.

$$\left( \frac{C_{pv0}}{\Delta t} + \frac{D_{pve0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{pvw0}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left( \frac{C_{T0}}{\Delta t} + \frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2} \right) T_p + \left( \frac{D_{pge0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{pgw0}}{\Delta x^2} \right) P_{gp} = \frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{pve0}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{pge0}}{\Delta x^2} P_{ge} + \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{pvw0}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{D_{pgw0}}{\Delta x^2} P_{gw} + \frac{C_{pv0}}{\Delta t} P_{vp}^0 + \frac{C_{T0}}{\Delta t} T_p^0 \quad (23)$$

$$\left( \frac{D_{pve1}}{\Delta x^2} + \frac{D_{pvw1}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left( \frac{D_{Te1}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw1}}{\Delta x^2} \right) T_p + \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{D_{pge1}}{\Delta x^2} + \frac{D_{pgw1}}{\Delta x^2} \right) C_{sp} = \frac{D_{Te1}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{pve1}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{pge1}}{\Delta x^2} C_{se} + \frac{D_{Tw1}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{pvw1}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{D_{pgw1}}{\Delta x^2} C_{sw} + \frac{C_s^0}{\Delta t} \quad (24)$$

$$\left( \frac{D_{pve2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{pvw2}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left( \frac{C_{T2}}{\Delta t} + \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} \right) T_p + \left( \frac{D_{pge2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{pgw2}}{\Delta x^2} \right) P_{gp} = \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{pve2}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{pge2}}{\Delta x^2} P_{ge} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{pvw2}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{D_{pgw2}}{\Delta x^2} P_{gw} + \frac{C_{T2}}{\Delta t} T_p^0 \quad (25)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 C_{Pv0} &= \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial P_v} & C_{T0} &= \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial T} & D_{T0} &= \frac{P_v}{P_{sat}(T)} & D_{Pv0} &= K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} - \delta_v & D_{Pg0} &= \rho_v \frac{K K_{rg}}{\mu_g} \\
 D_{T1} &= \frac{C_s}{w} D_d \frac{\partial w}{\partial T} & D_{Pv1} &= C_s \frac{D_d}{w} & D_{Pg1} &= D_s & C_{T2} &= c_m \rho_0 & D_{T2} &= \lambda - K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} c_{p_l} T \\
 D_{Pv2} &= K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} c_{p_l} T + \delta_v c_{p_a} T - \delta_v c_{p_v} T & & & & & D_{Pg2} &= \rho_a \frac{K K_{rg}}{\mu_g} c_{p_a} T + \rho_v \frac{K K_g}{\mu_g} c_{p_v} T
 \end{aligned}$$

Os resultados obtidos para as equações de conservação de umidade e calor são baseadas na discretização de Santos [6], onde se leva em consideração o transporte de ar, portanto, os termos que estão relacionados a pressão de gás são desconsiderados das Eq. (23) e (25), obtendo-se as Eq. (26) e (27):

$$\left( \frac{C_{Pv0}}{\Delta t} + \frac{D_{Pve0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pvw0}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left( \frac{C_{T0}}{\Delta t} + \frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2} \right) T_p = \frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{Pve0}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{Pvw0}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{C_{pv0}}{\Delta t} P_{vp}^0 + \frac{C_{T0}}{\Delta t} T_p^0 \quad (26)$$

$$\left( \frac{D_{Pve2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pvw2}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left( \frac{C_{T2}}{\Delta t} + \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} \right) T_p = \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{Pve2}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{Pvw2}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{C_{T2}}{\Delta t} T_p^0 \quad (27)$$

#### 4 Algoritmo Genérico para Resolução das Equações Governantes

Uma vez com o sistema de equações algébricas obtido pela discretização em volumes finitos (Patankar [9]), é necessário utilizar um algoritmo capaz de solucionar este sistema de equações algébrico, assegurando sua robustez numérica. Neste caso, utiliza-se o método do Algoritmo Matriz MultiTriDiagonal (MTDMA), do inglês *MultiTriDiagonal-Matrix Algorithm*, proposto por Mendes, *et al.* [10].

A discretização das equações governantes no domínio fornece equações algébricas na forma da Eq. (28):

$$A_i \cdot x_i = B_i \cdot x_{i+1} + C_i \cdot x_{i-1} + D_i \quad (28)$$

onde  $x_i$  é um vetor que contém as variáveis dependentes. No caso do modelo de Santos [6], o vetor é definido pela Eq. (29):

$$x_i = \begin{bmatrix} P_{v_i} \\ P_{g_i} \\ T_i \end{bmatrix} \quad (29)$$

Para o modelo proposto, as variáveis dependentes são semelhantes, com exceção do transporte de gás que é substituído pela concentração de sal, e do da pressão de vapor que é representada pelo conteúdo de umidade( $w$ ), assim como na Eq. (30):

$$x_i = \begin{bmatrix} w_i \\ C_s \\ T_i \end{bmatrix} \quad (30)$$

No método tradicional, o TDMA, proposto por Patankar [9], os coeficientes A, B, e C são tensores de primeira ordem, já no método empregado para este trabalho os tensores passaram a ser de segunda ordem. O vetor  $x_i$  pode expresso como uma função de  $x_{i+1}$ :

$$x_i = P_i \cdot x_{i+1} + q_i \quad (31)$$

onde  $P_i$  é um tensor de segunda ordem também.

Substituindo a Eq. (31) com  $i=i-1$  e substituindo na Eq. (28), tem-se a Eq. (32):

$$(A_i - C_i \cdot P_{i-1}) x_i = B_i \cdot x_{i+1} + C_i \cdot q_{i-1} + D_i \quad (32)$$

Isolando  $x_i$  na Eq. (32):

$$x_i = [(A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} \cdot B_i] \cdot x_{i+1} + (A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} (C_i \cdot q_{i-1} + D_i) \quad (33)$$

Comparando agora a Eq. (33) com a Eq. (31), obtém-se os parâmetros  $P_i$  e  $q_i$  mostrados nas Eq. (34) e (35):

$$P_i = [(A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} \cdot B_i] \quad (34)$$

$$q_i = (A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} (C_i \cdot q_{i-1} + D_i) \quad (35)$$

Deste modo, realiza-se uma varredura a partir do último nó até o primeiro, visto que  $x_i = q_i$ , para  $i=n$  (último nó).

## 5 Resultados

Para verificar o código computacional desenvolvido, foram realizados testes em comparação aos resultados do modelo proposto por Zanden *et al.* [8]. Todas as avaliações foram realizadas em uma parede de concreto com espessura de 10 cm e considerando 20 nós na malha computacional. O lado interno da parede é considerado adiabático e o lado externo está em contato com o ambiente, que apresenta temperatura de 20 °C e uma quantidade de umidade inicial ( $w_0$ ) de 80 kg/m<sup>3</sup>, variando de acordo com as estações do ano, seguindo a Eq. (36), assim como no modelo de Zanden *et al* [8]:

$$w = 70 \text{ sen}(1,9924 \times 10^{-7} \cdot t) + 80 \quad (36)$$

onde  $t$  representa o tempo decorrido em segundos.

O passo de tempo utilizado foi de 10800 segundos, ou seja, de 3 horas. Em todas as situações o sal presente dentro da amostra e na névoa salina é composto de íons Cloreto (Cl<sup>-</sup>), que apresenta um coeficiente de difusão na água de  $1,26 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s a 20 °C. A Figura 2 representa o sistema em que foram feitos os testes em condições iniciais.

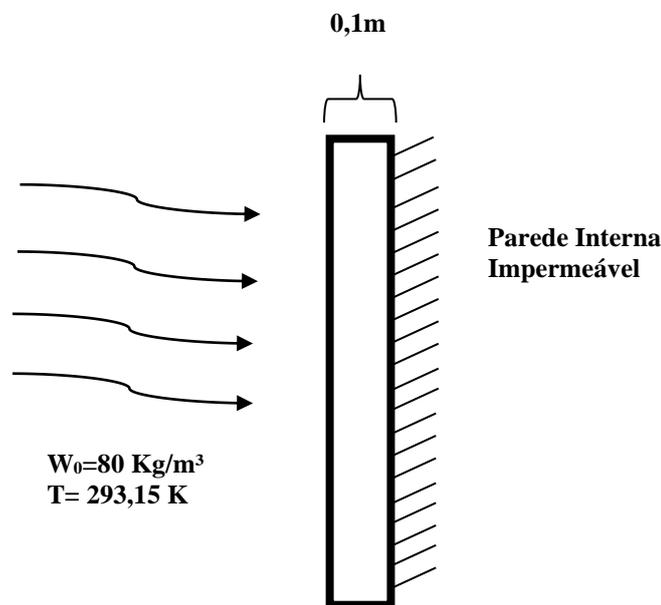


Figura 2- Condições iniciais dos testes de 1 a 4

Para os casos apresentados aqui, a quantidade água presente na amostra varia igualmente pois, a temperatura do sistema é constante em todos os casos e a variação da quantidade de sal não interfere na umidade do ambiente. Portanto, para os 4 testes apresentados, a Figura 3 representa os perfis da quantidade de água na amostra para o modelo proposto e para o modelo de Zanden *et al* [8].

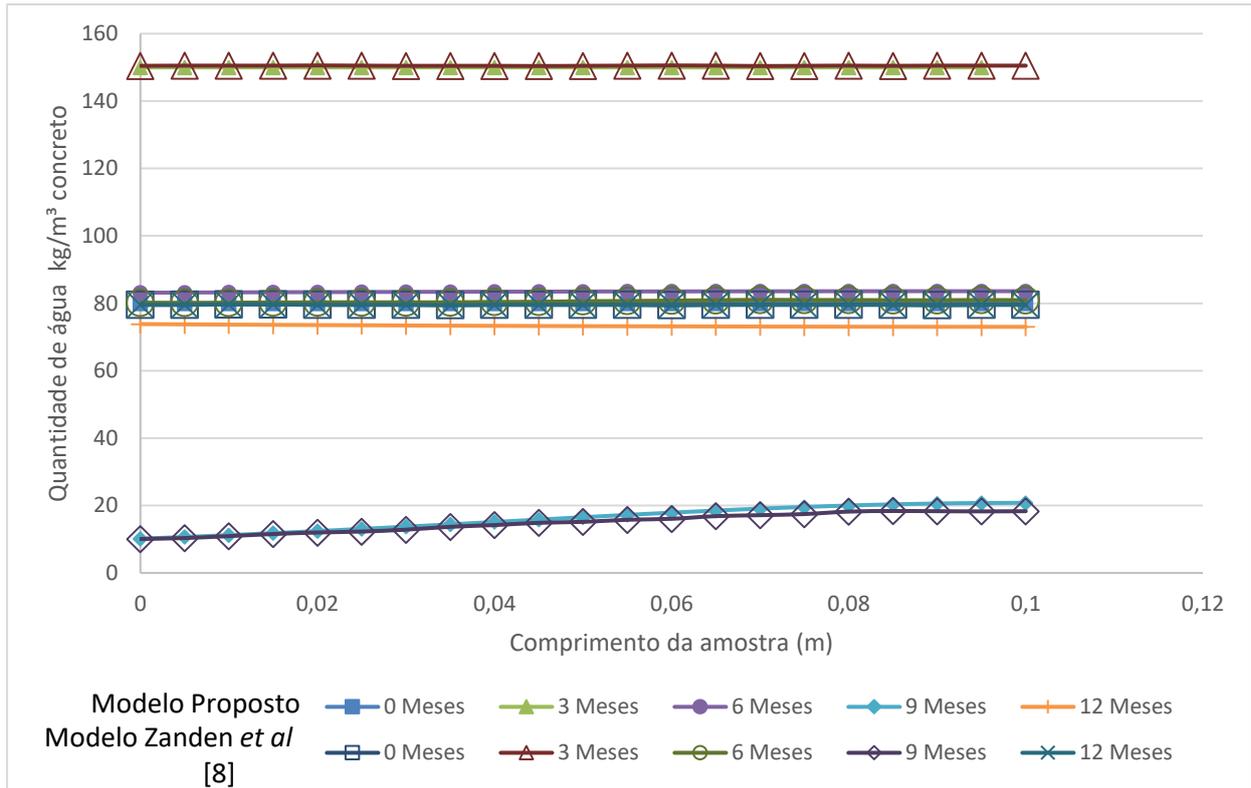


Figura 3 - Perfil da quantidade de água no decorrer do tempo ao longo da amostra

Como observado, os perfis da quantidade de água na amostra variam bastante de acordo com o tempo, chegando a aproximadamente 150 kg/m<sup>3</sup> de água na parede, isto mostra que por volta do terceiro mês do ano temos o período mais úmido, pode-se supor que estaríamos no período de verão que apresenta grandes quantidades de chuva. De forma análoga, ao nono mês do ano estaríamos entrando no período de inverno, caracterizado pela estiagem e ar seco. Nos períodos mais amenos, mês 6 e mês 12 (outono e primavera) a umidade atinge um valor médio.

A Figura 3 mostra que para os perfis do fluxo de água da amostra não há diferenças significativas entre os dois modelos, sendo similares para o transporte de água. Os pequenos desvios observados podem ser desconsiderados, levando em conta as aproximações que foram realizadas em ambos os modelos computacionais e da obtenção de dados realizada de forma manual a partir dos gráficos do modelo de Zanden *et al* [8].

Os testes da Tabela 1 referem-se as situações aplicadas em cada uma das simulações realizadas para verificação do modelo proposto.

**Tabela 1 - Testes realizados para a verificação do modelo proposto**

Teste	Quantidade de sal inicial	Concentração da névoa salina	Fluxo de entrada	Fluxo de Saída
1	1 kg/m <sup>3</sup>	0	Água	Água
2	1kg/m <sup>3</sup>	0	Água	Água e sal
3	0	19 kg/m <sup>3</sup>	Água e sal	Água
4	0	19kg/m <sup>3</sup>	Água e sal	Água e sal

No primeiro teste, considera-se que já existe uma certa quantidade de cloreto na amostra de concreto, cerca de 1kg de sal por m<sup>3</sup> de concreto, isto implica em 12,5 kg de sal por m<sup>3</sup> de água. Não há névoa salina, ou seja, o único fluxo é o de água (umidade) entrando e saindo da amostra de acordo

com as condições do ambiente. O teste foi realizado supondo um período de 1 ano. A Figura 4 mostra os resultados obtidos da simulação para o modelo proposto e para o de Zanden *et al* [8] em seu estudo.

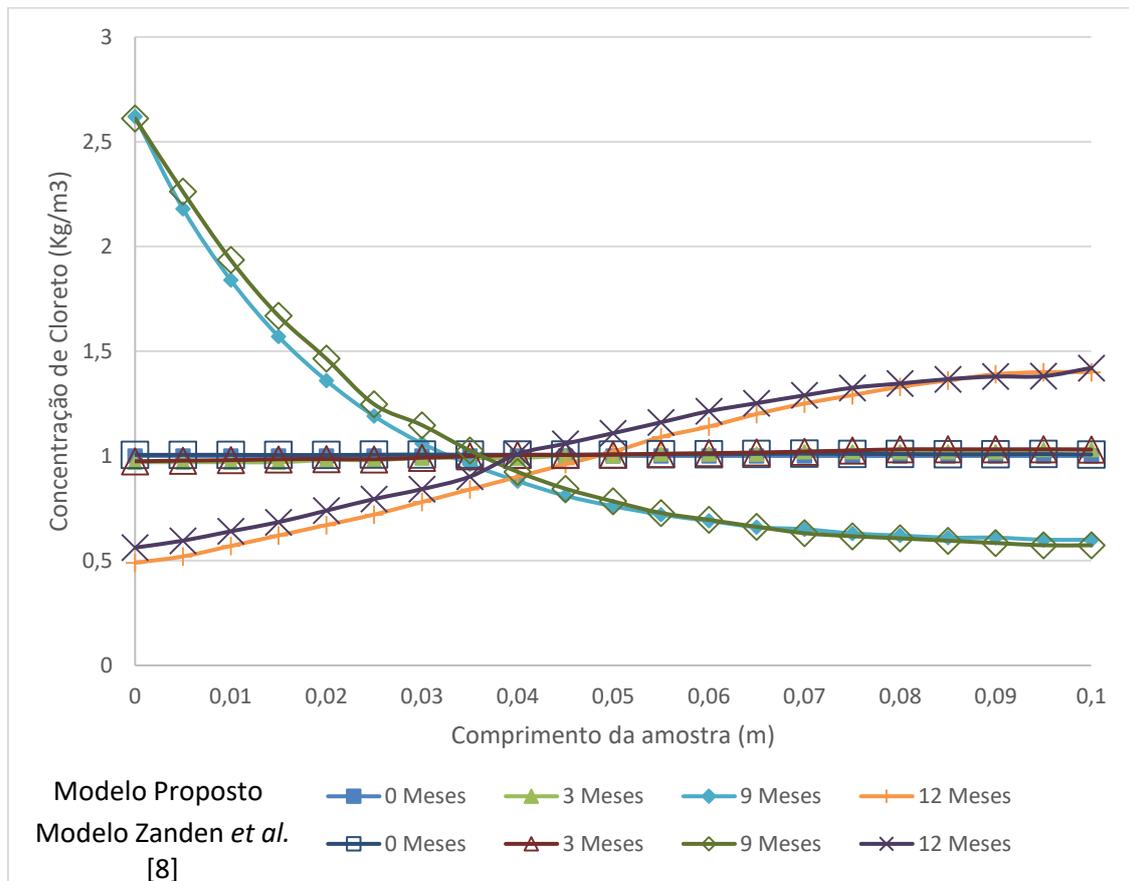


Figura 4 - Avanço do Cloreto ao longo da amostra para Teste 1

Analisando o Teste 1, e fazendo uma correlação com a umidade de acordo com a época do ano, pode-se observar que não há grande variação da concentração de cloreto no terceiro mês. Isto ocorre devido a quantidade de sal na amostra estar em equilíbrio, ou seja, cada nó apresenta a mesma quantidade de sal. Por mais que haja entrada de uma grande quantidade de água, isso não interfere na distribuição de sal entre os nós.

Do mês 3 ao mês 9, a umidade do ambiente vai diminuindo e há uma grande movimentação de íons cloreto para o primeiro nó. Isto porque há saída de água da parede, que apresenta também uma diferença de concentração de sal com o ambiente, fazendo com que os íons sejam carregados pela água até a face mais externa do concreto, causando um desequilíbrio. Do nono mês ao décimo segundo mês, a umidade volta crescer e com isso volta o fluxo de água para dentro da amostra, que por sua vez, carrega o sal para os últimos nós, devido ao desequilíbrio causado no sistema anteriormente, fazendo com que o mesmo tente voltar a estabilidade.

Comparando o modelo proposto ao de Zanden *et al.* [8] outra vez pode-se verificar uma grande similaridade entre os resultados, os perfis da entrada e saída de sal ao longo da amostra apresentam o mesmo padrão apesar das diferenças.

Para este Teste 2, assim como no Teste 1, já existe cloreto presente na amostra ( $1 \text{ kg/m}^3$ ), porém neste caso, quando a água deixa a amostra, em épocas de baixa umidade, à mesma leva consigo parte dos íons cloreto já presentes, não havendo possibilidade destes íons adentrarem novamente o concreto. Os resultados obtidos e sua comparação encontram-se na Fig. 5 em um período de 0 a 12 meses.

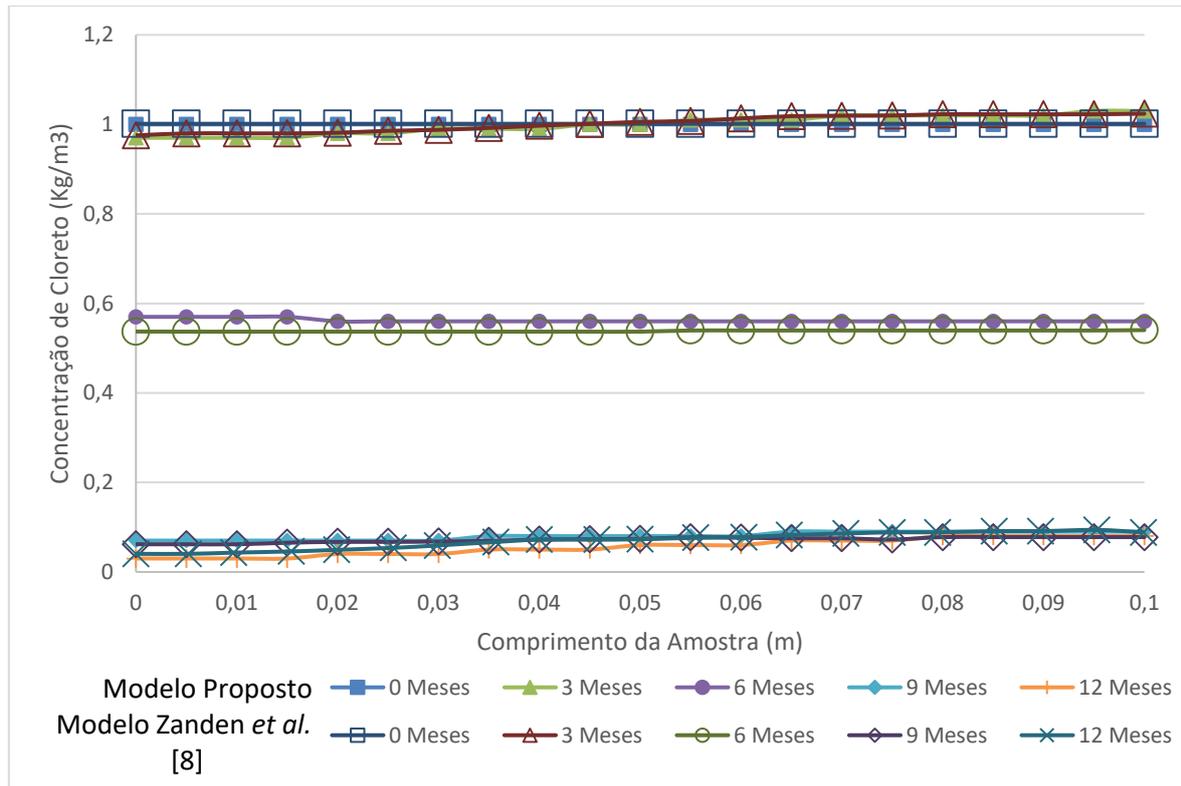


Figura 5 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 2

De forma diferente ao Teste 1, observa-se no gráfico uma grande queda da quantidade de sal presente na amostra no decorrer do tempo. Como explicado anteriormente, o sal consegue ser levado para fora do concreto junto com a água em períodos de estiagem, porém não há fluxo de entrada de íons, fazendo com que a amostra seja “lavada”. Portanto, no decorrer do tempo a tendência seria de sair todo o cloreto presente dentro da parede.

Similarmente as análises feitas nos perfis da água na amostra e no Teste 1, observa-se grande correspondência entre os dois modelos apresentados, as linhas dos gráficos coincidem em grande parte da amostra, apresentando o mesmo perfil. As poucas variações que observadas são para um maior número de casas decimais, o que pode ser desconsiderado neste caso.

O Teste 3 apresenta a amostra de concreto virgem, ou seja, não há quantidade de sal inicialmente, porém ela está sujeita à uma névoa salina de concentração de  $19 \text{ kg/m}^3$  de cloreto. Estes íons adentram os poros do concreto e, por sua vez, permanecem na amostra, não havendo fluxo de sal saindo para o ambiente. Obtendo-se, assim, as Figuras 6 e 7 para o período de 2 anos.

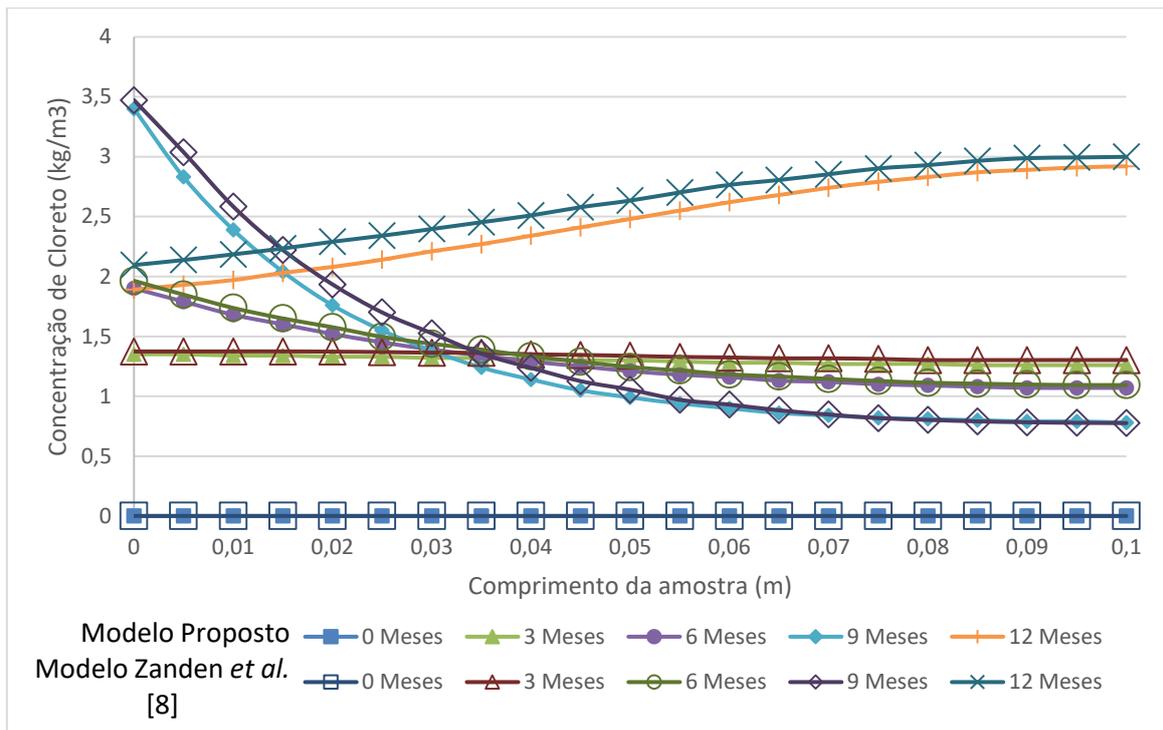


Figura 6 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 3 (de 0 a 12 meses)

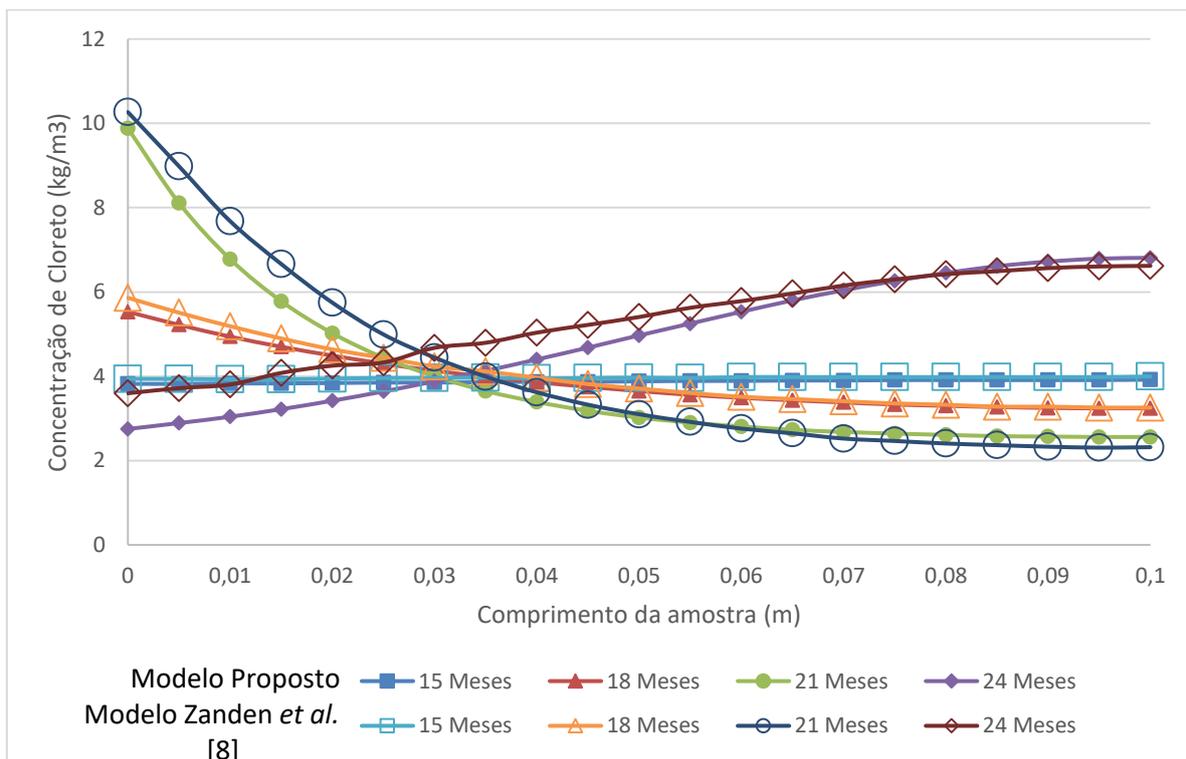


Figura 7 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para a Teste 3 (de 15 a 24 meses)

Pode-se observar na Fig. 6 e na Fig. 7, que existem 2 períodos de grande entrada de sal na amostra, aos 3 meses e aos 15 meses, nestes períodos, há um grande aumento da umidade, ocasionando a entrada do sal junto com a água nos poros do concreto. Este sal não consegue sair da amostra, nem em períodos de estiagem, isso porque não há fluxo de saída de sal, assim como no Teste 1, portanto, o sal apenas chega até o primeiro nó da parede, ocasionando picos de concentração no

inverno, como ocorre no nono e no vigésimo primeiro mês. Após esse período, volta a entrar mais água e mais sal com o pequeno aumento da umidade, o que ocasiona os perfis do mês de fechamento do primeiro e do segundo ano. Nestes meses, grande parte do cloreto vai para os últimos nós, antes com menor concentração de sal, na tentativa de colocar o sistema novamente em equilíbrio.

Similarmente ao Teste 3, no Teste 4, inicialmente a quantidade de cloreto presente na amostra é zero, porém, esta parede também é atingida pela névoa salina, na mesma concentração apresentada anteriormente. A grande diferença deste teste está no fluxo de sal que agora pode entrar e sair da amostra, juntamente com a água. Os resultados do Teste 4 são expostos na Fig. 8 para um período de 0 a 12 meses.

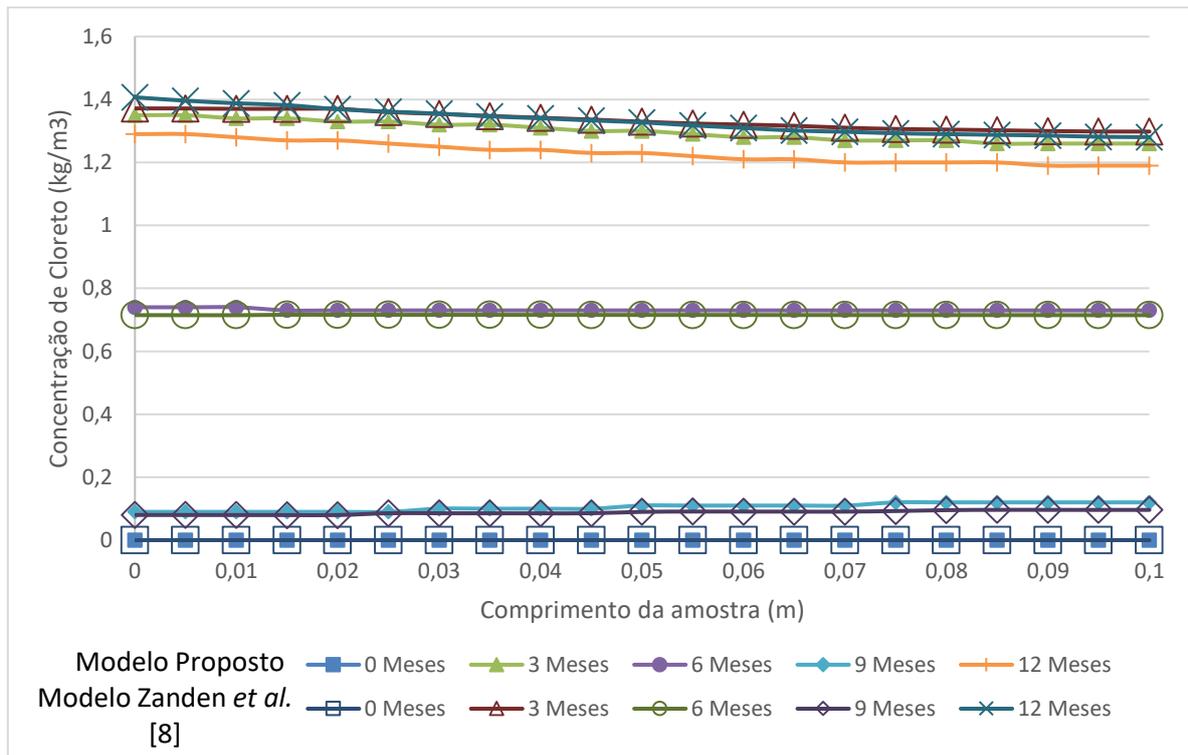


Figura 8 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 4

Diferente de todos os testes anteriores, os perfis do último teste aparentam ser mais constates e mais compatíveis com o a Fig. 3, que apresenta os perfis da quantidade de água. Isto é decorrente da entrada e saída livre de sal da amostra, assim como ocorria com a água nos testes anteriores. Então, dessa mesma forma, toda vez que há períodos de estiagem, os íons cloreto são levados para fora da amostra pela água, assim como ele é levado para dentro da amostra em períodos de maior umidade.

Também pode-se analisar a Fig. 8 verificando que a saída de sal da amostra não é tão eficiente quanto a entrada, causando um aumento da quantidade de íons cloreto dentro do concreto ao longo do tempo. Uma possível causa deste fenômeno é devido a diferença de concentração de íons cloreto dentro e fora da amostra. Quando o sal está sendo levado para dentro da amostra, o gradiente é maior, pois há uma grande concentração de sal no ambiente e uma pequena concentração na parede. Caso contrário, quando o sal é levado para fora da amostra, está indo contra o equilíbrio, forçando a saída de sal para o ambiente que já tem concentração mais alta, causando menor eficiência no transporte de sal e, conseqüentemente, o acúmulo de sal na parede.

De acordo com a comparação feita entre o modelo proposto e o modelo de Zanden *et al* [8], verifica-se uma grande semelhança entre os resultados. Em todas as figuras apresentadas os perfis das curvas são análogos, com pequenos desvios que podem ser ocasionados devido à precisão numérica, ao passo de tempo utilizado, à quantidade de nós utilizadas, à quantidade de dias considerada para cada mês, 30 ou 31 dias, e também à forma manual de obtenção dos dados da curva do modelo

comparado. Estes desvios podem ser desconsiderados, de tal forma que os métodos podem ser considerados similares para o transporte de umidade e sal.

## 6 Conclusão

As estruturas de concreto estão constantemente sujeitas a diversos tipos de esforços, estresses, mudanças climáticas drásticas e ataques químicos. Todos estes processos, sejam eles físicos ou químicos, desgastam e reduzem o tempo de vida destas estruturas. Um dos grandes causadores destes danos é a corrosão através dos íons de sais, que penetram nos poros do concreto chegando até sua armadura, podendo ao longo do tempo causar uma degradação mais severa e condenar a estrutura.

Deste modo, buscou-se ao longo deste trabalho analisar a ocorrência do transporte de sal dentro das estruturas de concreto. Inicialmente, definiu-se as equações governantes que melhor definem este fenômeno. Então, através do método dos volumes finitos, introduzido por Patankar [9] em 1980, discretizou-se as equações, gerando um sistema de equações algébricas. Para que estas equações fossem resolvidas simultaneamente, aumentando a robustez numérica, aplicou-se o MTDMA. Enfim, para atingir integralmente o objetivo deste estudo, foram realizados diversos testes considerando diversas condições, utilizando o modelo de Zanden *et al* [8]. A verificação com esse modelo apresentou satisfatória similaridade nos resultados e, a partir deles, pode-se constatar nos processos de imbibição e secagem, a influência do transporte de umidade no deslocamento do sal dentro do meio poroso. Assim sendo, este trabalho mostrou-se promissor na análise do transporte de sal no meio poroso, sendo capaz de fornecer informações importantes para a prevenção dos processos de corrosão e deterioração do concreto.

## Agradecimentos

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

## Referências

- [1] Medeiros, M. H. F., Andrade, J. J.O., Helene, P, 2011. Concreto: Ciência e Tecnologia. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. IBRACON, São Paulo, 1ª edição.
- [2] Martins, A. A. A, 2006. Fenômenos de Transporte em Meios Porosos: Escoamento Monofásico e Transporte de Massa. Dissertação Doutorado. Universidade do Porto, Porto.
- [3] Pedroso, F.L., 2009. Concreto & Construções. IBRACON, Ano XXXVII, Nº53.
- [4] Derluyn, H.; Moonen, P; Carmeliet, J, 2014. "Journal of Mechanics and Physics of Solids". 26 Mar. 2017. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmps.2013.09.005>>.
- [5] Benite, A, 2011. Emissões de carbono e a construção civil. CTE (Centro de Tecnologia de Edificações). 29 Mar. 2017.<<http://www.cte.com.br/imprensa/2011-02-27-emissoes-de-carbono-e-a-construcao-civ/>>.
- [6] Santos, G. H, 2009. Transferência de Calor, Ar, Umidade Através de Elementos Porosos de Edificações. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [7] Chen-Charpentier, 2001. Numerical Methods for Flow and Transport in Porous Media, Retrieved from University of Wyoming Laramie, Department of Mathematics. 2001. 30 May. 2017 <<http://www.sci.sdsu.edu/compsciwork/IIIPASI/DOCUMENTS/COURSE%20NOTES/classnotesChen.pdf>>.
- [8] Zanden, A.J.J Van Der; Taher, A.; Arends, T, 2015. "Elsevier Journal". 5 May. 2019 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815001518>>.
- [9] Patankar, S. V, 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC Press, Boca Raton ,1ª edição.
- [10] Mendes, N.; Phillipi, P.C.; Lamberts, R, 2002. "International Journal of Heat and Mass Transfer"

30 Abr. 2017. <[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00172-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00172-7)>