

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

RHAYSSA MARYELL MARRA RIBAS

**TRANSPORTE DE CALOR, UMIDADE E SAL EM MEIOS
POROSOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

RHAYSSA MARYELL MARRA RIBAS

**TRANSPORTE DE CALOR, UMIDADE E SAL EM MEIOS
POROSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química, do Departamento
Acadêmico de Engenharia Química, da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gerson
Henrique dos Santos

PONTA GROSSA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Curso de Engenharia Química



TERMO DE APROVAÇÃO

Transporte de Calor, Umidade e Sal em meios porosos

por

Rhayssa Maryell Marra Ribas

Monografia apresentada no dia 01 de julho de 2019 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **aprovado**.

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
(UTFPR)

Prof. Pós- Dra. Maria Regina Parise
(UTFPR)

Profa. Dr. Gerson Henrique dos Santos
(UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos professores do curso de Engenharia Química da UTFPR- Ponta Grossa, que durante todo o curso me apoiaram, e me deram a base para que escrever este trabalho. Agradecer ao meu orientador Gerson que propôs o desenvolvimento deste trabalho e me forneceu todo o suporte para que eu pudesse concluí-lo. À minha Mãe, Marina Marra, e ao meu irmão, Vynycius Luiz Marra Ribas que sempre acreditaram em mim, me incentivaram a chegar até aqui, e tantas vezes me ajudaram em momentos difíceis. À minha família e amigos que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho e testemunharam o meu desenvolvimento diante dele.

Agradeço à Deus por ter me dado forças para superar todas as dificuldades e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Eu jamais teria conseguido sem vocês.

Obrigada!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Classificação dos poros em um meio poroso.....	10
Figura 2 - Transporte em série vapor-líquido-vapor em um poro preenchido de água.....	13
Figura 3 - Isoterma de equilíbrio.....	14
Figura 4 - Composição do concreto armado.....	15
Figura 5 - Estrutura de concreto armado.....	16
Figura 6 - Deterioração do concreto.....	17
Figura 7 - Volume de controle unidimensional.....	29
Figura 8- Condições iniciais dos testes de 1 a 4.....	32
Figura 9 - Perfil da quantidade de água no decorrer do tempo ao longo da amostra.....	33
Figura 10 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 1.....	35
Figura 11 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 2.....	36
Figura 12 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 3 (de 0 a 12 meses).....	37
Figura 13 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para a Teste 3 (de 15 a 24 meses).....	38
Figura 14 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 4.....	39

LISTA DE SÍMBOLOS

Índices

φ	Porosidade
V_p	Volume dos poros
V_t	Volume total
J	Fluxo de átomos
D	Coeficiente de Difusão
C	Concentração
Q	Vazão volumétrica do fluido
k	Coeficiente de permeabilidade
μ	Viscosidade
A	Área
P	Pressão
X	Cumprimento
δ_v	Coeficiente de Permeabilidade difusiva ao vapor
λ	Condutividade Térmica
S_i	Grau de saturação da fase i
S_l	Grau de saturação do líquido
S_v	Grau de saturação do vapor
S_g	Grau de saturação do gás
ρ	Massa específica
v	Velocidade
\dot{m}_{vl}	Taxa mássica de vapor se transformando em líquido
\dot{m}_{lv}	Taxa mássica de líquido se transformando em vapor
\dot{m}_{scr}	Taxa mássica dissolvida de sal se transformando em cristal
q_s	Fluxo de Sal
C_s	Concentração de sal
w	Teor de umidade
t	Tempo
P_v	Pressão de vapor
P_c	Pressão devido a capilaridade
K_l	Coeficiente de permeabilidade do líquido

L_v	Calor latente de vaporização
D_{salt}	Coeficiente de difusão do sal
q_s	Fluxo de sal
n_s	Coeficiente de saturação
T	Temperatura
∇	Gradiente
τ	Tortuosidade
ϕ	Umidade relativa
x^*	Fração molar para cristalização
x_0^*	Solubilidade do sal
N_s	Soma dos coeficientes estequiométricos dos íons de sal
N_w	Coeficiente estequiométrico da água
γ_{crl}	Energia interfacial entre o cristal e o líquido
γ_{gl}	Energia interfacial entre o líquido e o gás
r_p	Raio de acesso ao poro relativo à cristalização
v_l	Volume molar da fase líquida
v_w	Volume molar da água
v_{cr}	Volume molar do cristal
q_h	Fluxo de entalpia
ρ	Coeficiente de dilatação
h	Entalpia
c_m	Capacidade calorífica do material
c_l	Capacidade calorífica do líquido
c_v	Capacidade calorífica do vapor
c_{cr}	Capacidade calorífica do cristal
g	Aceleração da gravidade
L_{cr}	Calor latente de cristalização
R	Constante universal dos gases
K	Condutividade hidráulica
Ω ou	Entradas e saídas de um sistema
ϕ'	
J_v	Fluxo de vapor
J_l	Fluxo de líquido

P_{suc}	Pressão de sucção
P_{sat}	Pressão de saturação
k_{rg}	Permeabilidade relativa do ar
$\nabla \cdot$	Operador divergente
θ	Conteúdo volumétrico de umidade
q	Fluxo de Calor
c_{pa}	Calor específico a pressão constante do ar
c_{pl}	Calor específico a pressão constante do líquido
c_{pv}	Calor específico a pressão constante do vapor
S'	Termo fonte
D_s	Coefficiente de dispersão
D_m	Coefficiente de difusão do sal
r	Raio do poro

Subíndices

l	Líquido
g	Gás
cr	Cristal
v	Vapor
c	Capilaridade
m	Material
sat	Saturação
suc	Sucção
h	Entalpia
s	Sal

RESUMO

MARRA, Rhayssa. **Transporte de Calor, Umidade e Sal em Meios Porosos**. 2019. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

As estruturas de concreto podem sofrer diversos tipos de danos, que podem diminuir consideravelmente a sua vida útil. Um dos responsáveis por este processo é o transporte de sais para dentro dos poros do concreto. Além de acelerar o processo de corrosão na armação de aço, estes sais podem se concentrar em alguns pontos (nucleação), causando trincas e fissuras na estrutura, diminuindo conseqüentemente, a sua resistência. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar numericamente como ocorre esse transporte para dentro das estruturas porosas, considerando simultaneamente o transporte de calor, umidade e sal no meio poroso. A discretização das equações governantes foi realizada usando o método dos volumes finitos, sendo o sistema de equações algébricas resolvido por meio do Algoritmo da Matriz Multi Tri-Diagonal (MTDMA- MultiTriDiagonal Matrix Algorithm), que permite a resolução simultânea das equações governantes. Para a verificação do modelo, diversas simulações considerando diferentes condições de contorno foram realizadas e comparadas com modelo isotérmico apresentado por Zanden, Taher e Arends (2015), apresentando satisfatória semelhança entre os resultados. A partir dos resultados pode-se observar também a influência do transporte de umidade no deslocamento do sal dentro do meio poroso, tanto no processo de secagem, quanto no processo de umidificação. Deste modo, 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.

Palavras chave: Transporte de sal. Meio poroso. Concreto.

ABSTRACT

MARRA, Rhayssa. **Transporte de Calor, Umidade e Sal em Meios Porosos**. 2019. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química-Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Concrete structures can suffer from different types of damage, which can considerably shorten their life. One of the responsible for this process is the transport of salts into the pores of the concrete. Besides accelerating the corrosion process in the steel frame, these salts can concentrate at some points (nucleation), causing cracks in the structure, consequently decreasing the resistance. In this context, the objective of this work is analyze numerically 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 by means of MultiTriDiagonal Matrix Algorithm (MTDMA), which allows the simultaneous resolution of the governing equations. For the verification of the model, several simulations considering different boundary conditions were performed and compared with the isothermal model presented by Zanden, Taher and Arends (2015), presenting satisfactory resemblance between the results. From the results it is possible to observe the influence of moisture transport on the salt displacement inside the porous medium, both in the drying process and in the inhibition process. Thus, this work was promising in the analysis of the salt transport in the porous medium, being able to provide important information for the prevention of the corrosion and deterioration processes of the concrete.

Keywords: Transport of salt. Porous medium. Concrete.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 MEIO POROSO	14
3.1.1 Classificação dos Poros	14
3.1.2 Capilaridade.....	16
3.1.3 Lei de Fick	16
3.1.4 Lei de Darcy.....	17
3.1.5 Permeabilidade Difusiva ao Vapor (δ_v)	17
3.1.6 Condutividade Térmica (λ).....	18
3.1.7 Isotermas de Equilíbrio	19
3.2 CONCRETO	20
3.2.1 Concreto Armado.....	20
3.3 CORROSÃO	21
3.3.1 Corrosão do Concreto Armado.....	22
3.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA TRANSPORTE DE CALOR, UMIDADE E SAL	24
3.4.1 Modelo de Derluyn, Moneen e Carmeliet (2014)	24
3.4.2 Modelo de Poupeleer (2007)	27
4 METODOLOGIA	29
4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA	29
4.1.1 Transporte de Umidade	29
4.1.2 Transporte de Calor	31
4.1.3 Transporte de sal.....	32
4.2 DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES	34

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6 CONCLUSÕES	47
7 REFERÊNCIAS	48

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 subseqüentes trouxe modelos de previsão da deterioração em concreto, devido principalmente ao conhecimento do comportamento de gases e líquidos em meios porosos (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

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, 2006).

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 (2009), 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. (2014), 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, 2011). 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.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados quais os objetivos gerais e específicos para a realização deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar numericamente o transporte de calor, umidade e sal em concreto armado (meio poroso).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar a modelagem matemática do transporte de calor, umidade e sal em meios porosos;

- Implementar a modelagem matemática em um código computacional, empregando o método dos volumes finitos para discretização das equações governantes;
- Realizar o estudo de alguns casos utilizando simulações numéricas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são descritos conceitos fundamentais para o entendimento do problema principal abordado neste trabalho, como, modelos matemáticos disponíveis na literatura que visam descrever o transporte de massa e calor em meios porosos.

3.1 MEIO POROSO

O meio poroso consiste em materiais que apresentam espaços vazios distribuídos de forma regular em sua estrutura. Estes podem ser notados nos diferentes tipos de materiais que existem, como: metálicos, poliméricos, semicondutores, cerâmicos e os compósitos (material formado pela junção de outros dois distintos tanto em propriedades físicas como químicas) (SANTOS et al., 2016).

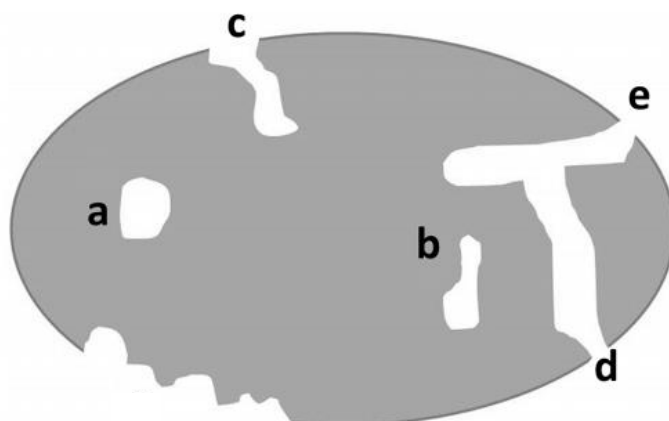
A porosidade de um material (φ), ou seja, a fração em volume de espaços vazios pode ser calculado pela divisão entre o volume dos poros (V_p) e o volume total (V_t):

$$\varphi = \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

3.1.1 Classificação dos Poros

A forma como os poros se apresentam no material pode ser classificada em poros abertos ou fechados, internos ou externos e apresentar diversos formatos, conforme mostra a Figura 1 (SANTOS et al., 2016).

Figura 2 - Classificação dos poros em um meio poroso



Fonte: Santos et. al. (2016)

Na Figura 1, é possível identificar os seguintes formatos de poros:

- (a) e (b) poros internos;
- (c) poro aberto;
- (d) e (e) poros abertos interligados.

Segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), do inglês *International Union of Pure and Applied Chemistry*, os poros podem ser classificados de acordo com seu tamanho em microporos, mesoporos e macroporos conforme a Tabela 1 (SANTOS et. al, 2016):

Tabela 1 - Classificação dos poros de acordo com o tamanho segundo a IUPAC

Classificação	Tamanho
Microporos	Diâmetro < 2 nm
Mesoporos	2 nm < Diâmetro < 50 nm
Macroporos	Diâmetro > 50nm

Fonte: Santos et. al. (2016)

3.1.2 Capilaridade

O fenômeno da capilaridade consiste na capacidade de um fluido ascender ou descender através de dutos muito finos (capilares) e ocorre devido as forças de coesão e adesão.

Quando um tubo capilar de vidro é imerso em um líquido como a água, nota-se que a água adere ao vidro, ou seja, a adesão é uma força de atração entre as moléculas do vidro e as moléculas do fluido, já a de coesão é a força intermolecular, ou seja, aquela que permite que as moléculas do fluido permaneçam unidas. Durante o fenômeno da capilaridade, as moléculas que aderem ao vidro acabam carregando as outras pela força de coesão, permitindo assim que o fluido ascenda pelo tubo capilar. O fluido subirá enquanto a força de adesão for maior do que a força de coesão (REDELUCCI, 2005).

Esse fenômeno é comum em sólidos porosos, devido aos poros serem pequenos espaços vazios, podendo comportar-se como os dutos capilares dentro do sólido permitindo assim a passagem do fluido em seu interior devido a este fenômeno.

As forças por contato superficial, o gradiente de pressão e a gravidade são fatores que dão origem ao fluxo de líquido por capilaridade. Para que ocorra este fluxo no meio poroso é necessário que haja a formação de pontes de líquido. Isto ocorre apenas se a interação entre as moléculas do líquido for mais importante do que a interação com a superfície sólida (SANTOS, 2009).

3.1.3 Lei de Fick

A difusão mássica é o processo pelo qual as partículas passam de uma região de maior concentração para outra de menor concentração, de forma a diminuir o gradiente de concentração até que se obtenha um equilíbrio. Em 1855, o médico e fisiologista Adolf Fick propôs este conceito de difusão mássica representado pela Equação (2), para um fluxo unidimensional:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

onde J é o fluxo de átomos ou moléculas que atravessa de uma região a outra, D é o coeficiente de difusão e C é a concentração da substância variando ao longo de uma direção x de sistema de coordenadas ortogonal.

3.1.4 Lei de Darcy

Em 1856, Henry Darcy propôs que para um sistema monofásico horizontal, o fluxo de um fluido que atravessa uma amostra porosa é diretamente proporcional a variação de pressão ao longo do comprimento expressa pela Equação (3):

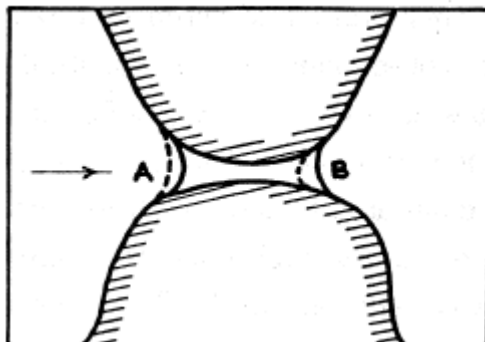
$$Q = -\frac{k}{\mu} A \left(\frac{\Delta P}{X} \right) \quad (3)$$

onde Q é a vazão volumétrica do fluido, A é a área da seção reta, X é o comprimento, ΔP é a diferença de pressão, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e k é o coeficiente de permeabilidade.

3.1.5 Permeabilidade Difusiva ao Vapor (δ_v)

O coeficiente de permeabilidade difusiva ao vapor está associado a lei de Fick, pois ele está relacionado diretamente ao movimento das moléculas de vapor de água dentro do meio poroso que criam um fluxo difusivo do meio mais concentrado para o que possui menor concentração. A formação de líquido dentro dos poros gera pontes nos poros menores aumentando a permeabilidade, ou seja, quanto maior a umidade dentro de um meio poroso maior será sua permeabilidade difusiva ao vapor, conforme a Figura 2 (SANTOS, 2009).

Figura 2 - Transporte em série vapor-líquido-vapor em um poro preenchido de água



Fonte: Phillip e De Vries (1957 apud SANTOS, 2009)

No lado A, apresentado na Figura 2, a pressão de vapor é maior, então a condensação do mesmo no outro (B), onde a pressão é menor, ocorre a evaporação. Caso os poros apresentem condições extremas com relação a quantidade de água, ou seja, esteja seco ou saturado, ocorre uma redução no transporte do vapor devido à redução das pontes líquidas e na dificuldade da movimentação do vapor, respectivamente. Outro fator que interfere diretamente na permeabilidade difusiva é a temperatura, isto porque este fator interfere na pressão de vapor, ou seja, caso seja aplicado um gradiente de temperatura, ocorrerá uma difusão do vapor do lado mais quente para o mais frio, já que a pressão parcial de vapor é maior onde a temperatura é maior (SANTOS, 2009).

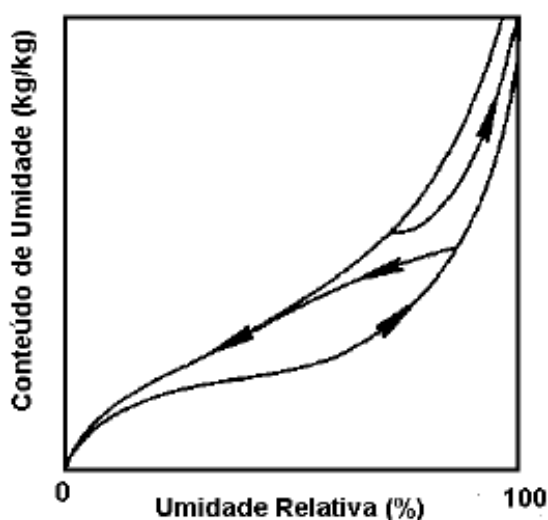
3.1.6 Condutividade Térmica (λ)

A condutividade térmica é o coeficiente que apresenta a capacidade que um meio tem de conduzir calor, seja ele sólido, líquido ou gasoso, formado por ar e vapor de água. Neste último, pode-se atribuir a variação da condutividade de acordo com a quantidade de vapor de água no ar, pois o ar é considerado um bom isolante, sendo assim em condições secas a transmissão de calor é mais baixa, quando o ar é mais úmido tem maior capacidade de conduzir calor (SANTOS, 2009).

3.1.7 Isotermas de Equilíbrio

As chamadas curvas isotermas de equilíbrio são obtidas através da relação entre a pressão parcial de vapor e o conteúdo de umidade, em temperatura constante e um meio não saturado. Obtidas experimentalmente, as curvas de adsorção e dessorção são apresentadas na Figura 3, sendo elas a inferior e a superior, respectivamente, e as curvas entre elas são processos intermediários que podem ocorrer no meio do poro.

Figura 3 - Isoterma de equilíbrio



Fonte: Santos (2009)

Para a obtenção destas curvas, é necessário que a temperatura e a umidade relativa sejam controladas. Para o controle da umidade são utilizadas pontes salinas saturadas, porém, este método só garante pontos mensuráveis até 96% de umidade relativa, a extrapolação desta curva pode ser obtida através da curva de pressão de intrusão adquirida por porosimetria a mercúrio (MENDES, 1997).

3.2 CONCRETO

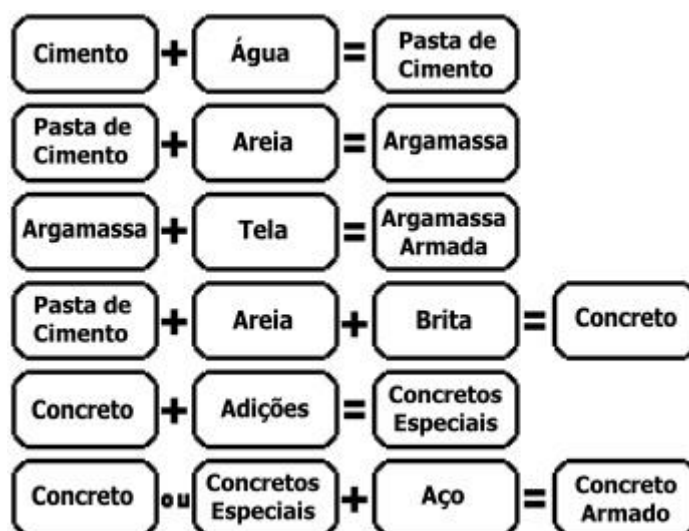
O concreto pode ser considerado basicamente a mistura de água, cimento, pedra e areia. Este sólido pode apresentar diversas características dependendo do seu agregado e da natureza da pasta (mistura de água e cimento).

No preparo do concreto, a mistura de água e cimento é responsável pela aglomeração dos componentes que dão origem ao concreto, interferindo diretamente em fatores como a densidade e a porosidade, os quais tem influência direta tanto na permeabilidade quanto na resistência das estruturas de concreto.

3.2.1 Concreto Armado

Existem diversas misturas que podem dar origem a concretos com diferentes características de acordo com a finalidade do mesmo. O objeto principal de estudo deste trabalho é o chamado concreto armado o qual pode ter sua composição explicada pela Figura 4.

Figura 4 - Composição do concreto armado

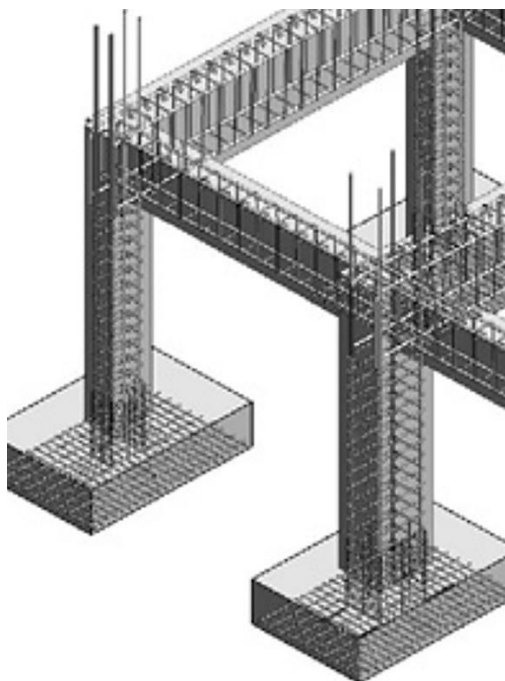


Fonte: Portal do Concreto (2016)

O concreto armado é a junção do concreto normal ou de concretos especiais com barras de aço, as quais tem como objetivo conferir a estrutura maior resistência

à esforços de tração, pois o concreto sozinho apresenta apenas boa resistência à compressão sendo insuficiente quando se trata de tração (BOTELHO, 2005).

Figura 5 - Estrutura de concreto armado



Fonte: Santos (2005)

3.3 CORROSÃO

Por corrosão, pode-se entender a deterioração de um material, ou seja, sua degradação ao longo do tempo, que em geral ocorre quimicamente de forma espontânea. A degradação é comumente associada a materiais metálicos que sofrem o processo eletroquímico, porém pode-se atribuir este nome também a deterioração de outros materiais como borracha, concreto, polímeros e madeira que segundo Gentil (1996), sofrem ação química do meio ambiente. A perda de elasticidade de uma borracha por ação do ozônio (O_3) que oxida a borracha, por exemplo, pode ser considerado uma forma de corrosão.

3.3.1 Corrosão do Concreto Armado

A deterioração do concreto armado pode ter diferentes causas. Segundo Gentil (1996), a deterioração pode estar associada a fatores mecânicos como: vibrações e erosão, fenômenos físicos como variações de temperatura, biológicos como bactérias e fungos ou químicos como a ação de ácidos e sais. O enfoque deste trabalho é no estudo da corrosão do concreto armado pela ação salina como é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Deterioração do concreto



Fonte: Adaptado de Cava (2016)

Os sais podem ser muito agressivos as estruturas de concreto armado, afinal eles podem atingir tanto a pasta do cimento utilizado para fazer o concreto como a armadura. Os diferentes tipos de sais causam diferentes ações nas estruturas, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Corrosão por diferentes tipos de sais

Tipo de Sal	Exemplo de reação	Corrosão
Sais de amônio	$2\text{NH}_4\text{Cl} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{NH}_3(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}$	Reação elimina amônia e hidróxido de cálcio responsável pela proteção alcalina do concreto
Sais de magnésio	$\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{Ca}^{2+}$	Formação de hidróxido de magnésio insolúvel com lixiviação dos íons de cálcio sob forma de sal solúvel
Sais facilmente hidrolisáveis ($\text{FeCl}_3, \text{AlCl}_3$)	$\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{HCl}$ $\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{HCl}$	Formação de ácido clorídrico quando reagem com água
Sais com os ânions de íons sulfato (SO_4^{2-})	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $3\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 19\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$	A formação de cristais de sulfoaluminato de cálcio acontece com grande aumento no volume causando grande pressão interna podendo resultar em fissura e desagregação da massa do concreto.

Fonte: Gentil (1996)

A corrosão causada pelos diferentes tipos de sais pode causar sérios danos a estruturas de concreto. A formação de cristais do sal dentro dos poros de construções de concreto armado ocorre pelo transporte dos mesmos solúveis em

água de forma convectiva e difusiva para dentro dos capilares. Uma vez que estes sais estão presentes no concreto, eles começam a secar e com isto começa o processo de cristalização. A cristalização causa um aumento do volume do sal com decorrente criação de pressão interna, causada por forças expansivas que pode levar a rachadura do concreto tornando-o mais suscetível a outros tipos de deterioração, assim como deixando exposta sua armadura (DERLUYN; MOONEN; CARMELIET, 2014).

3.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA TRANSPORTE DE CALOR, UMIDADE E SAL

Nesta seção do referencial teórico, são descritos alguns modelos encontrados na literatura para o transporte de calor, umidade e sal em meios porosos.

3.4.1 Modelo de Derluyn, Moneen e Carmeliet (2014)

Em 2014, estes pesquisadores propuseram um modelo para o transporte de calor, sal e umidade. Descreveram o transporte de umidade através das equações de balanço de massa para líquido, vapor e íons de sal, apresentadas nas Equações (4), (5) e (6), respectivamente.

$$\frac{\partial(\varphi_0 S_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla^T (\varphi_0 S_l \rho_l v_l) + \dot{m}_{vl} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\varphi_0 S_g \rho_v)}{\partial t} + \nabla^T (\varphi_0 S_g \rho_v v_v) - \dot{m}_{vl} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\varphi_0 S_l C_s)}{\partial t} + \nabla^T (q_s) + \dot{m}_{scr} = 0 \quad (6)$$

onde deve ser satisfeita a condição de saturação ($\varphi_l + \varphi_g + \varphi_{cr} = 1$) com os subíndices l,g e cr representando respectivamente as fases líquida, de gasosa e cristalina. $S_i = \varphi_i / \varphi_0$, corresponde ao grau de saturação da fase i , com $i=g,l,cr$. ρ é massa específica, v é a velocidade, C_s é a concentração de sal, q_s é o fluxo de sal,

\dot{m}_{lv} é a taxa mássica por unidade de volume de água transformando-se em vapor e \dot{m}_{scr} é a taxa mássica por unidade de volume dissolvida de sal transformando-se em cristal.

Das Equações (4) e (5) tem-se que o teor de umidade (w) ao longo do tempo é definido por:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_0 (S_l \rho_l + S_g \rho_v)}{\partial t} = \nabla^T (K_l \nabla P_c) + \nabla^T (\delta_v \nabla P_v) \quad (7)$$

sendo K_l o coeficiente de permeabilidade do líquido, P_c a pressão por capilaridade, P_v a pressão de vapor e δ_v o coeficiente de permeabilidade do vapor. A partir da Equação (7) e utilizando a relação de Kelvin modificada, a qual apresenta a pressão de vapor como dependente da pressão por capilaridade, obtemos a Equação (8) para o teor de umidade ao longo do tempo:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \varphi_0 \left(\rho_l \frac{\partial S_l}{\partial p_c} \frac{\partial p_c}{\partial t} + S_l \frac{\partial \rho_l}{\partial C_s} \frac{\partial C_s}{\partial t} \right) \quad (8a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla^T (K_l(C_s) \cdot \nabla P_c) + \nabla^T \left\{ \begin{array}{l} \delta_v(C_s) \cdot \nabla P_c + \frac{\delta_v(C_s)}{T} \rho_l(C_s) \cdot L_v \cdot \nabla T \\ -\delta_v \frac{P_v}{(1-N C_s v_l)} N \left[v_l(C_s) + C_s \frac{\partial v_l}{\partial C_s} \right] \nabla C_s \end{array} \right\} \quad (8b)$$

onde N é a soma dos coeficientes estequiométricos dos íons do sal e v_l é o volume molar da fase líquida, ρ_l é a massa específica do líquido L_v é o calor latente da evaporação. Na Equação (8) são consideradas a dependência da permeabilidade do líquido, a massa específica do mesmo na formação de cristais, e a diminuição da permeabilidade com a formação dos cristais.

Na Equação (6), para determinar o fluxo difusivo de sal (q_s), o transporte convectivo foi levado em conta, como proposto por Poupeleer et al. (2003).

$$q_{s,diff} = -D_{salt}(C_s) \nabla C_s \quad (9)$$

sendo D_{salt} o coeficiente de difusão no material poroso expresso por Delurin, Monnen e Carmelliet (2014 apud Buchwald, 2000) conforme:

$$D_{salt} = \left[\frac{D(C_s)}{\tau} \right] \varphi_0 S_l^{n_s} \quad (10)$$

onde $D(C_s)$ é o coeficiente de difusão em uma solução não diluída, τ é a direção dependente da tortuosidade do material poroso e n_s é o coeficiente de saturação.

O transporte convectivo do material ($q_{s,conv}$) é o descrito por:

$$q_{s,conv} = \varphi_0 S_l v_l C_s = -\frac{K_l(C_s)}{\rho_l(C_s)} C_s \nabla P_c \quad (11)$$

A cristalização do sal para este modelo é baseada no modelo de Coussy (2006). Segundo Derluyn, Monnen e Carmelliet (2014), as condições de cristalização são baseadas no equilíbrio entre a solução salina e o cristal do sal em um poro. Estas condições dependem da umidade relativa, da supersaturação e das características do próprio sal. As Equações (12) e (13) representam a cristalização do sal:

$$\left(\frac{\phi}{1-Nx^*}\right)^{\frac{v_{cr}}{v_w}(\frac{\gamma_{crl}}{\gamma_{gl}}+\varrho)} \left(\frac{x^*}{x_0^*}\right)^{N_s} \left(\frac{1-N_s x^*}{1-N_s x_0^*}\right)^{N_w} = 1 \quad (12)$$

$$\frac{1}{r_p} = \frac{RT}{2v_{cr}(\gamma_{crl}+\delta\gamma_{gl})} \ln \left[\left(\frac{x^*}{x_0^*}\right)^{N_s} \left(\frac{1-N_s x^*}{1-N_s x_0^*}\right)^{N_w} \right] \quad (13)$$

onde ϕ é a umidade relativa, x^* é a fração molar para a cristalização, e x_0^* é a solubilidade do sal, N_s é a soma dos coeficientes estequiométricos dos íons do sal e N_w é o coeficiente estequiométrico da água, enquanto que v_w é o volume molar da água e v_{cr} é o volume molar do cristal, γ_{crl} é a energia da interface entre o cristal de sal e a solução e, γ_{gl} é a energia da interface entre a solução de sal e a fase gasosa. ϱ é o coeficiente de dilatação, levando em conta a dilatação ocasionada pelo processo de cristalização, r_p representa o raio de acesso do poro relativo à cristalização do poro.

O transporte de calor é descrito pela Equação (14) a partir de um balanço de energia:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla q_h \pm \Omega = 0 \quad (14)$$

Onde h é a entalpia q_h é o seu fluxo e Ω as entradas e saídas do sistema. No modelo desenvolvido por Derluyn, Monnen e Carmelliet (2014), não são considerados nenhuma entrada e saída ($\Omega=0$), eles consideram também irrelevantes as mudanças de entalpia do vapor de água assim como a do ar seco. Obtém-se deste modo a Equação (15):

$$\frac{\partial [c_m p_m + c_l(C_s) \varphi_0 S_l \rho_l(C_s) + c_{cr} \varphi_0 S_{cr} \rho_{cr}] T + L_{cr} \varphi_0 S_{cr} \rho_{cr}}{\partial t} = \nabla \left\{ \begin{array}{l} \left[\lambda + (c_v T + L_v) \frac{\delta_v(C_s)}{T} \rho_l(C_s) L_v \right] \nabla T + \\ [c_l(C_s) K_l(C_s) T + (c_v T + L_v) \delta_v(C_s)] \nabla P_c \\ - (c_v T + L_v) \delta_v \frac{P_v}{(1 - N v_l C_s)} N_s \left[v_l(C_s) + C_s \frac{\partial v_l}{\partial C_s} \right] \nabla C_s \end{array} \right\} \quad (15)$$

sendo c_m a capacidade de calorífica da matriz sólida, c_{cr} a capacidade calorífica dos cristais, c_l e c_v as capacidades caloríficas do líquido e do vapor, respectivamente, λ o coeficiente de condução de calor da matriz sólida e L_{cr} o calor da cristalização. Neste modelo, as mudanças de entalpia devido a presença de íons de sais e cristais não são levadas em consideração.

3.4.2 Modelo de Poupeleer (2007)

Para Poupeleer (2007), o transporte de umidade pode ser dado pelas Equações de balanço de massa para água na forma líquida (l), de vapor (v), para o ar (a) e para cristalização do sal, respectivamente:

$$\frac{\partial(\varphi_0 S_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla^T(\varphi_0 S_l \rho_l v_l) - \dot{m}_{vl} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial[\varphi_0(1-S_l)\rho_v]}{\partial t} + \nabla^T[\varphi_0(1-S_l)\rho_v v_v] + \dot{m}_{vl} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial[\varphi_0(1-S_l)\rho_a]}{\partial t} + \nabla^T[\varphi_0(1-S_l)\rho_a v_a] = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial(\varphi_0 S_l C_s)}{\partial t} = \nabla q_s \quad (19)$$

onde ∇ indica o operador gradiente, T indica o símbolo de transposição, ρ indica a massa específica, v indica a velocidade, \dot{m}_{vl} representa a massa de líquido transformando-se em vapor, φ_0 é o volume total do poro, S_i é o grau de saturação do poro correspondente ao componente i , ρ_i massa específica do componente i , v_i velocidade do componente i .

Utilizando as Equações (16) e (17), o transporte de umidade pode ser dado pela Equação (20):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w_l}{\partial t} + \frac{\partial w_v}{\partial t} = -\nabla^T(+K_l \nabla P_c) - \nabla^T(-\delta_v \nabla P_v) \quad (20)$$

onde w_i é a umidade do componente i , K_l é o coeficiente de permeabilidade do líquido, δ_v é o coeficiente de permeabilidade do vapor, P_c a pressão por capilaridade e P_v a pressão de vapor.

O transporte de calor segundo Poupeleer (2007) é dado por:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla q_h + \Phi' = 0 \quad (21)$$

Derluyn, Monnen e Carmelliet (2014) descreveram a equação para o transporte de calor da mesma forma, onde $\Omega = \Phi'$ e representa as entradas e saídas do sistema. No modelo de Poupeleer (2007), a entalpia é descrita por diferentes equações, já que é encontrada nas diferentes fases presentes do sistema como na matriz do material, na água, no vapor de água e no ar seco, apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Equação de entalpia para diferentes fases

FASES	EQUAÇÃO DE ENTALPIA
MATRIZ DO MATERIAL	$c_0 \rho_0 (T' - T_0)$
ÁGUA	$c_l w_l (T' - T_0)$
VAPOR DE ÁGUA	$c_v w_v (T' - T_0) + L_v w_v$
AR SECO	$c_a w_a (T' - T_0)$

Fonte: Poupleer (2007)

Onde $c_0 \rho_0$ é a capacidade calorífica específica do material seco, os índices l , v e a são utilizados para representar o líquido, o vapor e o ar seco, respectivamente. A temperatura $T = T' - T_0$ é a representação da temperatura de referência (0 °C ou 273,15 K) e L_v faz referência ao calor latente da evaporação em J/kg.

Poupleer (2007) assume que as mudanças da quantidade de umidade são dominadas pela fase líquida, assim como a capacidade calorífica do ar e do vapor de água podem ser desconsiderados, obtendo o transporte de calor com a Equação (22):

$$(c_0 \rho_0 + c_l w) \frac{\partial T}{\partial t} + c_l T \frac{\partial w}{\partial t} = \nabla q_h \quad (22)$$

Para a consideração da cristalização em meio poroso Poupeleer (2007), assim como Derluyn, Monnen e Carmelliet (2008), desenvolve sua equação a partir

da abordagem termodinâmica de Coussy (2006), obtendo também as Equações (12) e (13).

4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho está dividida em três partes: modelagem matemática, discretização das equações governantes e implementação computacional do algoritmo para a resolução das equações governantes para o transporte de calor, umidade e sal em um meio poroso.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

O desenvolvimento do modelo matemático para a transferência de umidade e de calor está baseado no modelo de Santos (2009).

4.1.1 Transporte de Umidade

Segundo Santos (2009), 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 é descrito pela equação de Darcy, adaptada para meios insaturados:

$$j_l = K(\nabla P_{suc} - \rho_l g) \quad (23)$$

onde K é a condutividade hidráulica, g é a aceleração da gravidade e ρ_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 (∇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 por:

$$\nabla P_{suc} = \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \nabla T + \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} \nabla P_v \quad (24)$$

onde:

$$\frac{\partial P_{suc}}{\partial T} = R_v \rho_l \left[-\ln \phi - \frac{T}{\phi} \left(-\frac{P_v}{P_{sat}^2} \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \right] \quad (25)$$

e

$$\frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} = -\frac{R_v T \rho_l}{P_v} \quad (26)$$

As Equações (25) e (26) foram derivadas a partir da Lei de Kelvin.

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 pode ser calculado como:

$$j_v = - \underbrace{\frac{\delta_v \nabla P_v}{\text{difusão do vapor}}}_{\text{difusão do vapor}} - \underbrace{\frac{\rho_v k k_{rg}}{\mu_g} \nabla P_g}_{\text{vapor transportado por convecção}} \quad (27)$$

onde δ_v é a permeabilidade difusiva ao vapor [s], k é a permeabilidade intrínseca [m²], k_{rg} é a permeabilidade relativa do ar e μ_g é a viscosidade do ar úmido [Pa.s].

Deste modo, Santos (2009) descreve a conservação da umidade com o termo do conteúdo de umidade w [kg/m³], apresentado na Equação (28) em função da pressão parcial de vapor e da temperatura na Equação (29), isto com a finalidade de dar maior robustez para o método de solução Algoritmo da Matriz Tri-Diagonal (TDMA-TriDiagonal Matrix Algorithm):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot j \quad (28)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial P_v} \frac{\partial P_v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (29a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot \left[-K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \nabla T - \left(K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} - \delta_v \right) \nabla P_v + \rho_v \frac{kk_{rg}}{\mu_g} \nabla P_g + K \rho_l g \right] \quad (29b)$$

onde as derivadas

$$\frac{\partial \phi}{\partial P_v} = \frac{1}{P_{sat}} \quad (30)$$

e

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = -\frac{P_v}{P_{sat}^2} \left(\frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \quad (31)$$

são obtidas a partir da definição de umidade relativa:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \quad (32)$$

4.1.2 Transporte de Calor

Para a transferência de calor, Santos (2009) utiliza o divergente do fluxo de calor e um termo fonte, devido a transição de fase. Obtendo assim a Equação (33):

$$c_m \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q + S \quad (33)$$

onde:

$$c_m = c_o + \frac{c_l \theta}{\rho_o} \quad (34)$$

sendo c_o o calor específico do material seco [J/(kgK)], c_l , o calor específico da água líquida [J/(kg.K)] e ρ_o , a densidade do material seco [kg/m³]. 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 Equação (35), e pela convecção (q_{conv}), descrito pela Equação (36):

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (35)$$

$$q_{conv} = \underbrace{j_l c_{pl} T}_{\text{fluxo de líquido}} + \underbrace{j_a c_{pa} T}_{\text{fluxo de ar seco}} + \underbrace{j_v c_{pv} T}_{\text{fluxo de vapor}} \quad (36)$$

Onde λ 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:

$$S' = -L(T) \nabla \cdot j_v \quad (37)$$

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 torna-se:

$$c_m \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\left(\lambda - K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} c_{pl} T \right) \nabla T - \left(K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} c_{pl} T + \delta_v c_{pa} T - \delta_v c_{pv} T \right) \nabla P_v + \left(\rho_a \frac{k k_{rg}}{\mu_g} c_{pa} T + \rho_v \frac{k k_{rg}}{\mu_g} c_{pv} T \right) \nabla P_g + K \rho_l c_{pl} T g \right] - L(T) \nabla \cdot j_v \quad (38)$$

4.1.3 Transporte de sal

No trabalho de Santos (2009), 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, Monnen e Carmelliet (2014) e de Chen-Charpentier (2001) é representado pela Equação (39):

$$\frac{\partial \varphi C_s}{\partial t} + \nabla q_s + \dot{m}_{scr} = 0 \quad (39)$$

onde φ é a porosidade do meio, C_s é a concentração do sal, \dot{m}_{scr} 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 Equação (40):

$$q_s = q_{sdif} + q_{sadv} \quad (40)$$

$$q_{sdif} = \varphi D \nabla C_s \quad (41)$$

$$q_{sadv} = \varphi v C_s \quad (42)$$

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

De forma similar, Zanden, Taher e Arends (2015) 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 Equação (43).

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial w}{\partial x} \frac{C_s}{w} + D_s \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) \quad (43)$$

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 Equação (44):

$$D_s = \frac{D_m}{\tau} + \frac{1}{2} \left(\frac{D}{w} \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \frac{r^2}{D_m} \quad (44)$$

onde D_m é o coeficiente de difusão do sal na água, τ 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, Taher e Arends (2015), pois neste, a cristalização é

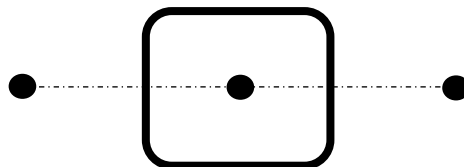
desconsiderada, propondo um foco maior apenas no transporte de sal através da estrutura porosa atingindo melhor o objetivo a que se propõe este trabalho.

4.2 DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

Para a discretização das equações governantes foi empregado o método dos volumes finitos, introduzido por Patankar (1980), 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 próxima seção 4.3.

A Figura 7 apresenta as letras W e L para representar os nós vizinhos, localizados no centro dos volumes de controle. Desta forma, como proposto em Santos (2009), os coeficientes de transporte são calculados a partir da média harmônica na interface dos volumes de controle.

Figura 7 - Volume de controle unidimensional



Fonte: Autoria própria.

A discretização das equações governantes foi feita utilizando coordenadas cartesianas e um sistema implícito para as derivadas temporais com um intervalo de tempo Δt ao longo de um elemento de volume (SANTOS, 2009).

O resultado da discretização para a conservação de umidade, sal, e calor para os nós intermediários é apresentado nas Equações (45), (46) e (47), respectivamente.

$$\left(\frac{C_{pv0}}{\Delta t} + \frac{D_{pve0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{pvw0}}{\Delta x^2}\right) P_{vp} + \left(\frac{C_{T0}}{\Delta t} + \frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2}\right) T_p + \left(\frac{D_{pge0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{pgw0}}{\Delta x^2}\right) P_{gp} =$$

$$\frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{pve0}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{pge0}}{\Delta x^2} P_{ge} + \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{pvw0}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{D_{pgw0}}{\Delta x^2} P_{gw} + \frac{C_{pv0}}{\Delta t} P_{vp}^0 + \frac{C_{T0}}{\Delta t} T_p^0$$

(45)

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D_{Pve1}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pvw1}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left(\frac{D_{Te1}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw1}}{\Delta x^2} \right) T_p + \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{D_{Pge1}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pgw1}}{\Delta x^2} \right) C_{sp} = \frac{D_{Te1}}{\Delta x^2} T_e + \\ & \frac{D_{Pve1}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{Pge1}}{\Delta x^2} C_{se} + \frac{D_{Tw1}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{Pvw1}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{D_{Pgw1}}{\Delta x^2} C_{sw} + \frac{C_s}{\Delta t} \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D_{Pve2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pvw2}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left(\frac{C_{T2}}{\Delta t} + \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} \right) T_p + \left(\frac{D_{Pge2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pgw2}}{\Delta x^2} \right) P_{gp} = \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} T_e + \\ & \frac{D_{Pve2}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{Pge2}}{\Delta x^2} P_{ge} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{Pvw2}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{D_{Pgw2}}{\Delta x^2} P_{gw} + \frac{C_{T2}}{\Delta t} T_p \end{aligned} \quad (47)$$

onde:

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

Os resultados obtidos para as equações de conservação de umidade e calor são baseadas na discretização de Santos (2009), onde se leva em consideração o transporte de ar, portanto, os termos que estão relacionados a pressão de gás são desconsiderados das Equações (45) e (47), obtendo-se as Equações (48) e (49):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{C_{Pv0}}{\Delta t} + \frac{D_{Pve0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pvw0}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left(\frac{C_{T0}}{\Delta t} + \frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2} \right) T_p = \frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{Pve0}}{\Delta x^2} P_{ve} + \\ & \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{Pvw0}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{C_{pvo}}{\Delta t} P_{vp}^0 + \frac{C_{T0}}{\Delta t} T_p^0 \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D_{Pve2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pvw2}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left(\frac{C_{T2}}{\Delta t} + \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} \right) T_p = \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{Pve2}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} T_w + \\ & \frac{D_{Pvw2}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{C_{T2}}{\Delta t} T_p^0 \end{aligned} \quad (49)$$

4.3 ALGORITMO GENÉRICO PARA RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

Uma vez com o sistema de equações algébricas obtido pela discretização em volumes finitos (PATANKAR,1980), 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*, conforme utilizado por Mendes et al. (2002).

A discretização das equações governantes no domínio fornece equações algébricas na seguinte forma:

$$A_i \cdot x_i = B_i \cdot x_{i+1} + C_i \cdot x_{i-1} + D_i \quad (50)$$

onde x_i é um vetor que contém as variáveis dependentes. No caso do modelo de Santos (2009), o vetor é definido por:

$$x_i = \begin{bmatrix} P v_i \\ P g_i \\ T_i \end{bmatrix} \quad (51)$$

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 pe representada pelo conteúdo de umidade(w):

$$x_i = \begin{bmatrix} w_i \\ C_s \\ T_i \end{bmatrix} \quad (52)$$

No método tradicional, o TDMA, 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} :

$$x_i = P_i \cdot x_{i+1} + q_i \quad (53)$$

onde P_i é um tensor de segunda ordem também.

Substituindo a Equação (53) com $i=i-1$ e substituindo na Equação (50), tem-se:

$$(A_i - C_i \cdot P_{i-1})x_i = B_i \cdot x_{i+1} + C_i \cdot q_{i-1} + D_i \quad (54)$$

Isolando x_i na Equação (54):

$$x_i = [(A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} \cdot B_i] \cdot x_{i+1} + (A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} (C_i \cdot q_{i-1} + D_i) \quad (55)$$

Comparando agora a Equação (53) com a Equação (55), obtém-se os parâmetros P_i e q_i mostrados nas Equações (56) e (57):

$$P_i = [(A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} \cdot B_i] \quad (56)$$

$$q_i = (A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} (C_i \cdot q_{i-1} + D_i) \quad (57)$$

O algoritmo desenvolvido para a resolução das equações governantes foi implementado num código computacional, escrito em linguagem C++, utilizando o programa C++ Builder 6.0. O computador utilizado nas simulações possui um processador Intel Core i7 de 2,40 GHz, com 8 GB de RAM, 1 TB de disco rígido e sistema operacional Windows 10.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

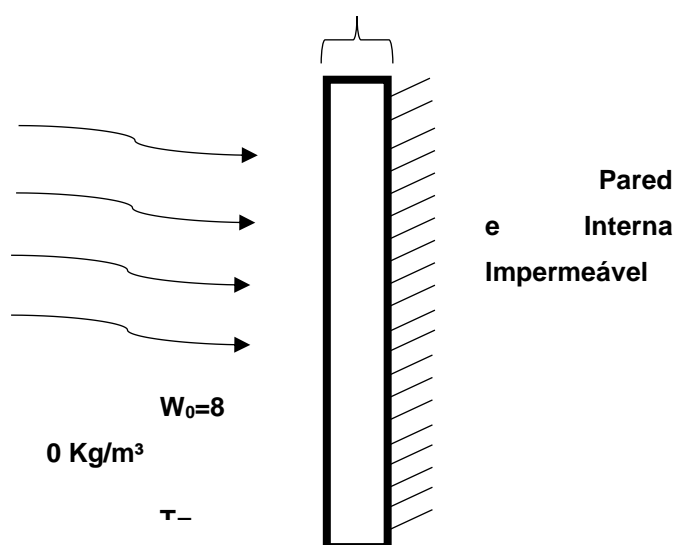
Para verificar o código computacional desenvolvido, foram realizados testes em comparação aos resultados do modelo proposto por Zanden, Taher e Arends (2015). Todas as avaliações foram realizadas em uma parede de concreto com espessura de 10 cm e considerando 20 nós na malha computacional. O lado interno 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/m³, variando de acordo com as estações do ano, seguindo a Equação (58), assim como no modelo de Zanden, Taher e Arends (2015):

$$w = 70 \text{ sen}(1,9924 \times 10^{-7} \cdot t) + 80 \quad (58)$$

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⁻), que apresenta um coeficiente de difusão na água de $1,26 \times 10^{-9}$ m²/s a 20 C°. A Figura 8 representa o sistema em que foram feitos os testes em condições iniciais.

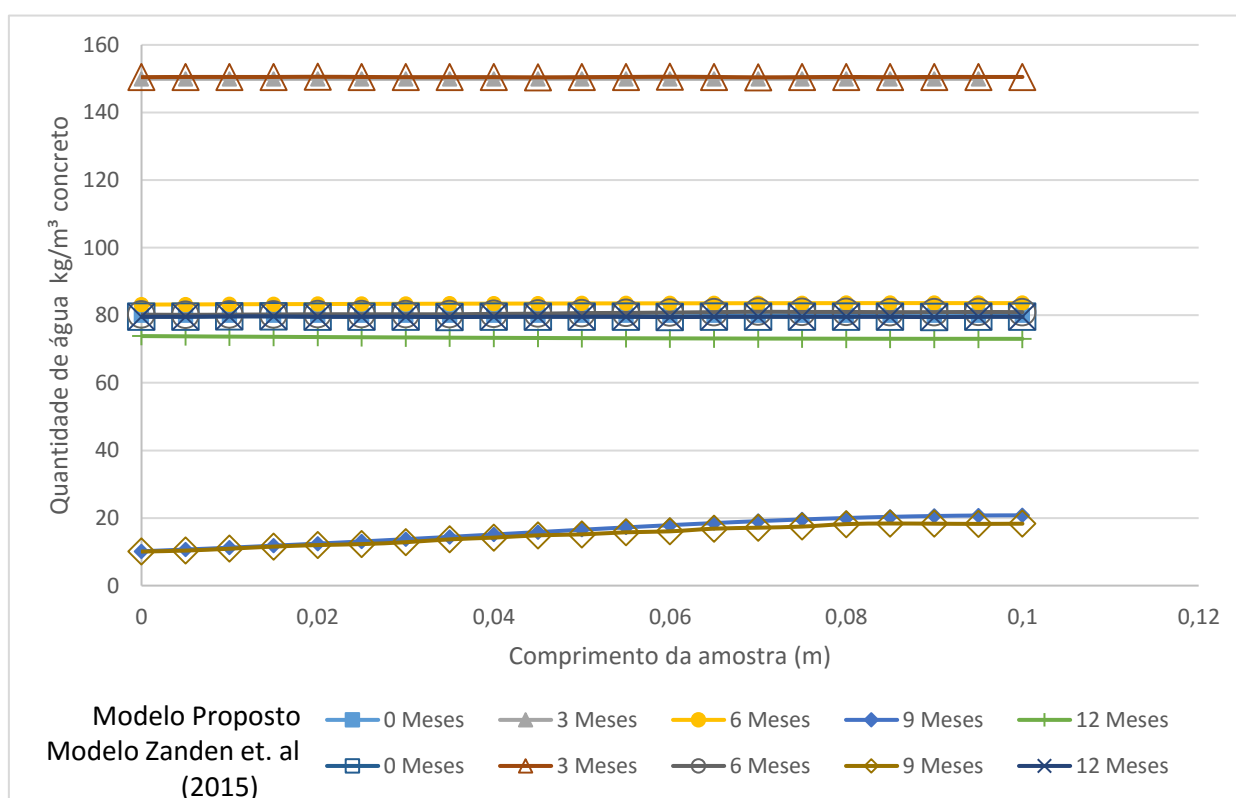
Figura 8- Condições iniciais dos testes de 1 a 4



Fonte: Autoria própria

Para os casos apresentados aqui, a quantidade de 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 9 representa os perfis da quantidade de água na amostra para o modelo proposto e para o modelo de Zanden, Taher e Arends (2015).

Figura 9 - 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/m³ 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 9 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, Taher e Arends (2015).

Os testes da Tabela 4 referem-se as situações aplicadas em cada uma das simulações realizadas para verificação do modelo proposto.

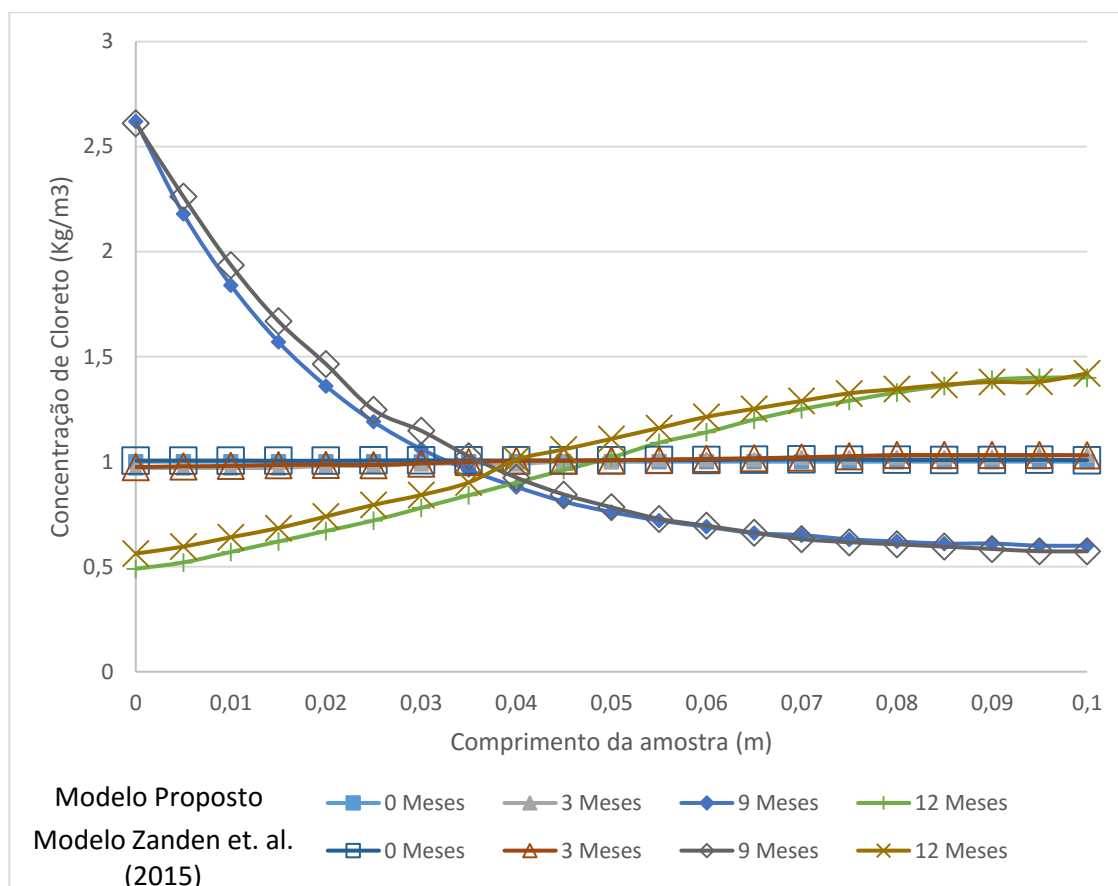
Tabela 4 - Testes realizados para a verificação do modelo proposto

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

Fonte: Zanden, Taher e Arends (2015)

No primeiro teste, considera-se que já existe uma certa quantidade de cloreto na amostra de concreto, cerca de 1kg de sal por m³ de concreto, isto implica em 12,5 kg de sal por m³ 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 10 mostra os resultados obtidos da simulação para o modelo proposto e para o de Zanden, Taher e Arends (2015) em seu estudo.

Figura 10 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 1



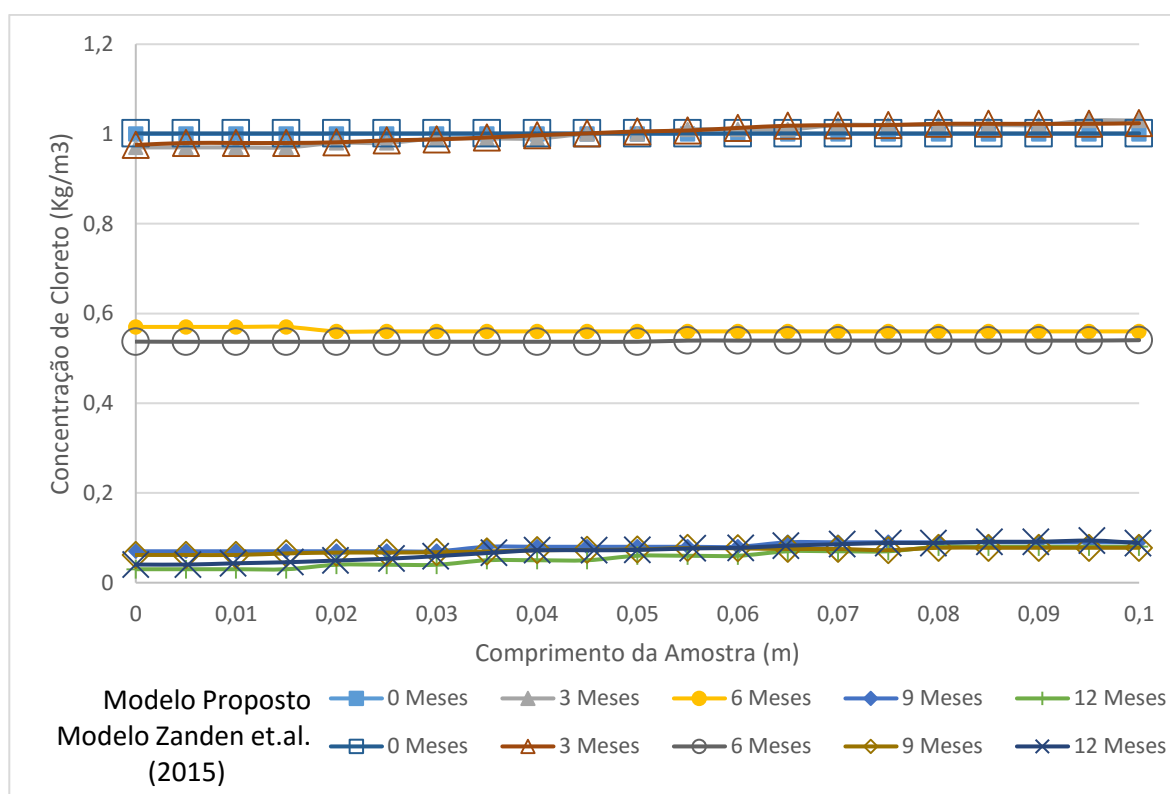
Analisando o Teste 1, e fazendo uma correlação com a umidade de acordo com a época do ano, pode-se observar que não há grande variação da concentração de cloreto no terceiro mês. Isto ocorre devido a quantidade de sal na amostra estar em equilíbrio, ou seja, cada nó apresenta a mesma quantidade de sal. 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. (2015) 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 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 Figura 11 em um período de 0 a 12 meses.

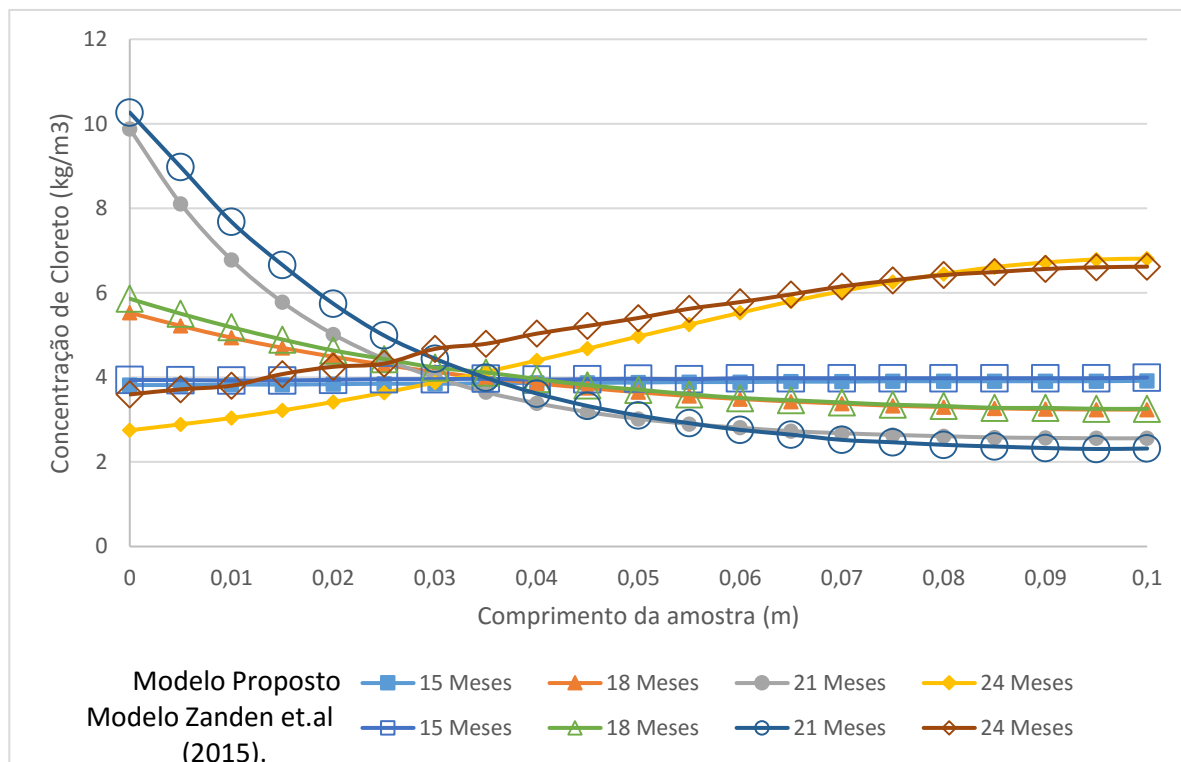
Figura 11 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 2



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.

24

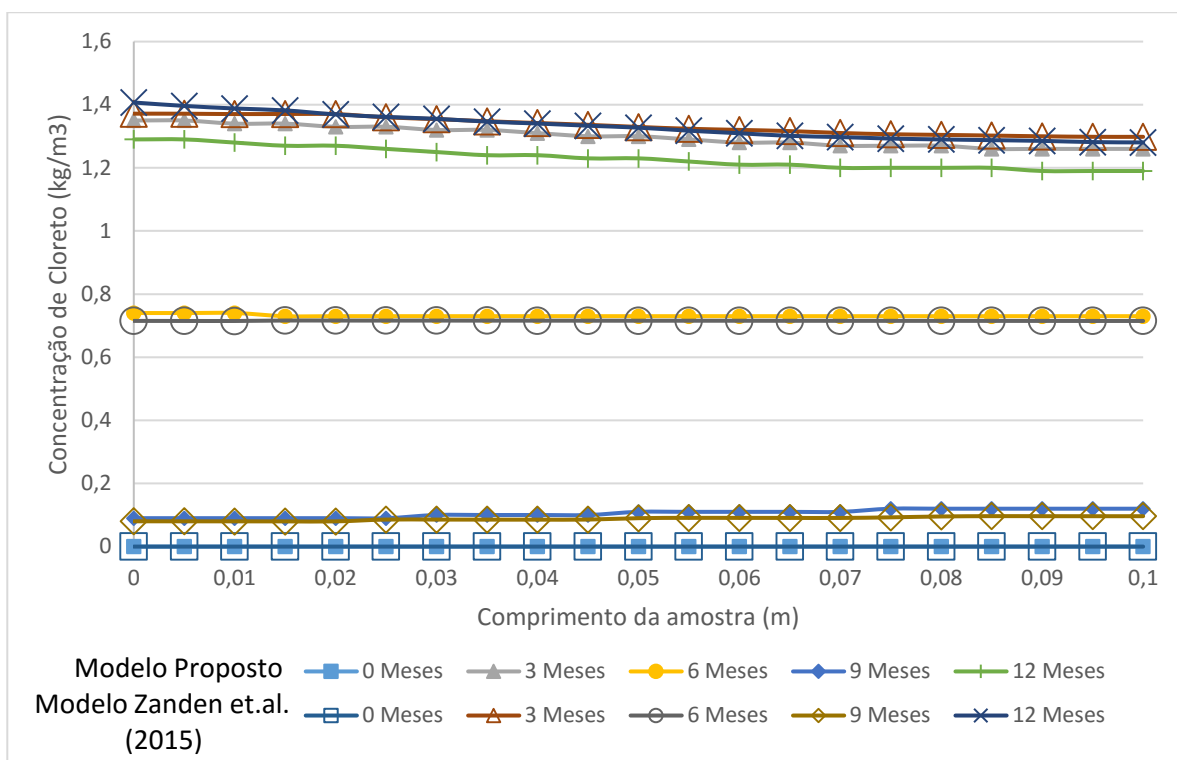
Figura 13 - Avanço do Cloreto ao longo da amostra para a Teste 3 (de 15 a meses)



Pode-se observar nas Figuras 12 e 13, 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 Figura 14 para um período de 0 a 12 meses.

Figura 14 - 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 constantes e mais compatíveis com o a Figura 9, 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 Figura 14 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, Taher e Arends (2015), 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 CONCLUSÕES

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 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, Taher e Arends (2015). 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.

Embora não abordado neste trabalho, é importante ressaltar que o transporte de sal para dentro de estruturas porosas é o princípio de diversos processos de deterioração, como a cristalização. O depósito de sal nos poros do concreto causa acúmulo de pressão e conseqüente formação de trincas. Portanto, para trabalhos futuros, propõe-se a utilização ou desenvolvimento de um modelo para análise da nucleação do sal. Sugere-se também o refinamento do modelo desenvolvido, utilizando-se de coeficientes de transportes como uma função dos potenciais considerados nas três equações governantes.

7 REFERÊNCIAS

ARENDS, T ;ZANDEN, A.J.J van der; TAHER, A.;BROUWERS,H.J.H. . **A model describing water and salt migration in concrete during wetting/drying cycles**. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON- TRADITIONAL CEMENT AND CONCRET, NTCC2014, Brno, 2014. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, NOV PRESS, 2014, p.5-8.

BENITE, A. **Emissões de carbono e a construção civil. CTE (Centro de Tecnologia de Edificações)**. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.cte.com.br/imprensa/2011-02-27-emissoes-de-carbono-e-a-construcao-civ/>. Acesso em: 29/03/2017.

BOTELHO, M. H. C. **Concreto Armado Eu te Amo para Arquitetos**. 2. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2005.171 p. *Ebook*

CAVA, F. Concreto Armado- “Mecanismos de Deterioração do Concreto”. **Além da Inércia**, [s.l.], 2016. Disponível em: <https://alemdainercia.wordpress.com/2016/08/11/concreto-armado-mecanismos-de-deterioracao-do-concreto/> Acesso em: 28/03/2017. 2 Figuras

CHEN-CHARPENTIER, B.M. **Numerical Methods for Flow and Transport in Porous Media, Retrieved from University of Wyoming Laramie, Department of Mathematics**. 2001. Disponível em: <http://www.sci.sdsu.edu/compsciwork/IIIPASI/DOCUMENTS/COURSE%20NOTES/classnotesChen.pdf>. Acesso em: 30/05/2017.

COUSSY, O. Deformation and stress from in-pore drying-induced crystallization of salt. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**. [s l]. v.54, p.1517–1547, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.03.002>. Acesso em: 29/03/2017.

Conference on construction heritage in coastal and marine environments,1. Lisboa. **Salt Transport and Crystallization Modelling in Porous Materials**. Lisboa: Medachs, 2008.

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.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345 p.

MARTINS, A. A. A. **Fenômenos de Transporte em Meios Porosos**: Escoamento Monofásico e Transporte de Massa. 2006. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2006. *E-book*

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J.O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. *In*: ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v I, p. 773-808. *E-book*

MENDES, N. **Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1997. *E-book*

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 de abril de 2017.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press,1980.

CONCRETO & CONSTRUÇÕES. São Paulo: IBRACON, 2009-. ISSN 1809-7197. Trimestral. Ano XXXVII, Nº53, p.14, 2009.

Concreto Armado. **Portal do Concreto**, [s.l.], c2006. Disponível em: <http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/armados.html> Acesso em: 01/05/2017

Concreto. **Portal do Concreto**, [s.l.], c2006. Disponível em: <http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/concretos.html> Acesso em: 28/03/2017

POUPELEER, A. S. **Transport and Crystallization of Dissolved Salts in Cracked Porous Building Materials**, 2007. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas)- Katholieke Universiteit Leuven, 2007.

POUPELEER, A.S., CARMELIET, J., ROELS, S., VAN GEMERT, D., Validation of the salt diffusion coefficient in porous materials. **International Journal for Restauration of Buildings and Monuments**. [s.l.] v.9, N°6, 663-682, 2003.

Disponível em:

https://www.academia.edu/19556110/Validation_of_the_Salt_Diffusion_Coefficient_in_Porous_Materials. Acesso em: 30 de abril de 2017.

REDELUCCI, F. Capilaridade: A passagem natural de um líquido por um tubo muito fino. **Química**, São Paulo, 2005. Disponível em:

<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/quimica/capilaridade-a-passagem-natural-do-liquido-por-um-tubo-muito-fino.htm>. Acesso em: 01 de maio de 2017.

SANTOS, A. V.; VIANA, M. M.; MEDEIROS, F. H. A.; MOHALLEM, N, D. S. O Incrível Mundo dos Materiais Porosos- Características, Propriedades e Aplicações.

Química nova na escola. São Paulo. Vol.38. nº1, 2016. Disponível em:

http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc38_1/03-QS-75-14.pdf. Acesso em: 01 de maio de 2017.

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.

SANTOS, J. C. G. Cálculo Estrutural. **Habitissimo**, [s.l.], 2016. Disponível em:

<https://projetos.habitissimo.com.br/projeto/calculo-estrutural-1>. Acesso em: 04/05/2017.

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*