

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**RHAYSSA MARYELL MARRA RIBAS**

**TRANSPORTE ACOPLADO DE CALOR, UMIDADE E SAL EM  
ESTRUTURAS DE CONCRETO**

**DISSERTAÇÃO**

**PONTA GROSSA**

**2021**

**RHAYSSA MARYELL MARRA RIBAS**

**TRANSPORTE ACOPLADO DE CALOR, UMIDADE E SAL EM  
ESTRUTURAS DE CONCRETO**

**COUPLED TRANSPORT OF HEAT, MOISTURE, AND SALT IN  
CONCRETE STRUCTURES**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos

**PONTA GROSSA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Ponta Grossa**



RHAYSSA MARYELL MARRA RIBAS

**TRANSPORTE ACOPLADO DE CALOR, UMIDADE E SAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Térmica E Fluidos.

Data de aprovação: 16 de Julho de 2021

Prof Gerson Henrique Dos Santos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Luiz Eduardo Melo Lima, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Maria Jose Jeronimo De Santana Ponte, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Thiago Antonini Alves, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 16/07/2021.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a todos os meus professores do ensino fundamental, médio, graduação e por fim da Pós -Graduação do curso de Engenharia Mecânica da UTFPR- Ponta Grossa. Durante toda a minha vida tive o apoio e a dedicação destes professores que não estimaram esforços em sua profissão para ensinar e assim me ajudaram a obter a base para escrever este trabalho.

Agradeço especialmente ao meu orientador Gerson Henrique dos Santos que propôs o desenvolvimento deste trabalho, me proporcionou inúmeras oportunidades de desenvolvimento pessoal e profissional e me forneceu todo o suporte para que mesmo em momentos difíceis eu pudesse concluir nossos objetivos. 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. Mãe, sem você eu não seria quem sou, não estaria onde estou, dedico este trabalho especialmente a você!

À minha família e amigos que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho e testemunharam o meu desenvolvimento diante dele agradeço imensamente por seu incentivo e compreensão.

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

Finalmente agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo fomento (nº 40006018) para o desenvolvimento deste trabalho.

Eu jamais teria conseguido sem vocês.

Obrigada!

## RESUMO

O concreto é um material amplamente empregado nas construções civis e, por esse motivo, sua deterioração pode causar danos econômicos e ambientais. A corrosão do concreto pode ocorrer de diversas formas: por estresses mecânicos, mudanças climáticas, variações de temperatura e ataques químicos, como a transposição de sais para dentro dos poros do concreto. Além de acelerar a degradação da armação de aço, esse último processo pode concentrar os sais em alguns pontos, os quais se cristalizam, aumentando a pressão interna nos poros e causando trincas e fissuras, tornando toda a estrutura mais suscetível a outros agentes de deterioração. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar numericamente o transporte acoplado de calor, umidade e sal no meio poroso do concreto. Inicialmente, as equações governantes de transporte foram modeladas e então discretizadas utilizando o Método dos Volumes Finitos. Para a solução do sistema de equações algébricas foi utilizado o Algoritmo MTDMA, do inglês, *Multi-TriDiagonal Matrix Algorithm*, que permite a resolução simultânea das 3 equações governantes. O modelo proposto foi verificado por meio de comparações feitas a partir de outro estudo disponível na literatura. Outras simulações foram executadas para analisar a influência da umidade e da temperatura no transporte de sal. A partir dos resultados obtidos pode-se observar a importância do processo de imbibição e secagem para o transporte de sal, bem como a influência do gradiente de temperatura nessa análise.

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

## ABSTRACT

Concrete is a material widely applied in civil construction and for this reason its deterioration can cause economic and environmental damage. The corrosion of concrete can occur in several ways: due to mechanical stresses, climatic changes, temperature changes and chemical attacks such as the transposition of salts into concrete pores. In addition to accelerating the degradation of the steel frame, this last process can concentrate the salts in some points, which crystallize, increasing the internal pressure in the pores and causing fissures and cracks, making the whole structure more susceptible to other agents of deterioration. Thus, the objective of this work is to analyze numerically the coupled transport of moisture, heat and salt in the porous medium of concrete. Initially, the governing equations were modeled and then discretized using the finite volume method. For the solution of the system of algebraic equations was used the Multi Tri-Diagonal Matrix Algorithm (MTDMA), which allows the simultaneous resolution of the 3 governing equations. The proposed model was verified through comparisons with a model available in literature. Other simulations were performed to analyze the influence of humidity and temperature on the transport of salt. From the results obtained, it is possible to observe the importance of the imbibition and drying process for the transport of salt, as well as the influence of temperature in this analysis.

**Keywords:** Transport of salt. Porous medium. Concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos poros em um meio poroso.....	17
Figura 2 – Processo de transporte de massa por difusão.....	20
Figura 3 – Transporte em série vapor-líquido-vapor em um poro preenchido de água.....	21
Figura 4 – Isoterma de equilíbrio.....	23
Figura 5 – Composição do concreto armado.....	25
Figura 6 – Estrutura de concreto armado.....	26
Figura 7 – Deterioração do concreto.....	31
Figura 8 – Volume de controle unidimensional.....	41
Figura 9 – Condições iniciais dos testes comparativos.....	45

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantidade de água no decorrer do tempo ao longo da amostra.....	46
Gráfico 2 – Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 1.....	47
Gráfico 3 – Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 2.....	49
Gráfico 4 – Convergência da concentração de sal a partir do número de nós.....	50
Gráfico 5 – Convergência da temperatura a partir do número de nós.....	51
Gráfico 6 – Convergência da umidade relativa a partir do número de nós.....	51
Gráfico 7 – Convergência da concentração de sal a partir do passo de tempo.....	53
Gráfico 8 – Convergência da temperatura a partir do número do passo de tempo...53	
Gráfico 9 – Convergência da umidade relativa a partir do passo de tempo.....	54
Gráfico 10 – Resultados dos teste para diferentes sais no mês 3.....	56
Gráfico 11 – Resultados dos teste para diferentes sais no mês 6.....	56
Gráfico 12 – Resultados do teste para diferentes sais no mês 9.....	57
Gráfico 13 – Resultados do teste para diferentes sais em 1 ano.....	57
Gráfico 14 – Concentração dos sais em água para 9 meses de simulação.....	59
Gráfico 15 – Resultados obtidos para a concentração de sal ao longo da amostra para os Testes 1, 2 e 3.....	60
Gráfico 16 – Resultados dos testes 4, 5 e 6 para a Concentração de Cloreto ao longo da amostra.....	61
Gráfico 17 – Resultados dos testes 4, 5 e 6 para a umidade ao longo da amostra.....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos meios porosos .....	18
Quadro 2 – Classes de concreto de acordo com a resistência.....	24
Quadro 3 – Classes de consistência.....	24
Quadro 4 – Corrosão de metais, polímeros e cerâmicas.....	27
Quadro 5 – Agressividade de sais de sulfato.....	29
Quadro 6 – Corrosão por diferentes tipos de sais.....	32
Quadro 7 – Classificação da agressividade do Meio Ambiente.....	33
Quadro 8 – Qualidade do concreto de acordo com a agressividade do Meio Ambiente.....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Volume de sais de sulfato.....	30
Tabela 2 – Propriedades do concreto.....	44
Tabela 3 – Testes realizados para a verificação do modelo proposto.....	47
Tabela 4 – Plano de análise para definição do número de nós da malha.....	50
Tabela 5 – Plano de análise para definição do passo de tempo utilizado.....	52
Tabela 6 – Coeficiente de difusão dos sais a 25°C.....	55
Tabela 7 – Composição da água do mar.....	55
Tabela 8 – Condições dos testes isotérmicos executados.....	60
Tabela 9 – Condição dos testes não isotérmicos executados.....	61

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

$A$	Área	$m^2$
$C$	Concentração	$kg/m^3$
$D$	Coefficiente de difusão	$m^2/s$
$g$	Aceleração da gravidade	$m/s^2$
$h$	Entalpia	J
$J$	Fluxo de espécies	$m/s$
$K$	Condutividade hidráulica	$m/s$
$L$	Calor latente	$J/(kg.K)$
$P$	Pressão	Pa
$Q$	Vazão volumétrica do fluido	$m^3/s$
$q''$	Fluxo de calor	W
$R$	Constante universal dos gases	$J/(kmol.K)$
$r$	Raio do poro	m
$T$	Temperatura	K
$t$	Tempo	s
$v$	Velocidade	$m/s$
$w$	Teor de umidade	$kg/m^3$
$X$	Comprimento ou coordenada	m

### Letras Gregas

$V_p$	Volume dos poros	$m^3$
$V_t$	Volume total	$m^3$
$\delta_v$	Coefficiente de permeabilidade difusiva ao vapor	s
$\varphi$	Porosidade	
$\emptyset$	Umidade relativa	
$k$	Coefficiente de permeabilidade	$m/s$
$\lambda$	Condutividade térmica	$W/(m.K)$
$\theta$	Conteúdo volumétrico de umidade	$m^3/m^3$
$\rho$	Massa específica	$kg/m^3$
$\mu$	Viscosidade	Pa.s
$\tau$	Tortuosidade	

## Letras Latinas com Subíndices

$C_s$	Concentração de sal	kg/m <sup>3</sup>
$c_{pa}$	Calor específico a pressão constante do ar	J/(kg.K)
$c_{pl}$	Calor específico a pressão constante do líquido	J/(kg.K)
$c_{pv}$	Calor específico a pressão constante do vapor	J/(kg.K)
$c_v$	Capacidade calorífica do vapor	J/K
$c_m$	Capacidade calorífica do material	J/K
$c_l$	Capacidade calorífica do líquido	J/K
$D_s$	Coefficiente de dispersão	m <sup>2</sup> /s
$D_m$	Coefficiente de difusão	m <sup>2</sup> /s
$J_v$	Fluxo de vapor	kg/(s.m <sup>2</sup> )
$J_l$	Fluxo de líquido	kg/(s.m <sup>2</sup> )
$K_l$	Coefficiente de permeabilidade do líquido	m/s
$n_s$	Coefficiente de saturação do vapor	
$P_{suc}$	Pressão de sucção	Pa
$P_{sat}$	Pressão de saturação	Pa
$P_v$	Pressão de vapor	Pa
$P_c$	Pressão devido a capilaridade	Pa
$S'$	Termo fonte	W/m <sup>3</sup>

## Subíndices

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

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1 OBJETIVOS .....	13
1.1.1 Objetivo Geral .....	13
1.1.2 Objetivos Específicos .....	13
1.2 JUSTIFICATIVA .....	13
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
2.1 MEIO POROSO .....	16
2.1.1 Classificação dos Poros .....	17
2.1.2 Capilaridade .....	19
2.1.3 Lei de Fick .....	19
2.1.4 Lei de Darcy .....	20
2.1.5 Permeabilidade Difusiva ao Vapor ( $\delta_v$ ).....	21
2.1.6 Condutividade Térmica ( $\lambda$ ).....	22
2.1.7 Isotermas de Equilíbrio.....	22
2.2 CONCRETO .....	23
2.2.1 Concreto Armado .....	24
2.3 CORROSÃO .....	26
2.3.1 Corrosão do Concreto Armado.....	27
2.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA TRANSPORTE DE CALOR, UMIDADE E SAL .....	34
2.4.1 Modelo de Chunqiu, Kefei e Zhaoyuan (2008).....	34
2.4.2 Modelo de Zanden, Taher e Arends (2015).....	35
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	37
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	37
3.1.1 Transporte de Umidade.....	37
3.1.2 Transporte de Calor .....	39

3.1.3 Transporte de sal .....	40
3.2 DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES .....	40
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
4.1 VERIFICAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL .....	44
4.2 ANÁLISE DE MALHA .....	50
4.3 COMPORTAMENTO DA DIFUSÃO DE DIFERENTES SAIS EM CONCRETO ..	54
4.4 EFEITOS DOS GRADIENTES DE TEMPERATURA NO TRANSPORTE DE UMIDADE E SAL.....	59
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente aplicado no setor da construção civil. Não se sabe ao certo quando ele foi criado ou desde quando ele é utilizado, no entanto, escavações arqueológicas apontaram vestígios de uma construção executada parcialmente em concreto em 4000 a.C. (KAEFER, 1998). O fato é que os antigos reconheceram o potencial desse material para ser utilizado em construções, devido às características de resistência e durabilidade, podendo ser moldável com formas e tamanhos diferentes. Assim, o concreto que é formado pela mistura de água, cimento, pedras e areia, tornou-se o material preferido de engenheiros e arquitetos para seus projetos de construção (PEDROSO, 2009).

Por ser um material largamente empregado na construção civil, os primeiros avanços tecnológicos voltados para o concreto buscavam melhorar a sua resistência e economia (SOUZA JUNIOR, 2004). Nesse caso, acreditava-se que a sua impermeabilidade e durabilidade, bem como outras características, seriam atendidas também. No entanto, com o passar do tempo, percebeu-se que o aprimoramento da resistência das estruturas de concreto não era o suficiente para torná-las duráveis.

A durabilidade das estruturas está diretamente relacionada com seu tempo de vida útil e tem grande relação com o ambiente no qual está inserida. Durante esse período, elas são submetidas a diversos tipos de esforços e cargas, estresses mecânicos, mudanças climáticas, mudanças de temperatura e ataques químicos que deterioram tanto o concreto quanto a sua armadura. Graças ao avanço tecnológico dos últimos anos, houve um aumento do conhecimento a respeito do transporte de gases e líquidos em meios porosos, permitindo associar o tempo de vida útil de construções civis por meio de modelos matemáticos (MEDEIROS et al., 2011; GENTIL, 1996).

Helene (1997) destacou a importância de separar os agentes que são corrosivos à armadura e ao concreto, pois nem sempre o que é corrosivo a um é ao outro. Por outro lado, alguns agentes são corrosivos para ambas as partes, como a ação de ácidos, sulfatos e cloretos, os quais são agressivos ao concreto, reduzem o pH da estrutura e ainda despassivam a armadura.

O ataque de íons cloreto ao concreto normalmente ocorre em regiões marítimas, próximas à costa. A névoa salina originada pela quebra das ondas do mar causa nesses ambientes uma nuvem de umidade repleta de íons de diferentes tipos. Entre eles encontra-se o íon cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), que ao entrar em contato com os poros do concreto, são levados pela umidade para o interior poroso, podendo chegar até a armadura, iniciando um processo de corrosão. Com o passar do tempo e o aumento da concentração desses íons em alguns pontos, devido a redução da umidade, esse íon pode formar um sal e cristalizar-se criando uma pressão interna que pode causar trincas e fissuras, tornando a estrutura mais suscetível a outros agentes até o seu colapso (HELENE, 1997; DERLUYN, 2014).

Alguns estudos podem ser encontrados na literatura abordando o transporte de sal e umidade para o interior dos poros do concreto. Souza (2005) estudou experimentalmente a vida útil das estruturas de concreto armado em ambientes marítimos, com foco principal na influência do grau de saturação na difusividade dos cloretos. Derluyn et al. (2014) e Poupeleer (2007), apresentaram em seus modelos equações para o transporte de calor, umidade e sal, incluindo também uma equação para descrever a cristalização do sal no interior poroso. Espinosa et al. (2007) desenvolveram um estudo numérico e experimental para analisar o estresse mecânico causado pela cristalização em materiais porosos. Castellazzi (2013) de forma similar também apresentou um modelo para o transporte de umidade, calor e sal para meios porosos, incluindo também a cristalização. Já no estudo de Zanden, Taher e Arends (2015), analisaram-se várias situações de condição de contorno e o impacto no transporte de sal em cada uma delas.

Deste modo, neste trabalho é apresentado e analisado numericamente o transporte acoplado de calor, umidade e sal em estruturas de concreto. Apesar de não incluir o processo de cristalização, o modelo permite prever as condições necessárias para que este fenômeno ocorra. Além disso, as três equações governantes, são discretizadas utilizando o Método dos Volumes Finitos usando um esquema implícito (PATANKAR, 1980) e implementada na linguagem computacional C++, sendo resolvidas de forma acoplada meio do Algoritmo MTDMA- *Multi-TriDiagonal Matrix Algorithm* (MENDES et al., 2002).

## 1.1 OBJETIVOS

Nesta seção, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos para a realização desse trabalho.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar numericamente o transporte acoplado de calor, umidade e sal em estruturas de concreto.

### 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.
- Verificar código computacional comparando resultados com os de outro modelo da literatura.
- Realizar o estudo de alguns casos a partir da realização de simulações numéricas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os impactos ambientais causados por diversos setores da sociedade e suas consequências é um tema bastante debatido nos meios de comunicação. Esse assunto ganha força e cada vez mais pessoas e companhias de grande porte querem fazer sua parte quando se trata de sustentabilidade.

O Relatório da Aliança Global para Edifícios e Construção (em inglês, *Global Alliance for Buildings and Construction – GlobalABC*) de 2019, mostra que 36% da energia gasta no mundo e 39% das emissões de CO<sub>2</sub> são de responsabilidade do setor da construção civil. Esse relatório mostra a necessidade do setor em realizar investimentos para melhorar a eficiência do uso da energia e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>.

A maresia é o nome popular para o aerossol carregado de água salgada gerado pela quebra das ondas do mar e transportado pelos ventos até o litoral. Essa brisa vinda do mar e muito apreciada pelos brasileiros é também uma grande vilã quando se trata de corrosão. Ao entrar em contato com estruturas metálicas o aerossol causa a oxidação do metal, deteriorando-os em pouco tempo. A maresia também afeta estruturas de concreto, na Praia do Futuro em Fortaleza a Companhia de Energia Elétrica teve que substituir postes de concreto por postes de fibra de vidro para prolongar seu tempo de vida útil (SCODELER et al., 2018). \*

Sendo assim, corrosão de estruturas de concreto armado pela entrada umidade e de íons de sal em seus poros causa tanto impactos ambientais quanto econômicos. Estudos específicos nessa área podem otimizar o tempo de vida do material e modelos de previsão podem ser criados a fim de evitar ou diminuir os danos causados. Sendo assim, visto a necessidade de alternativas para tornar o setor mais sustentável, apresenta-se um modelo acoplado para o transporte de calor, umidade e sal em concreto e analisa-se estudos de caso para esse fenômeno.

### 1.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1 foram apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho além da justificativa para o seu desenvolvimento. O Capítulo 2 descreve inicialmente os conceitos fundamentais e então apresenta alguns modelos já publicados na literatura que fornecem informações importantes e facilitam o entendimento deste trabalho. No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento e resolução do modelo proposto por este estudo. O Capítulo 4 é composto por diferentes estudos de casos os quais promovem a compreensão do transporte de sal e umidade

no interior poroso do concreto. Finalmente no Capítulo 5 é feita uma breve conclusão a respeito de todo o estudo desenvolvido.

\* Para mais informações sobre a maresia e o efeito na Praia do Futuro acesse o QR Code.



## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são descritos os conceitos fundamentais e os modelos matemáticos disponíveis na literatura que visam descrever o transporte de massa e calor em meios porosos.

### 2.1 MEIO POROSO

O meio poroso consiste em materiais que apresentam espaços vazios (poros) distribuídos em sua estrutura. Segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC, do inglês *International Union of Pure and Applied Chemistry*), a maioria dos materiais são de certa forma considerados porosos, assim como é muito difícil encontrar ou preparar um sólido realmente sem porosidade (IUPAC, 1994).

A porosidade é uma característica de grande importância em um material, pois ela influencia diretamente o comportamento das suas propriedades como: densidade, condutividade térmica, resistência, entre outras. Da mesma forma, o entendimento do seu comportamento influencia diretamente no desenvolvimento de diversos setores industriais como: projeto da catálise, adsorventes industriais, desenvolvimento de membranas e cerâmicas, e na área de transporte de fluidos (IUPAC, 1994).

O meio poroso raramente é visto a olho nu, mas está presente nos diferentes materiais que nos rodeiam, tais como: metais, polímeros, semicondutores, cerâmicas, compósitos (material formado pela junção de outros dois distintos tanto em propriedades físicas como químicas), alimentos e até mesmo em órgãos do corpo humano como pulmões e rins (SANTOS et al., 2016, LOFRANO, 2018).

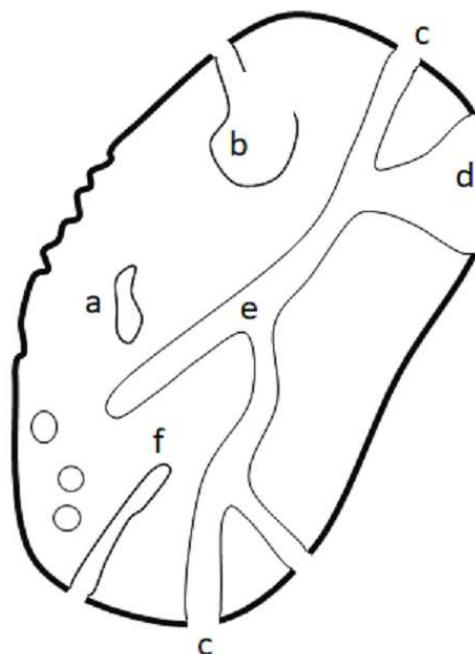
A porosidade de um material ( $\varphi$ ), ou seja, a fração em volume de espaços vazios, pode ser calculada pela divisão entre o volume dos poros ( $V_p$ ) e o volume total do material ( $V_t$ ), como apresentado na Equação (1):

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

### 2.1.1 Classificação dos Poros

Os poros podem ser classificados de acordo com o comportamento do fluido em seu interior, conforme ilustrado na Figura 1 (SANTOS et al., 2016; IUPAC, 1994).

**Figura 1 - Classificação dos poros em um meio poroso**



**Fonte: Autoria própria.**

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

- (a) poros internos e fechados — influenciam as propriedades do material, porém, não estão disponíveis para o escoamento de fluidos e adsorção de gases;
- (b) e (f) poros abertos e sem saída — permitem o escoamento de fluidos até certo ponto onde terminam;
- (c) e (d) poros abertos e com saída — permitem o escoamento do fluido de um lado ao outro do material;
- (e) bifurcação — o escoamento pode seguir por caminhos diferentes no material.

Segundo Lofrano (2018), os poros podem ser classificados quanto a sua gênese, se a mesma é natural ou sintética, localização, In situ ou ex situ, magnitude da matriz sólida, sendo macroporoso ou microporos, quanto a consolidação dos constituintes sendo eles consolidados ou não consolidados e sua natureza: granular ou fibrosa como mostra o Quadro 1.

**Quadro 1 - Classificação dos meios porosos**

<b>Característica</b>	<b>Classificação</b>	<b>Tamanho</b>
<i>Gênese</i>	Naturais	Solos, órgãos (rins, pulmões), biotécidos
	Sintéticas	Materiais cerâmicos, cimento, espumas poliméricas, biomateriais
<i>Localização</i>	In situ	Solos, carvão vegetal, zeólitas
	Ex situ	Filtros, colunas recheadas
<i>Magnitude da matriz sólida</i>	Macroporosos (Diâmetro > 50nm)	Matacões e blocos de rocha fraturados, enseadeiras, sistemas cársticos de cavernas alagadas
	Micro/Nanoporosos (Diâmetro < 2 nm)	Adsorventes, tecidos e bombas capilares
<i>Consolidação dos constituintes</i>	Consolidados	Materiais cimentícios, catalisadores automotivos, argila expandida e membranas
	Não Consolidados	Solos e <i>wetlands</i> (terras úmidas)
<i>Natureza dos constituintes</i>	Granulares	Carvões ativados
	Fibrosos	Geotêxteis e sistemas radiculares

**Fonte: Adaptado de Lofrano (2018)**

Para esse estudo, o material poroso é considerado aquele que apresenta a possibilidade para a permeabilidade de um fluido. Essa característica implica que os poros do material devem ser interconectados de forma que permitam o ingresso e o egresso de fluidos no meio. De acordo com o Quadro 1 o meio poroso deste estudo pode ser classificado como: sintético, ex-situ, microporoso, consolidado e granular.

### 2.1.2 Capilaridade

A capilaridade é um fenômeno que pode ser explicado pela capacidade de um fluido de ascender ou descender ao entrar em contato com um duto muito fino (capilar). Segundo Leiz e Leonardos (1982 *apud* GONÇALVES 2012), a capilaridade consiste no fenômeno da modificação do nível de líquidos devido ao contato de sua superfície com outro sólido.

Esse fenômeno ocorre devido às forças de coerção e adesão presentes no fluido. A primeira é uma força intermolecular, que ocorre entre as moléculas para mantê-las unidas. A segunda é uma força de atração que ocorre entre as moléculas do fluido e as moléculas do sólido com o qual entrou em contato. Por exemplo, ao inserir um tubo capilar de vidro em um copo de água, percebe-se sua ascendência. Isto ocorre, pois as suas moléculas aderem ao vidro e pela força de coerção outras moléculas também sobem. A ascendência ocorre enquanto a força de adesão for maior que a de coerção (REDELUCCI, 2005).

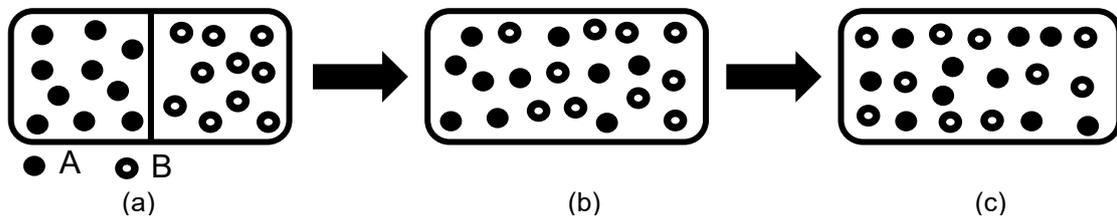
O fluxo de líquido por capilaridade pode ocorrer pela combinação de 3 fatores: forças de escoamento superficial, gradiente de pressão e gravidade. Quando as interações entre as moléculas do líquido (coersão) forem mais importantes do que entre o fluido e a superfície sólida (adesão), formam-se pontes de líquido permitindo assim seu escoamento (SANTOS, 2009).

### 2.1.3 Lei de Fick

A Lei de Fick, utilizada para descrever o transporte de vapor de água e sal dentro do meio poroso, pode ser explicada pelo fenômeno da difusão mássica. Considere dois gases diferentes, A e B, isolados e separados por uma divisória, a mesma temperatura e pressão, como mostra a Figura 2a. Com a retirada dessa divisória, as partículas de A e B começam a movimentar-se aleatoriamente. Devido a maior concentração de moléculas A do lado esquerdo, mais moléculas de A passaram para o lado direito, acontecendo o mesmo com B (Figura 2b), porém, em sentido contrário. Portanto, com o decorrer do tempo serão atingidas concentrações

uniformes, pois a distribuição de moléculas atingiu o equilíbrio, como mostra a Figura 2c (INCROPERA, 2008).

**Figura 2 – Processo de transporte de massa por difusão**



Fonte: Adaptada de Incropera (2008)

O processo de passagem das moléculas de uma região de maior concentração para uma de menor concentração, até que se obtenha o equilíbrio, recebe o nome de difusão mássica. Em 1855, o médico e fisiologista Adolf Fick propôs esse conceito representado pela Equação (2a), para um fluxo unidimensional e estado estacionário, e (2b) para estado não estacionário:

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2b)$$

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 um sistema de coordenadas ortogonal.

#### 2.1.4 Lei de Darcy

A equação de Darcy, utilizada para descrever o transporte de líquido dentro do meio poroso, foi uma descoberta fundamental para diversas áreas da engenharia, agricultura e geologia. Henry Darcy propôs em 1856 que em um sistema monofásico horizontal, o escoamento de um fluido que atravessa uma amostra porosa é diretamente proporcional a variação de pressão ao longo do comprimento, podendo ser expressa pela Equação (3).

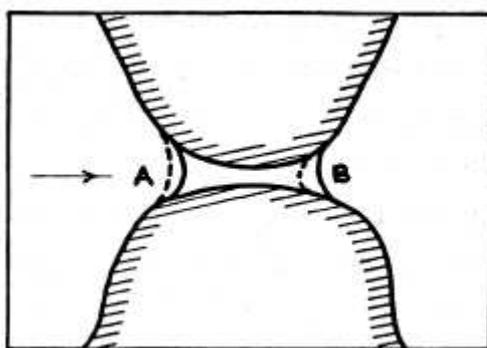
$$Q = -\frac{\kappa}{\mu} A \left( \frac{\Delta P}{X} \right) \quad (3)$$

onde  $Q$  é a vazão volumétrica do fluido,  $A$  é a área da seção transversal,  $X$  é o comprimento,  $\Delta P$  é a diferença de pressão,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido e  $\kappa$  é o coeficiente de permeabilidade. O coeficiente de permeabilidade de um material representa a propriedade de permitir o escoamento de um fluido através do mesmo (CAPUTO, 1996).

### 2.1.5 Permeabilidade Difusiva ao Vapor ( $\delta_v$ )

Este coeficiente está associado a Lei de Fick, devido ao fluxo difusivo ser gerado por uma diferença de concentração. Observa-se na Figura 3, a formação de pontes de líquido nos poros menores, na qual permite o aumento da permeabilidade difusiva facilitando o transporte de A para B. Nesse caso, no lado A, onde a pressão é maior, ocorre a condensação e no lado B ocorre a evaporação devido à menor pressão de vapor (SANTOS, 2009).

**Figura 3 - Transporte em série vapor-líquido-vapor em um poro preenchido de água**



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

Fatores que interferem diretamente na permeabilidade difusiva são a temperatura e a saturação. No caso da temperatura, sua alteração interfere diretamente na pressão de vapor, ou seja, caso seja aplicado um gradiente de temperatura a difusão ocorre do lado mais quente para o mais frio ou para o lado onde a pressão parcial de vapor é menor. No caso da saturação, a sua interferência é causada devido à redução ou ao aumento das pontes líquidas nos poros.

### 2.1.6 Condutividade Térmica ( $\lambda$ )

A condutividade térmica é um coeficiente derivado da Lei de Fourier descrita pela Equação (4):

$$q'' = -\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \quad (4)$$

onde  $q$  é o fluxo de calor,  $\lambda$  é a condutividade térmica e  $T$  a temperatura. Esse coeficiente representa a capacidade de um material em conduzir calor dependendo de sua estrutura física, atômica e molecular.

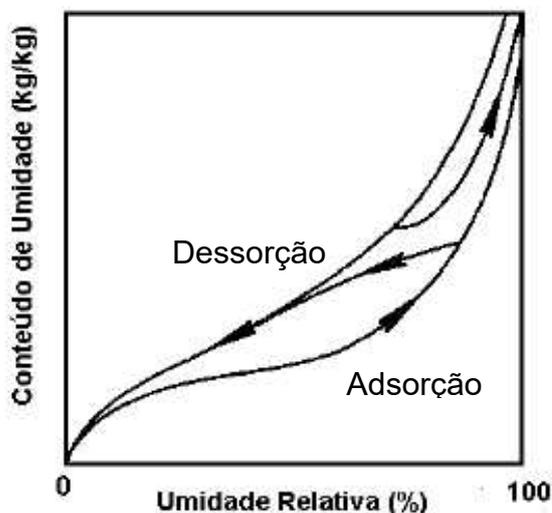
No meio poroso, a condutividade térmica deve ser levada em conta nas três fases presentes, sólida, líquida e gasosa (ar e vapor de água). O ar é considerado um bom isolante térmico, ou seja, em meio seco, sua condutividade térmica é baixa. A medida que o ar recebe umidade seu coeficiente aumenta tornando mais fácil a troca térmica. No presente trabalho a fase gasosa não é considerada pois o concreto é um material que apresenta baixa porosidade.

### 2.1.7 Isotermas de Equilíbrio

Em um meio poroso, a relação estabelecida entre o fluido e o sólido poroso é diferente daquela quando o confinamento ocorre em um espaço geométrico qualquer. Isto porque, há uma interação estática entre o fluido e a face do sólido com o qual está em contato (MENDES, 1997). Para essa interação a uma temperatura constante e um meio não saturado, pode-se determinar uma relação entre a pressão parcial de vapor e o conteúdo de umidade, chamada Isoterma de Equilíbrio.

A Figura 4 apresenta uma isoterma de equilíbrio, onde a curva superior é chamada de curva de dessorção e a inferior é chamada de curva de adsorção. Os processos (curvas) que se encontram entre elas são intermediários que podem ocorrer no interior do poro.

Figura 4 - Isoterma de equilíbrio



Fonte: Santos (2009)

## 2.2 CONCRETO

O concreto é uma rocha artificial que pode ser considerado basicamente a mistura de quatro componentes: água, cimento, pedra e areia. Segundo Pedroso (2009), esse sólido tem grande destaque como material construtivo devido a sua resistência à água e sua plasticidade, características que garantem sua utilização para construção em diversas formas. Além disso, seus integrantes apresentam baixo custo e se apresentam em abundância no mundo.

O concreto pode apresentar diversas características dependendo do agregado utilizado e da natureza da pasta (mistura de água e cimento). A mistura de água e cimento é responsável pela aglomeração dos componentes que dão sua origem, 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.

Segundo a Norma Brasileira (NBR) 8953 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2015a), os concretos são classificados em dois grupos, I e II, de acordo com sua resistência a compressão, como mostra a Quadro 2, a qual é

determinada a partir dos ensaios de corpos de prova moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT,2015b) e rompidos conforme a NBR 5739 (ABNT,2018). Concretos abaixo de C20 são considerados concretos não estruturais.

**Quadro 2 – Classes de concreto de acordo com a resistência**

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte:ABNT (2015a)

Os concretos também podem ser classificados de acordo com sua consistência no estado seco, determinada por ensaio de abatimento pela NBR NM 67 (ABNT,1998) e no caso de autodensável pela NBR 15823-1 (ABNT,2017), como mostra a Quadro 3 (ABNT, 2015a).

**Quadro 3 – Classes de consistência**

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	$\geq 220$	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras
NOTA 1 De comum acordo entre as partes, pode ser criadas classes especiais de consistência, explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento		
NOTA 2 Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações.		

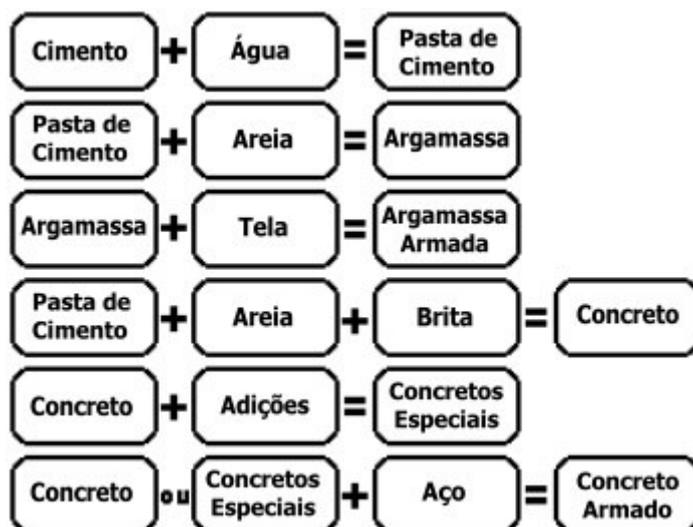
Fonte:ABNT (2015a)

### 2.2.1 Concreto Armado

Existem diversas misturas que podem dar origem a concretos com diferentes características de acordo com sua finalidade. Buscando uma melhor resistência à

tração adicionou-se ao concreto materiais que pudessem torná-lo mais resistente. Assim aderiu-se a utilização de barras de aço em seu interior formando assim o concreto armado, o qual pode ter sua composição explicada pela Figura 5.

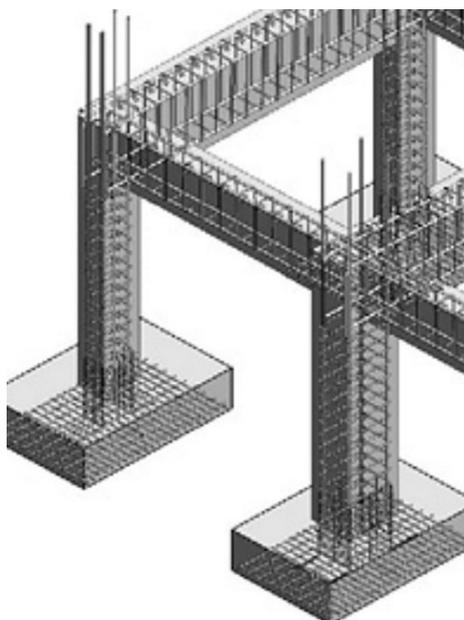
Figura 5 - Composição do concreto armado



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). Um exemplo de concreto armado é mostrado na Figura 6.

**Figura 6 - Estrutura de concreto armado**



**Fonte: Santos (2016)**

Segundo Süssekind (1984), a utilização das barras de aço no concreto é possível devido a três fatores:

- O trabalho conjunto do concreto e do aço é assegurado pela aderência entre ambos.
- Os coeficientes de dilatação térmica do aço e do concreto são semelhantes.
- O concreto protege a armadura da oxidação por fatores externos garantindo a sua maior durabilidade.

### 2.3 CORROSÃO

Por corrosão, entende-se o desgaste gradual que um material sofre ao longo do tempo em decorrência de um processo químico ou físico, ou seja, sua degradação que em geral ocorre de forma espontânea. A corrosão é comumente associada a materiais metálicos que sofrem um processo eletroquímico, e seu desgaste é facilmente notado no dia a dia. Porém, pode-se atribuir esse nome também a deterioração de outros materiais, como polímeros e cerâmicas, que segundo Gentil

(1996), sofrem ação química do meio ambiente. A Quadro 4 apresenta processos de corrosão que ocorrem em metais, polímeros e cerâmicas.

**Quadro 4 – Corrosão de metais, polímeros e cerâmicas.**

TIPO	COMO ACONTECE	EXEMPLOS
<b>Metais</b>	Deterioração pela dissolução do metal (corrosão) ou por reação com a atmosfera (oxidação). Ambos os processos são eletroquímicos.	Oxidação de materiais de ferro, formando a ferrugem. Fragilização de ligas metálicas pelo hidrogênio.
<b>Polímeros</b>	Solventes podem causar a dissolução ou a expansão de polímeros.	Ação do ozônio O <sub>3</sub> na borracha. Polietileno exposto a altas temperaturas em atmosfera rica em oxigênio se torna frágil.
<b>Cerâmicas</b>	Cerâmicas são matérias bastante resistentes a corrosão e quando sofrem esse tipo de processo estão inseridos em ambientes com altas temperaturas ou muito agressivos quimicamente.	Ataque de sulfatos e cloretos ao infiltrar esses materiais através da umidade. Mofo causado pela umidade. Carbonatação do concreto.

Fonte: Adaptado de Callister (1999) e Gentil (1996)

### 2.3.1 Corrosão do Concreto Armado

A deterioração do concreto 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 pela ação de ácidos e sais.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) destaca os mecanismos preponderantes para a deterioração das estruturas de concreto separados de três formas, descritas na sequência:

- Mecanismos para a deterioração da estrutura propriamente dita:

Carbonatação: é a despassivação da armadura que ocorre devido a ação do dióxido de carbono da atmosfera sobre o aço da armadura. Segundo Helene (2014), esse processo ocorre quando o gás carbônico penetra nos poros do concreto pelo processo de difusão e reage com hidróxidos alcalinos das soluções dos poros. Isso

resulta na queda do pH da solução, ou seja, ela fica mais ácida, sendo mais nociva a armadura podendo causar séria corrosão.

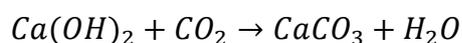
Despassivação pela ação de cloreto (Cl<sup>-</sup>): nesse processo ocorre a penetração de íons cloreto por difusão nos poros do concreto. Segundo Helene (2014), a alta concentração desse componente no meio poroso do concreto, pode superar a quantidade de hidroxilas e deteriorar a armadura. A corrosão na armadura pode apresentar manchas, fissuras, destacamentos em pedaços de concreto; porém, para a identificação do problema de despassivação por cloretos, necessita-se de ensaios específicos, pois não é perceptível a olho nu.

- Mecanismos para deterioração da armadura:

São todos aqueles ocasionados por ações mecânicas e térmicas, impactos, ações cíclicas, retração, fluência, relaxação e outras ações que atuam sobre as estruturas.

- Mecanismos para a deterioração do concreto:

Lixiviação: esse mecanismo é responsável pela dissolução e transporte de compostos hidratados da pasta de cimento. Segundo Gentil (1996), ao se hidratar o cimento ocorre a formação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), essa base por sua vez tem uma solubilidade de 1,18 kg/m<sup>3</sup>. Portanto, águas com baixo teor de cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e Magnésio (Mg<sup>2+</sup>), chamadas de água duras, conseguem dissolver e carregar esse composto, que ao entrar em contato com o ar reage com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) formando carbonato de cálcio, descrito pela reação a seguir.



Esse fenômeno também é conhecido por eflorescência, pois se caracteriza pela formação de sólidos brancos na superfície do concreto e as vezes de estalactites.

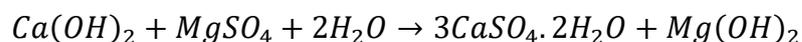
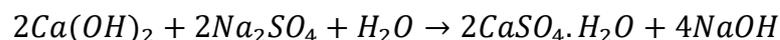
Expansão por sulfato: ocorrem reações expansivas e deletérias ocasionadas por águas ou solos que estejam contaminados por sulfatos. Silva Filho (1994) classifica os sais de sulfato de acordo com sua agressividade, a partir de informações sobre a solubilidade do sal e seu efeito danoso sobre o concreto, apresentados na Quadro 5.

**Quadro 5 –Agressividade de sais de sulfato.**

<i>Sal</i>	<i>Nome</i>	<i>Cor</i>	<i>Solubilidade</i>	<i>Origem</i>	<i>Agressividade</i>
$K_2SO_4$	Sulfato de potássio	Branca	Baixa	Água do mar/ subterrâneas	Elevada
$NH_4SO_4$	Sulfato de amônio	Branca	Alta	Fab. de explosivos/ ind. química/ águas subterrâneas	Elevada
$Na_2SO_4$	Sulfato de sódio	Branca	Alta	Ind. Química/ leito de mar/ água do mar	Elevada
$CaSO_4$	Sulfato de cálcio	Branca	Baixa	Águas subterrâneas/escória de carbono	Elevada
$MgSO_4$	Sulfato de magnésio	Branca	Alta	Água do mar/ subterrâneas	Elevada
$CuSO_4$	Sulfato de cobre	Branca	Alta	Conservação de madeiras/ galvanotecnia	Elevada
$FeSO_4/ (Fe)_2SO_4$	Sulfato de ferro e ferroso	Verde/ Branca	Alta	Desinfetante/tinturaria/ tratamento de água	Elevada
$ZnSO_4$	Sulfato de zinco	Branca	Baixa	Ind. químicas/ tinturaria	Média
$KAlSO_4$	Alumen potássio	Branca	Baixa	Ind. químicas	Média
$PbSO_4$	Sulfato de chumbo	Branca	Muito baixa	Ind. químicas	Reduzida
$CoSO_4$	Sulfato de cobalto	Vermelha	Baixa	-	Reduzida
$NiSO_4$	Sulfato de níquel	Verde	Baixa	Ind. químicas	Reduzida

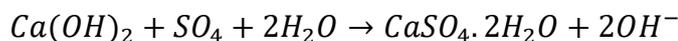
Fonte: Silva Filho (1994)

Ainda, segundo Silva Filho (1994), o sulfato de sódio e de magnésio são os mais agressivos. Os dois reagem com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação da massa de cimento formando produtos expansivos, como descritos na sequência:

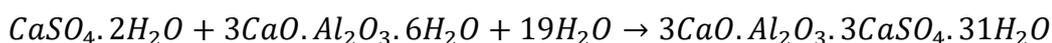


A primeira reação descreve a formação do gesso a partir do ataque do sulfato ao hidróxido, causando um aumento considerável do sólido em quase 2 vezes. Além disso, o gesso ainda oferece risco, pois ao ser hidratado pode se combinar com o aluminato tricálcico ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ), ocasionando uma expansão que agrava o processo de corrosão do concreto. A segunda reação ocorre quando o sulfato de magnésio, também conhecido como “sal amargo”, reage com o hidróxido de cálcio formado a gipsita (uma forma mais hidratada de gesso) que possui maior volume (SILVA FILHO, 1994).

Gentil (1996) apresentou em seu livro a reação do sulfato livre com o hidróxido de cálcio, representando uma série de eventos que podem agravar a corrosão do concreto pela ação desses sais. Iniciando pelo ataque descrito pela reação a seguir:



A formação do sulfato de cálcio hidratado pode ser sucedida pelo ataque do aluminato tricálcico hidratado, o qual forma por sua vez o sulfoaluminato de cálcio:



O grande aumento do volume nos produtos gerados pelas reações com sais de sulfato pode ser observado na Tabela 1.

**Tabela 1- Volume de sais de sulfato**

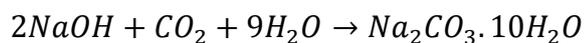
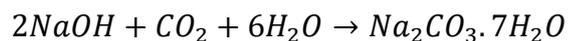
Composto	Massa Molecular	Densidade	Volume molecular (m <sup>3</sup> )
Ca(OH) <sub>2</sub>	74,1	2,23	3,32.10 <sup>-5</sup>
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	172,2	2,32	7,42.10 <sup>-5</sup>
3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	378,0	2,52	1,50.10 <sup>-4</sup>
3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3CaSO <sub>4</sub> .31H <sub>2</sub> O	1237,0	1,73	7,15.10 <sup>-4</sup>

**Fonte: Gentil (1996)**

Como mostra a Tabela 1, a partir das reações sucessivas descritas por Gentil (1996) ocorre um aumento da massa molecular e volume molecular do hidróxido de sódio ao se tornar cristais hidratados de sulfoaluminato de cálcio. Esta expansão causa nas estruturas de concreto um aumento da pressão interna seguido de rompimento da estrutura em fissuras e rachaduras.

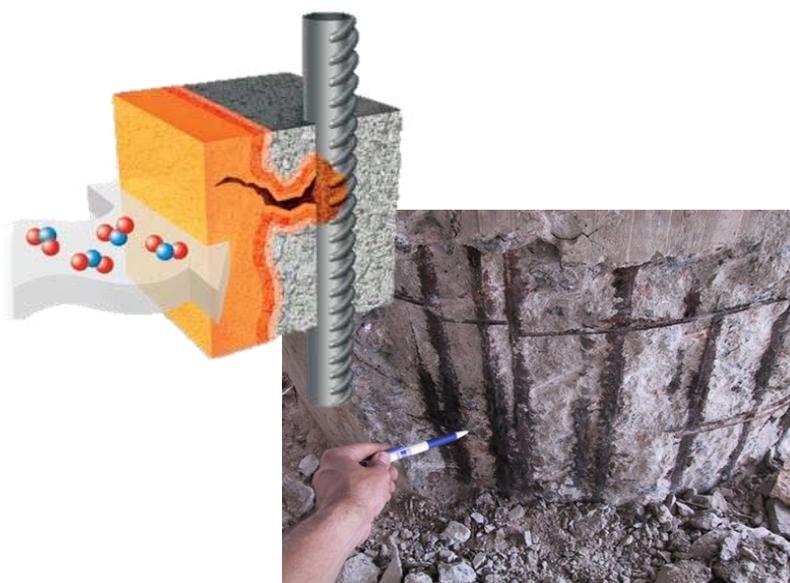
Reação álcali-agregado: essa reação ocorre quando bases fortes entram em contato com o concreto que contém em sua mistura agregados reativos. Um exemplo claro disso é o uso da sílica (SiO<sub>2</sub>), reativa e amorfa em agregados altamente alcalinos, ela gera uma reação entre o álcali e a sílica formando um gel altamente expansivo que causa fissuras no concreto (GENTIL, 1996).

Outra causa da deterioração do concreto por reação de álcalis ocorre quando uma base forte consegue penetrar em seus poros e pela evaporação vai se concentrando. A deterioração nesse caso ocorre pela cristalização do carbonato de sódio hepta- ou deca-hidratados formados de acordo com as reações a seguir (GENTIL, 1996):



O enfoque desse trabalho é no estudo da corrosão do concreto armado pela ação de sais por seus íons como é apresentado na Figura 7.

**Figura 7 - Deterioração do concreto pela ação salina**



**Fonte: Adaptada de Cava (2016)**

Os sais podem ser muito agressivos às estruturas de concreto armado, atingindo tanto a pasta do cimento utilizado para fazer o concreto como a armadura. Os diferentes tipos de sais podem causar diferentes ações nas estruturas, conforme descritos no Quadro 6 e considerados pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

**Quadro 6 - Corrosão por diferentes tipos de sais em concreto armado**

Tipo de Sal	Exemplo de reação	Corrosão
<b>Sais de amônio</b>	$2\text{NH}_4\text{Cl} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{NH}_3(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}$	Reação elimina amônia e hidróxido de cálcio responsável pela proteção alcalina do concreto
<b>Sais de magnésio</b>	$\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{Ca}^{2+}$	Formação de hidróxido de magnésio insolúvel com lixiviação dos íons de cálcio sob forma de sal solúvel
<b>Sais facilmente hidrolisáveis (FeCl<sub>3</sub>, AlCl<sub>3</sub>)</b>	$\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{HCl}$ $\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{HCl}$	Formação de ácido clorídrico quando reagem com água
<b>Sais com os ânions de íons sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  $3\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 19\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$	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 as estruturas de concreto. Uma vez que esses sais solúveis em água estão presentes nos poros do concreto, esses também podem sofrer um processo de secagem, dando início ao processo de cristalização. A cristalização causa um aumento do volume do sal com a decorrente geração 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 et al., 2014).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica a agressividade ambiental a qual estão relacionadas as ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto,

levando em consideração apenas os mecanismos de deterioração da armadura e do concreto. Essa classificação está apresentada na Quadro 7.

**Quadro 7 – Classificação da Agressividade do Meio Ambiente**

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a,b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a,b</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>a,c</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiro, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).  
<sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65% partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.  
<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivo, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

**Fonte: NBR6118 (2014)**

De acordo com a agressividade do meio ambiente, estabelece-se na norma também a qualidade mínima do concreto, a qual tem uma correspondência com a relação água/cimento, a resistência mínima do concreto a compressão e sua durabilidade, como verificada na Quadro 8.

**Quadro 8 – Qualidade do concreto de acordo com a agressividade do Meio Ambiente**

Concreto <sup>a</sup>	Tipo <sup>b,c</sup>	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	CP	≤0,60	≤0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	CP	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.  
<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

**Fonte: ABNT (2014)**

## 2.4 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 umidade e sal em meios porosos.

### 2.4.1 Modelo de Chunqiu, Kefei e Zhaoyuan (2008)

Em 2008, Chunqiu, Kefei e Zhayuan estudaram o efeito da umidade para o concreto a partir de ciclos de embibição e secagem. Para isso, os autores utilizaram como base a Equação (5), que representa o transporte de umidade em concreto.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (5)$$

Onde  $\theta$  é a saturação da água nos poros do concreto e  $D$  é o coeficiente de difusão da umidade ( $m^2/s$ ), o qual depende da saturação do poro.

De maneira geral, o concreto está sujeito a ciclos de secagem e embibição, esses processos ocorrem de acordo com o ambiente em que está inserido. Sendo assim, durante a secagem, os autores consideraram que o processo é predominado pela difusão do vapor enquanto na embibição ocorre a absorção e possivelmente difusão de vapor. Esse ciclo foi representado pelos autores usando a Equação (6).

$$D(\theta) = \begin{cases} D_d(\theta), & \text{durante a secagem} \\ D_w(\theta), & \text{durante a embibição} \end{cases} \quad (6)$$

O coeficiente de secagem é representado pela Equação (7), onde é estabelecida uma relação entre a difusividade e a o grau de saturação de água.

$$D_d(\theta) = D_d^s \left[ \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left( \frac{1 - \theta}{1 + \theta_c} \right)^N} \right] \quad (7)$$

Onde  $D^s_d$  é a difusividade do concreto quando totalmente saturado e  $\alpha_0=0,025$ ,  $\theta_c=0,792$  e  $N=6$  são parâmetros experimentais obtidos para o concreto utilizado.

O coeficiente de embibição apenas pode ser deduzido de forma indireta, pois apresenta o processo de absorção pela difusão. Portanto, o processo de embibição para esse estudo é considerado quando há uma fina camada de umidade na superfície do concreto, sendo dominado pelo processo de absorção por capilaridade, representada pela Equação (8).

$$D_w(\theta) = D_w^0 \exp(n\theta) \quad (8)$$

Onde  $D_w^0$  é a difusividade do concreto quando totalmente seco e  $n$  um coeficiente de regressão (para o concreto pode ser considerado  $n=6$ ).

#### 2.4.2 Modelo de Zanden, Taher e Arends (2015)

Os autores Zanden, Taher e Arends (2015) propuseram um modelo para a difusão da umidade e do cloreto através dos poros do concreto. O transporte de umidade, descrito pelos pesquisadores, considera que para um material parcialmente saturado o escoamento é influenciado por variações da quantidade de água no material. Portanto, consideraram a lei de Fick, onde o fluxo de água é proporcional ao gradiente de concentração. Por meio do micro balanço de massa e da Lei de Fick o transporte de umidade é descrito pela Equação (9).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (9)$$

O transporte de sal, é voltado nesse estudo para os íons Cloreto ( $Cl^-$ ), considera esses íons dissolvidos na água dentro dos poros, sendo ele o único cloreto presente na amostra. O fluxo mássico do cloreto é dividido pelo transporte convectivo e dispersivo. O primeiro ocorre quando o sal dissolvido é carregado pela água através dos poros do concreto. O transporte convectivo é descrito pela Equação (10).

$$n_{c,convectivo} = n_{v,a}c = \frac{n_a C}{\rho_a \varphi_a} = \frac{n_a C}{\rho_a w / \rho_a} = n_a \frac{C}{w} \quad (10)$$

Onde,  $n_a$  é o escoamento de água  $\rho_a$  é a densidade da água,  $C$  a concentração de cloreto,  $\phi$  a fração de volume da água e  $w$  a concentração da água.

O transporte do íon através da dispersão ocorre devido a diferença de concentração ao longo do concreto e também devido a velocidade da água. Portanto, este transporte é descrito pela Equação (11).

$$n_{c,dispersivo} = -D \frac{\partial w}{\partial x} \frac{w}{C} - D_s \frac{\partial C}{\partial x} \quad (11)$$

Sendo  $D_s$  o coeficiente de dispersão o qual também depende do transporte de água descrito pela Equação (12).

$$D_s = \frac{D_m}{\tau} + \frac{1}{2} \left( \frac{D}{w} \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \frac{r^2}{D_m} \quad (12)$$

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. Portanto a Equação (13) representa o transporte de cloreto.

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

### 3 METODOLOGIA

A metodologia desse 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.

#### 3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

A apresentação do modelo matemático para a transferência de umidade e de calor em um meio poroso está baseado no trabalho desenvolvido por Santos (2009).

##### 3.1.1 Transporte de Umidade

Segundo Santos (2009), o transporte de umidade ocorre devido a três fenômenos principais: transporte na fase condensada por meio 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 ( $j$ ) é dividido em dois fluxos: o de líquido ( $j_l$ ) e o de vapor ( $j_v$ ), Equação (14).

$$j = j_l + j_v \quad (14)$$

O fluxo de líquido é descrito pela equação de Darcy, adaptada para meios insaturados, Equação (15):

$$j_l = K(\nabla P_{suc} - \rho_l g) \quad (15)$$

onde  $K$  é a condutividade hidráulica,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\rho_l$  é a massa específica do líquido. Atribui-se o fluxo de líquido principalmente a dois fatores, o primeiro refere-se as forças de aderência e a capilaridade, avaliada pela pressão de sucção ( $\nabla P_{suc}$ ); o segundo termo leva em conta a aceleração da gravidade obtido por

meio de uma distância relativa na direção vertical. O gradiente de pressão de sucção pode ser descrito pela Equação (16):

$$\nabla P_{suc} = \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \nabla T + \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} \nabla P_v \quad (16)$$

onde:

$$\frac{\partial P_{suc}}{\partial T} = R_v \rho_l \left[ -\ln \phi - \frac{T}{\phi} \left( -\frac{P_v}{P_{sat}^2} \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \right] \quad (17)$$

e

$$\frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} = -\frac{R_v T \rho_l}{P_v} \quad (18)$$

As Equações (17) e (18) 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 escoamento de ar dentro do meio poroso transportando o vapor. Portanto, o fluxo de vapor pode ser calculado pela Equação (19):

$$j_v = -\delta_v \nabla P_v \quad (19)$$

onde  $\delta_v$  é a permeabilidade difusiva ao vapor [s].

Deste modo, Santos (2009) descreveu a conservação da umidade com o termo transiente do conteúdo de umidade  $w$  [kg/m<sup>3</sup>], apresentado na Equação (20), em função da pressão parcial de vapor e da temperatura na Equação (21), no intuito de proporcionar uma maior robustez para o método de solução das equações por meio do MTDMA.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot j \quad (20)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial P_v} \frac{\partial P_v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ -K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} \nabla T - \left( K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} - \delta_v \right) \nabla P_v + K \rho_l g \right] \quad (21)$$

onde as derivadas

$$\frac{\partial \phi}{\partial P_v} = \frac{1}{P_{sat}} \quad (22)$$

e

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = -\frac{P_v}{P_{sat}^2} \left( \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \quad (23)$$

são obtidas a partir da definição de umidade relativa:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \quad (24)$$

### 3.1.2 Transporte de Calor

Para a transferência de calor, Santos (2009) utilizou o divergente do fluxo de calor e um termo fonte, devido a transição de fase, obtendo-se assim, a Equação (25):

$$c_m \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q + S' \quad (25)$$

onde:

$$c_m = c_o + \frac{c_l \theta}{\rho_0} \quad (26)$$

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

O fluxo de calor  $q$  é dividido entre aqueles ocasionados pela condução ( $q_{cond}$ ), descrito pela Equação (27), e pela convecção ( $q_{conv}$ ), descrito pela Equação (28):

$$q_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (27)$$

$$q_{conv} = j_l c_{pl} T + j_v c_{pv} T \quad (28)$$

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

O termo fonte ( $S'$ ), atribuído a mudança de fase, descrito na Equação (29) é quantificado por meio do calor latente de transição de fase:

$$S' = -L(T)\nabla \cdot j_v \quad (29)$$

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

Adotando-se a temperatura de referência de 0 °C, a Equação (30) que representa a conservação da energia torna-se:

$$c_m \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \left( \lambda - K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} c_{pl} T \right) \nabla T - \left( K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} c_{pl} T - \delta_v c_{pv} T \right) \nabla P_v + \right] - L(T) \nabla \cdot j_v \quad (30)$$

### 3.1.3 Transporte de sal

No trabalho de Santos (2009), o transporte de ar é levado em conta, porém, esse fator pode ser desprezado para materiais com baixa porosidade. Desse modo, essa equação foi substituída pelo transporte de sal.

Zanden, Taher e Arends (2015) atribuem o transporte de sal devido aos fenômenos de convecção e dispersão, como mencionado na Seção 2.4.2. Portanto, o transporte de sal foi definido pelos autores pelas Equação (12) e (13), anteriormente mencionadas e lembradas abaixo.

$$D_s = \frac{D_m}{\tau} + \frac{1}{2} \left( \frac{D}{w} \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \frac{r^2}{D_m} \quad (12)$$

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

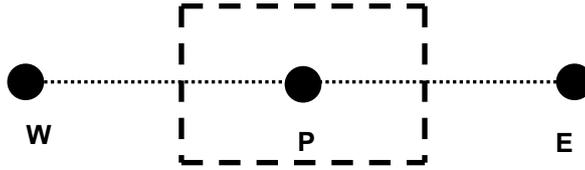
onde  $D_m$  é o coeficiente de difusão do sal na água,  $\tau$ , a tortuosidade do meio  $r$ , o raio do poro,  $C_s$  a concentração de sal,  $D$ , o coeficiente de difusão da água no concreto e  $D_s$ , o coeficiente de dispersão do sal no concreto.

## 3.2 DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

Para a discretização unidimensional das equações governantes, empregou-se o Método dos Volumes Finitos, introduzido por Patankar (1980).

A Figura 8 apresenta as letras P para representar o centro do nó selecionado, W e E para os nós vizinhos de P, localizados no centro de cada um de seus respectivos volumes de controle. Dessa forma, como proposto em Santos (2009), os coeficientes de transporte são calculados a partir da média harmônica na interface dos volumes de controle.

Figura 8- Volume de controle unidimensional



Fonte: Autoria própria.

A discretização é realizada usando o esquema totalmente implícito para a conservação de umidade, sal e calor para os nós intermediários do domínio, representada nas Equações (31), (32) e (33), respectivamente, como:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{C_{Pv0}}{\Delta t} + \frac{D_{Pve0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pvw0}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left( \frac{C_{T0}}{\Delta t} + \frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2} \right) T_p \\ & = \frac{D_{Te0}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{Pve0}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{Tw0}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{Pvw0}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{C_{pv0}}{\Delta t} P_{vp}^0 \\ & + \frac{C_{T0}}{\Delta t} T_p^0 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{D_{Pve1}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pvw1}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left( \frac{D_{Te1}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw1}}{\Delta x^2} \right) T_p + \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{D_{Pge1}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pgw1}}{\Delta x^2} \right) C_{sp} \\ & = \frac{D_{Te1}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{Pve1}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{Pge1}}{\Delta x^2} C_{se} + \frac{D_{Tw1}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{Pvw1}}{\Delta x^2} P_{vw} \\ & + \frac{D_{Pgw1}}{\Delta x^2} C_{sw} + \frac{C_s^0}{\Delta t} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{D_{Pve2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Pvw2}}{\Delta x^2} \right) P_{vp} + \left( \frac{C_{T2}}{\Delta t} + \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} \right) T_p \\ & = \frac{D_{Te2}}{\Delta x^2} T_e + \frac{D_{Pve2}}{\Delta x^2} P_{ve} + \frac{D_{Tw2}}{\Delta x^2} T_w + \frac{D_{Pvw2}}{\Delta x^2} P_{vw} + \frac{C_{T2}}{\Delta t} T_p^0 \end{aligned} \quad (33)$$

Onde:

Equação do transporte de umidade:

$$C_{Pv0} = \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial P_v} \quad C_{T0} = \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial T} \quad D_{Pv0} = K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} - \delta_v \quad D_{T0} = \frac{P_v}{P_{sat}(T)}$$

Equação do transporte de sal:

$$D_{Pv1} = C_s \frac{D_d}{w}$$

$$D_{T1} = \frac{C_s}{w} D_d \frac{\partial w}{\partial T}$$

$$D_{Pg1} = D_s$$

Equação do transporte de calor:

$$C_{T2} = c_m \rho_0 \quad D_{T2} = \lambda - K \frac{\partial P_{suc}}{\partial T} c_{pl} T \quad D_{Pv2} = K \frac{\partial P_{suc}}{\partial P_v} c_{pl} T - \delta_v c_{pv} T$$

### 3.3 ALGORITMO PARA RESOLUÇÃO DO SISTEMA EQUAÇÕES GOVERNANTES

Uma vez obtido o sistema de equações algébricas pela discretização em Volumes Finitos (PATANKAR, 1980), necessita-se utilizar um algoritmo capaz de solucionar esse sistema de equações algébrico, assegurando sua robustez numérica. Nesse caso, utilizou-se o MTDMA, conforme apresentado por Mendes et al. (2002).

Para tal, a discretização das equações governantes no domínio fornece equações algébricas na forma da Equação (34):

$$A_i \cdot x_i = B_i \cdot x_{i+1} + C_i \cdot x_{i-1} + D_i \quad (34)$$

onde  $x_i$  é um vetor que contém as variáveis dependentes. No caso do modelo do apresentado, o vetor é definido pela Equação (35):

$$x_i = \begin{bmatrix} w_i \\ C_s \\ T_i \end{bmatrix} \quad (35)$$

No método tradicional (TDMA), os coeficientes A, B, e C são tensores de primeira ordem. No método empregado para esse trabalho, os tensores passaram a ser de segunda ordem. O vetor  $x_i$ , Equação (36), pode expresso como uma função de  $x_{i+1}$ :

$$x_i = P_i \cdot x_{i+1} + q_i \quad (36)$$

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

Substituindo a Equação (36) com  $i=i-1$  e substituindo na Equação (34), tem-se:

$$(A_i - C_i \cdot P_{i-1}) x_i = B_i \cdot x_{i+1} + C_i \cdot q_{i-1} + D_i \quad (37)$$

Isolando  $x_i$  na Equação (37):

$$x_i = [(A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} \cdot B_i] \cdot x_{i+1} + (A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} (C_i \cdot q_{i-1} + D_i) \quad (38)$$

Comparando agora a Equação (38) com a Equação (36), obtém-se os parâmetros  $P_i$  e  $q_i$  mostrados nas Equações (39) e (40):

$$P_i = [(A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} \cdot B_i] \quad (39)$$

$$q_i = (A_i - C_i \cdot P_{i-1})^{-1} (C_i \cdot q_{i-1} + D_i) \quad (40)$$

O algoritmo desenvolvido para a resolução das equações governantes foi implementado no software Borland Buidar 6.0 por meio de um código computacional escrito em linguagem C++. O computador (notebook) utilizado nas simulações possui um processador 2,6 GHz (6 núcleos, 12 threads e 12MB de cache) com 16 GB de RAM, 2 TB + 256 MB SSD de disco rígido e sistema operacional 64 bits.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados de alguns estudos de casos, iniciando com a comparação entre o modelo proposto e o de Zanden, Taher e Arends (2015). Na sequência, foi avaliado o comportamento de diferentes sais no interior do concreto e finalmente analisaram-se os gradientes de temperatura no transporte de umidade e sal no interior do concreto.

As propriedades do concreto utilizadas para os testes estão descritas na Tabela 2.

**Tabela 2- Propriedades do concreto**

Propriedades do concreto	
Massa específica	2300 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico material seco	850 J/(kg.K)
Condutividade térmica	1,6 W/(m.K)
Tortuosidade	1

Fonte: Zanden, Taher e Arends (2015) e Wufi®Plus

Para o coeficiente de difusão da água no concreto e o raio dos poros assumiu-se a Equação (41) e Equação (42), descritas no trabalho de Zanden, Taher e Arends (2015).

$$\begin{cases} Dd = 10^{0,0017851w^2 - 0,093715w - 7,551} & \text{para } 0 \leq w \leq 52,5 \\ Dd = 10^{0,023895w^2 - 8,806} & \text{para } 52,5 < w \leq 157,5 \end{cases} \quad (41)$$

$$\begin{cases} r = 10^{-0,04905w} & \text{para } 0 \leq w \leq 14,25 \\ r = 10^{-0,01141w - 4,536} & \text{para } 14,25 < w \leq 128,25 \\ r = 10^{-0,08728w + 1,194} & \text{para } 128,25 < w \leq 157,5 \end{cases} \quad (42)$$

### 4.1 VERIFICAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL

Para verificar o código computacional desenvolvido, realizaram-se testes comparativos em relação 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 uma malha uniforme com 20 nós. Considerou-se o lado interno da parede adiabático e o lado externo em contato com o ambiente, apresentando uma temperatura de 20 °C e uma quantidade de umidade

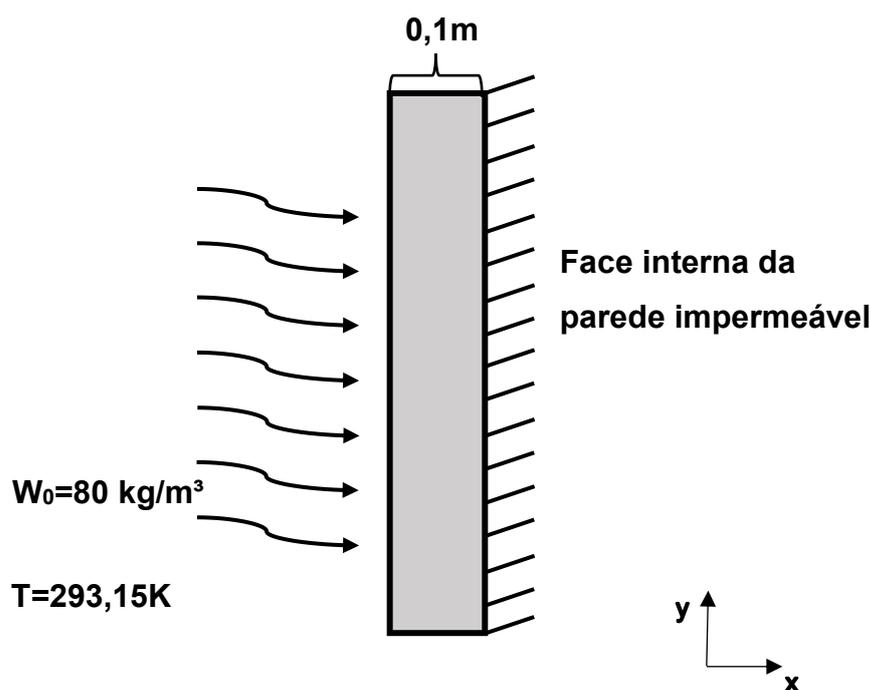
inicial ( $w_0$ ) de  $80 \text{ kg/m}^3$ , variando de acordo com as estações do ano, como mostrado na Equação (43):

$$w = 70 \text{ sen}(1,9924 \times 10^{-7} \cdot t) + 80 \quad (43)$$

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 foi composto de íons Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), que apresenta um coeficiente de difusão na água de  $1,26 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $20 \text{ C}^\circ$ . A Figura 9 representa o diagrama esquemático em que foram feitos os testes de verificação do código computacional. Ressalta-se que o ambiente é aberto e, portanto, sujeito ao intemperismo ambiental.

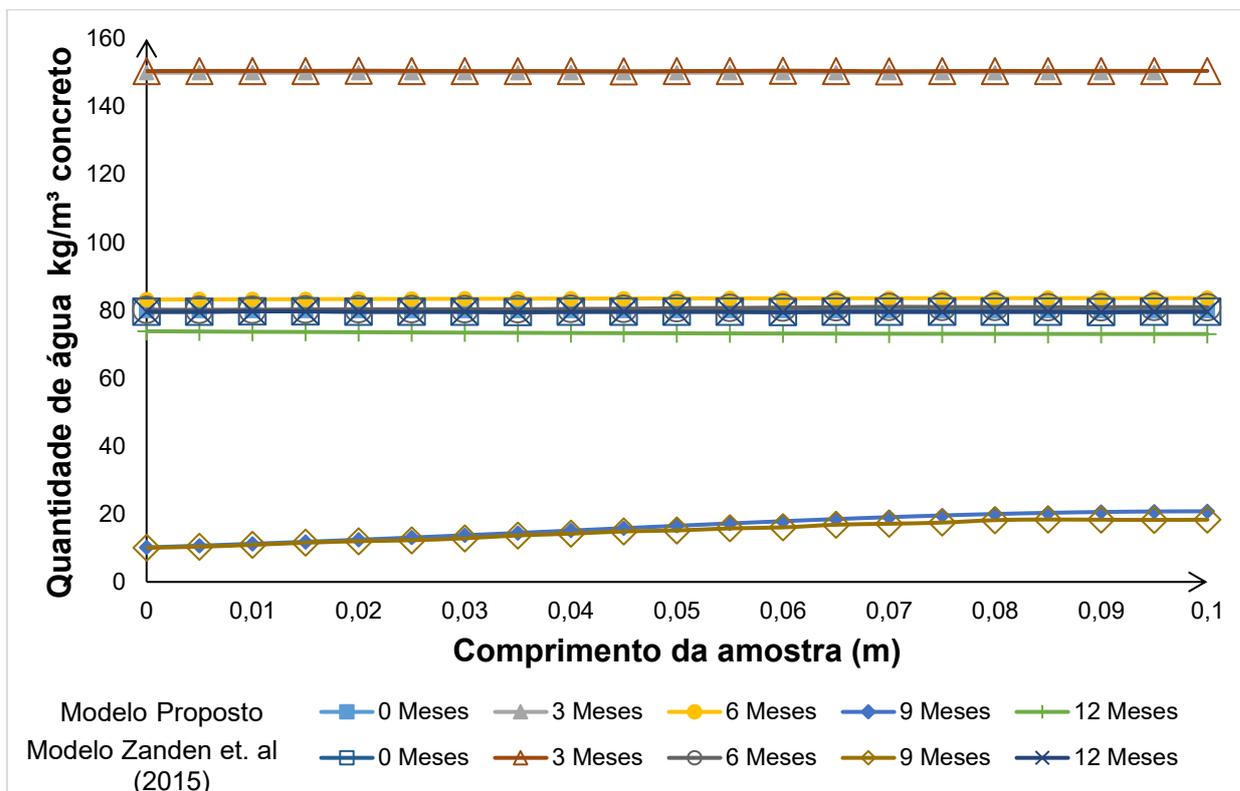
**Figura 9- Condições iniciais dos testes comparativos**



**Fonte: Autoria própria**

Para os casos apresentados aqui, a quantidade de água presente na amostra varia apenas de acordo com a Equação (43), isso porque 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 2 testes apresentados, o Gráfico 1 representa os perfis da quantidade de água na amostra para o modelo proposto e para o modelo de Zanden, Taher e Arends (2015).

Gráfico 1 –Quantidade de água no decorrer do tempo ao longo da amostra



Como observa-se, 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 tem-se o período mais úmido do ano. De forma análoga, o nono mês do ano representaria o 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.

O Gráfico 1 mostra que para os perfis do fluxo de água da amostra não existem diferenças significativas entre os dois modelos, sendo similares para o transporte de água. Os pequenos desvios podem ser atribuídos às aproximações que foram realizadas em ambos os modelos e a obtenção de dados realizada com o aplicativo *WebPlotDigitizer*, a partir da imagem dos gráficos do modelo de Zanden, Taher e Arends (2015).

Os testes descritos na Tabela 3, referem-se as situações aplicadas em cada uma das simulações realizadas para a verificação do modelo proposto.

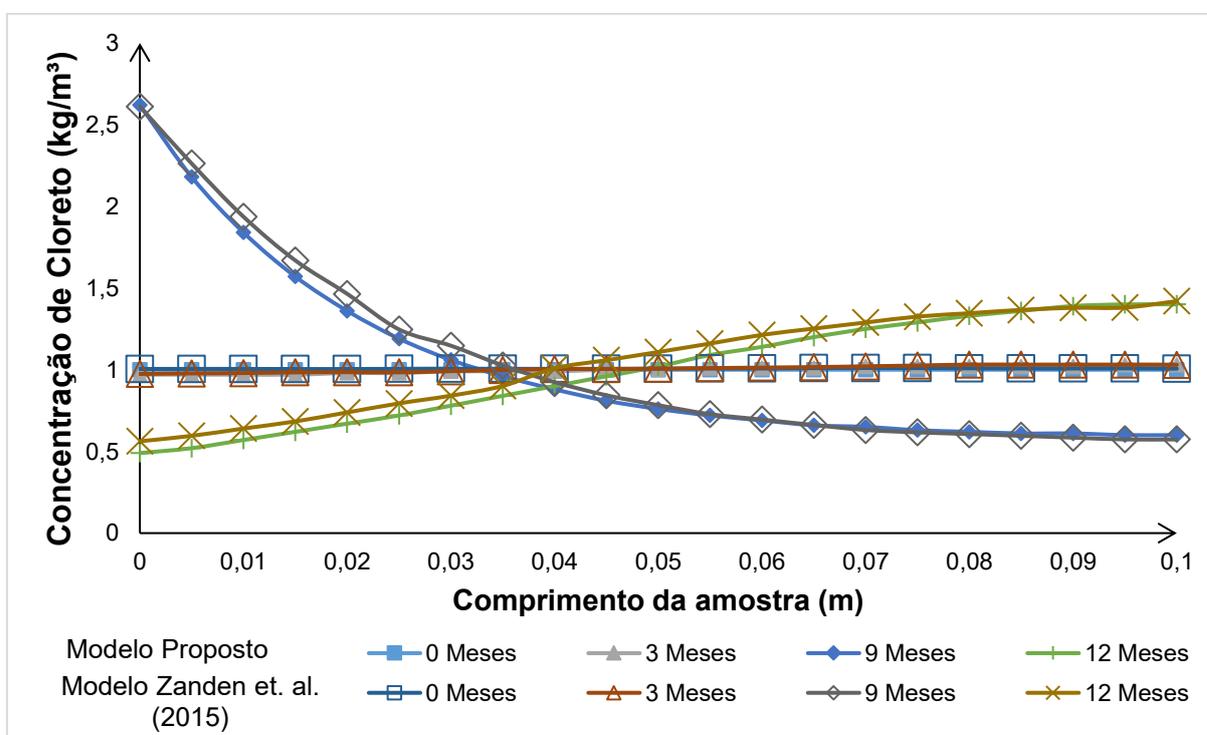
Tabela 3 – Testes realizados para a verificação do modelo proposto

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

Fonte: Zanden, Tahen e Arends (2015)

No primeiro teste, considerou-se que já existe uma certa quantidade de cloreto na amostra de concreto, cerca de 1 kg de sal por m<sup>3</sup> de concreto, na qual 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. O Gráfico 2 também mostra os resultados obtidos por meio do modelo proposto em comparação aos resultados de Zanden, Taher e Arends (2015).

Gráfico 2 - Avanço do Cloreto ao longo da amostra para Teste 1



Para o Teste 1, realiza-se uma correlação com a umidade de acordo com a época do ano, sendo possível observar que não há grande variação da concentração de cloreto no terceiro mês. Isto ocorre devido a quantidade de sal na amostra estar

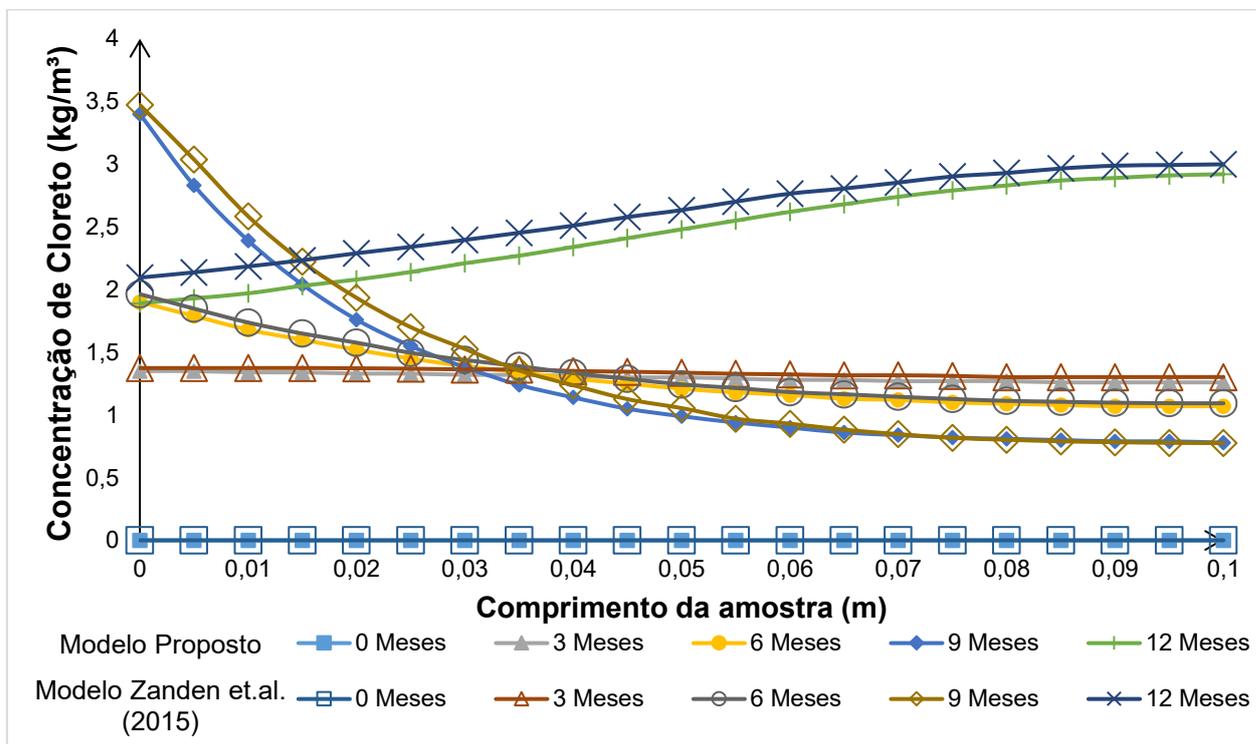
em equilíbrio, ou seja, cada nó apresenta a mesma quantidade de sal. Por mais que ocorra entrada de uma grande quantidade de água, isso não interfere na distribuição de sal entre os nós, pois há uma homogênea distribuição de água na amostra.

Do mês 3 ao mês 9, a umidade do ambiente vai diminuindo e há uma grande movimentação de íons cloreto para a superfície esquerda. Isso 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 mês 9 ao mês 12, a umidade volta crescer e, com isso, volta o fluxo de água para dentro da amostra, que por sua vez carrega o sal para em direção a superfície direita, devido ao desequilíbrio causado no sistema anteriormente, fazendo com que o mesmo tente voltar a estabilidade.

No Gráfico 2, o modelo proposto foi comparado ao de Zanden, Taher e Arends (2015) e outra vez pode-se verificar uma grande similaridade entre os resultados, os perfis de entrada e saída de sal ao longo da amostra apresentam o mesmo padrão.

O Teste 2 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 a Figuras 12 para o período de 1 ano.

Gráfico 3 - Avanço do Cloreto ao longo do da amostra para Teste 2



Pode-se observar no Gráfico 3 que existe um período de grande entrada de sal na amostra aos 3 meses. Nesse período há um grande aumento da umidade, ocasionando a entrada do sal junto com a água nos poros do concreto. Esse 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 a superfície esquerda parede, ocasionando picos de concentração no inverno, como ocorre no nono 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 ano (Mês 12). Nestes meses, grande parte do cloreto vai para a superfície a direita da amostra, antes com menor concentração de sal, na tentativa de colocar o sistema em equilíbrio.

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 comparações, os desvios observados são menores que 10% em comparação ao outro modelo e podem ser atribuídos a precisão numérica, ao passo de tempo utilizado, ao refinamento da malha, a quantidade de dias considerada para cada mês, 30 ou 31 dias ou também pela forma de obtenção dos dados da curva do

modelo comparado. Outros testes de verificação realizados podem ser obtidos em Marra (2019).

## 4.2 ANÁLISE DE MALHA

Primeiramente, antes de simular os estudos de casos que são apresentados na seção 4.3, realizou-se uma análise de sensibilidade de malha em relação ao tamanho e passo de tempo. O tempo simulado foi de 1 mês com passo de tempo de 60 segundos. As condições iniciais são: 88% de umidade relativa, 283,15 K e 0 Kg/m<sup>3</sup> de sal na amostra. O ambiente externo apresenta 88% de umidade e 303,15K com uma névoa salina de 1,52 Kg/m<sup>3</sup> e o ambiente interno apresenta as mesmas condições das iniciais. A Tabela 4 apresenta o plano de análise da malha computacional.

**Tabela 4 – Plano de análise para definição de número de nós da malha**

Nós	L	$\Delta x$	Tempo Computacional (s)
10	0,2	0,02	83,3
20	0,2	0,01	126,0
40	0,2	0,005	229,6
50	0,2	0,004	274,4

Fonte: Autoria própria

**Gráfico 4 – Convergência da concentração de sal a partir do número de nós**

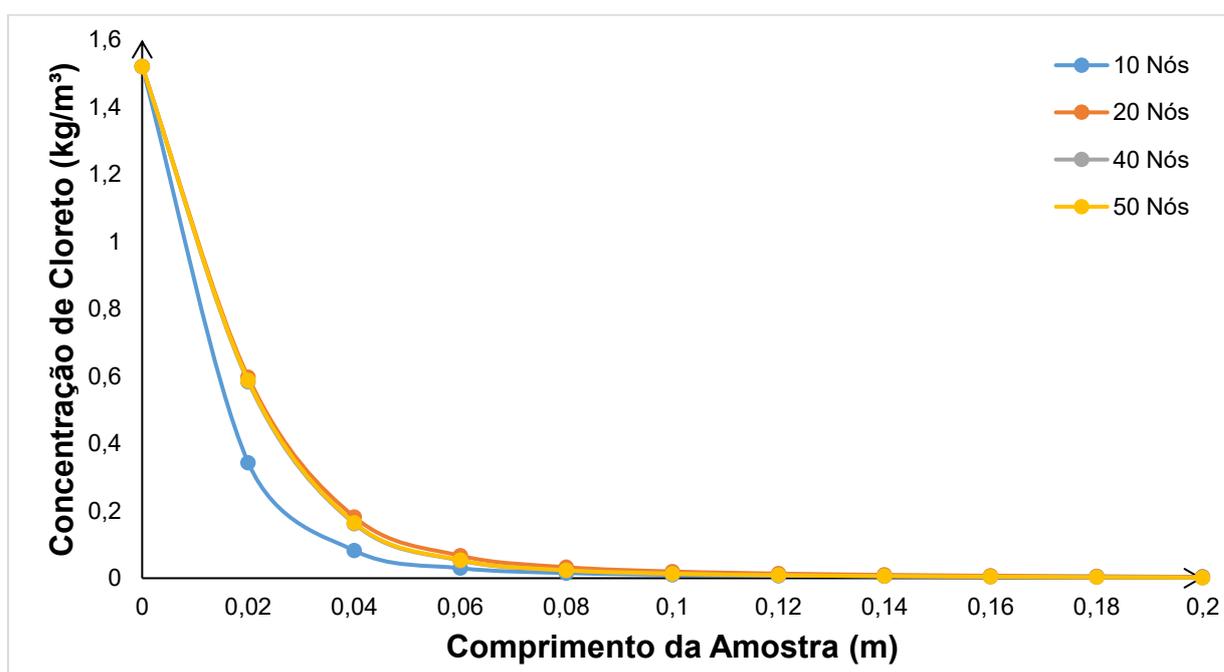


Gráfico 5 – Convergência da temperatura a partir do número de nós

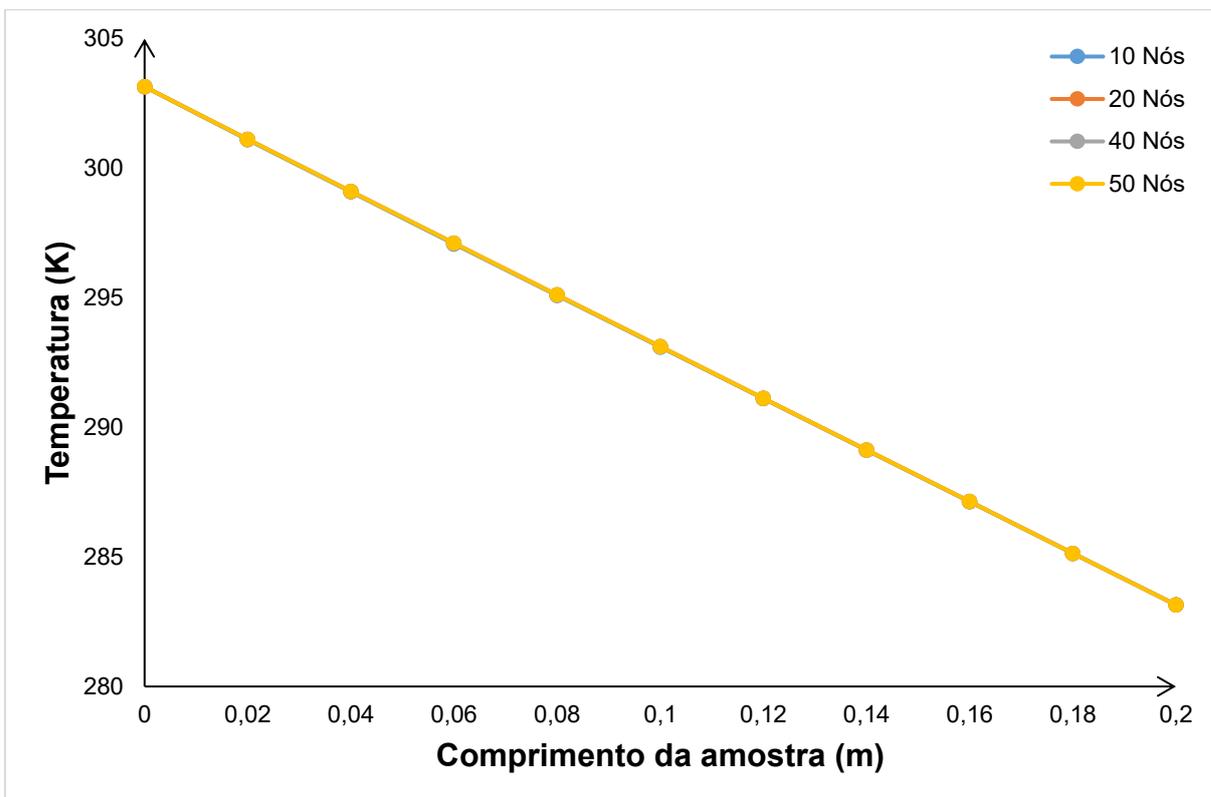
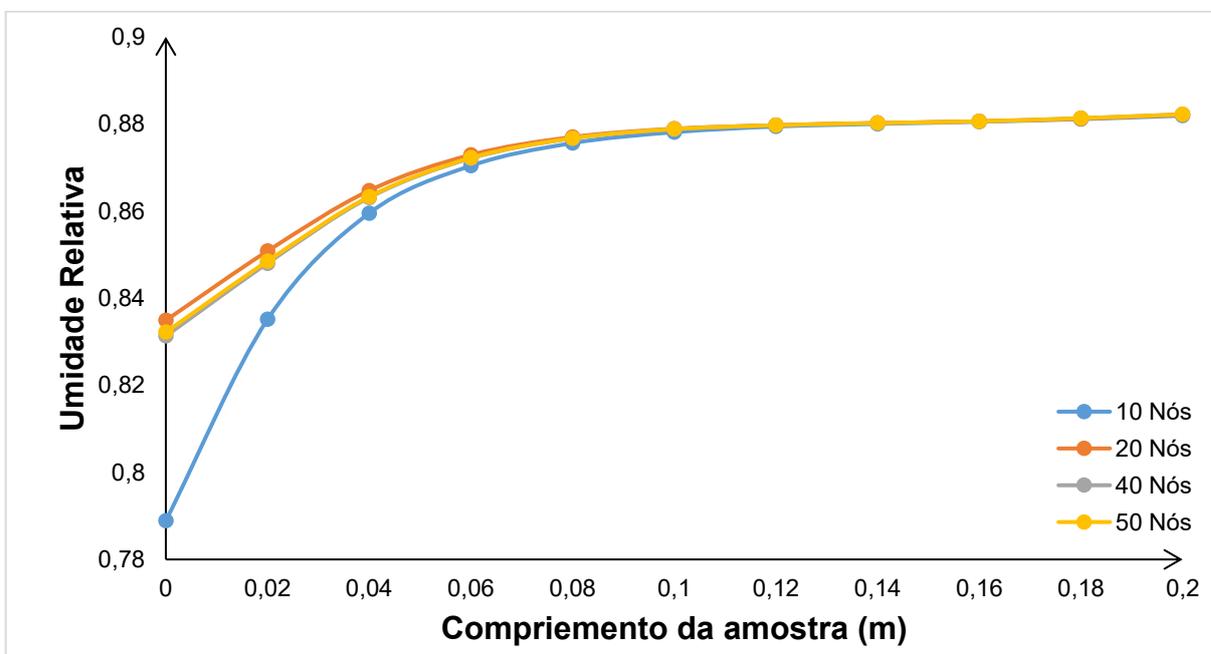


Gráfico 6 – Convergência da umidade relativa a partir do número de nós



Observa-se nos Gráficos 4, 5 e 6 que não há uma grande influência da quantidade de nós implementada sobre a temperatura. Em compensação para a umidade relativa e concentração de sal há diferença nos resultados quando há um

aumento no número de nós, os mesmos convergem à medida que o número de nós implementado na aumenta. A partir dos resultados apresentados pode-se concluir que o melhor número de nós para as condições de contorno deste estudo é de 20. Isso porque o tempo de resposta para a simulação com 20 nós é menor e o mesmo apresenta convergência aceitável para o problema, sendo a mesma muito próximo dos resultados para um maior número de nós.

Estabelecido o número de nós da malha computacional, realizou-se um estudo para verificar o melhor passo de tempo para ser utilizado nas simulações. Neste caso, foi utilizado 20 nós para a malha, com um período de simulação de 1 mês, como apresenta a Tabela 5.

**Tabela 5 – Plano de análise para definição do passo de tempo utilizado**

$\Delta t$	$\Delta x$	Tempo computacional(s)
<b>1</b>	0,01	<b>7161</b>
<b>5</b>	0,01	<b>1566</b>
<b>10</b>	0,01	<b>773</b>
<b>30</b>	0,01	<b>287</b>
<b>60</b>	0,01	<b>191</b>
<b>120</b>	0,01	<b>108,00</b>
<b>240</b>	0,01	<b>75,00</b>

**Fonte: A autoria própria**

Gráfico 7 – Convergência da concentração de sal a partir do passo de tempo

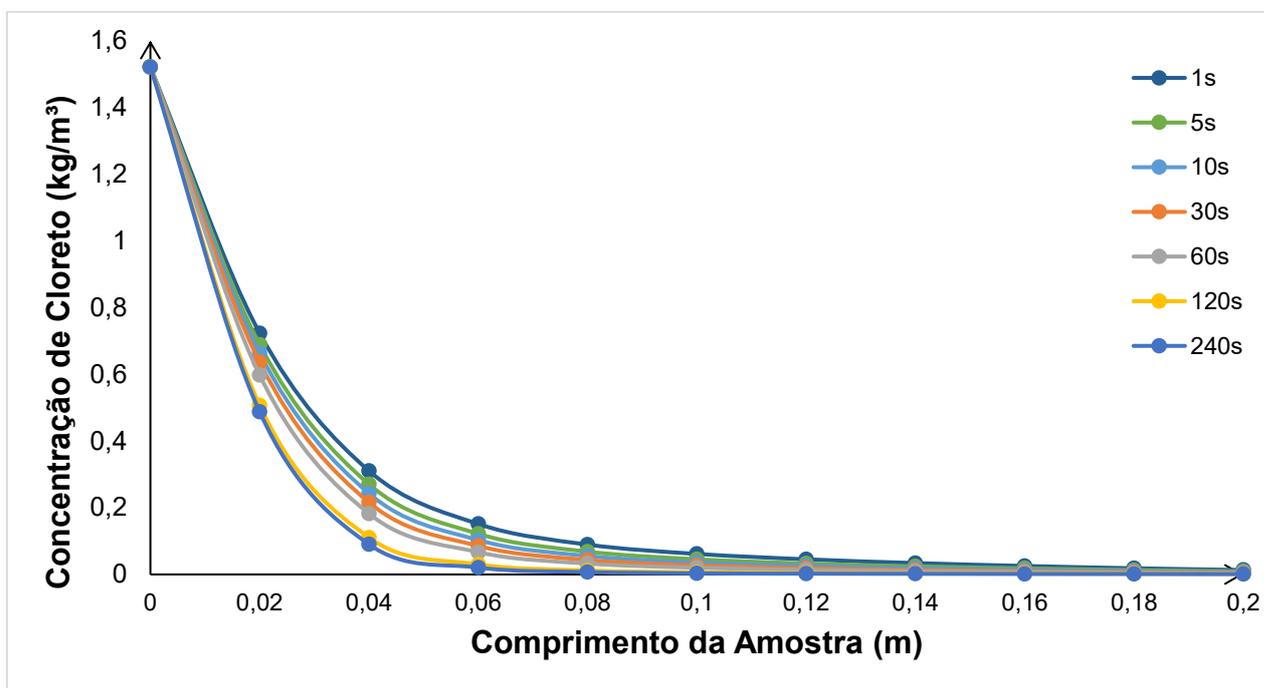
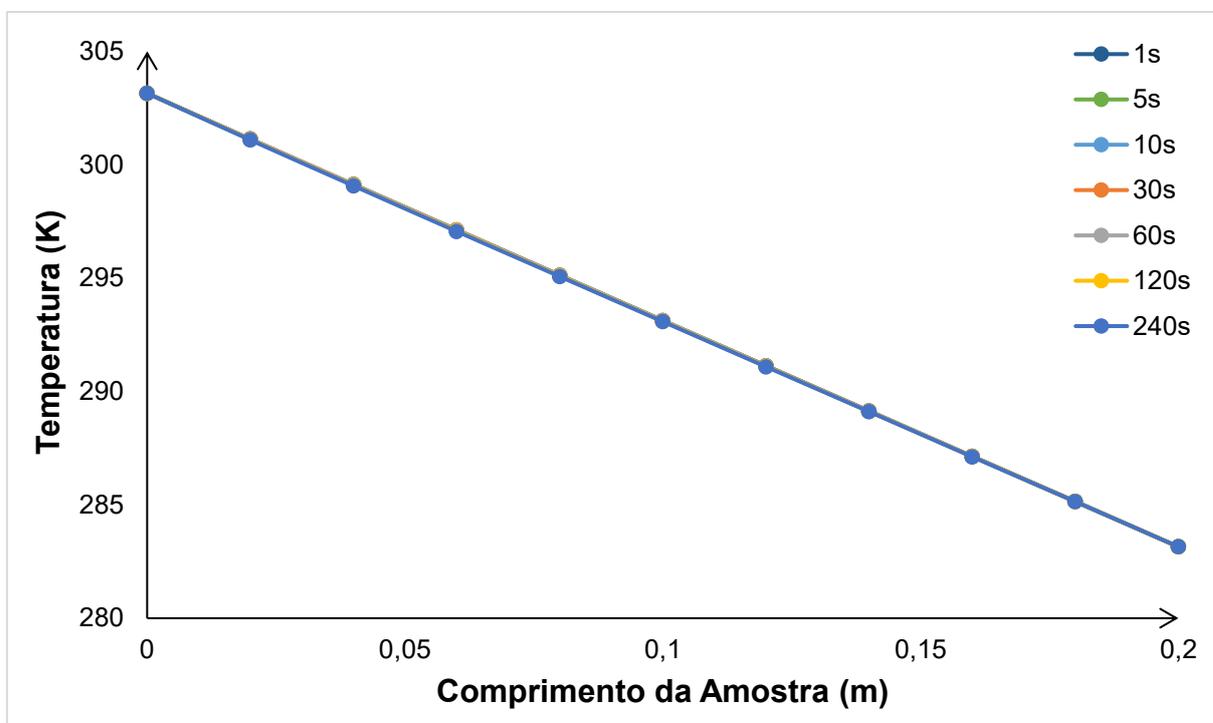
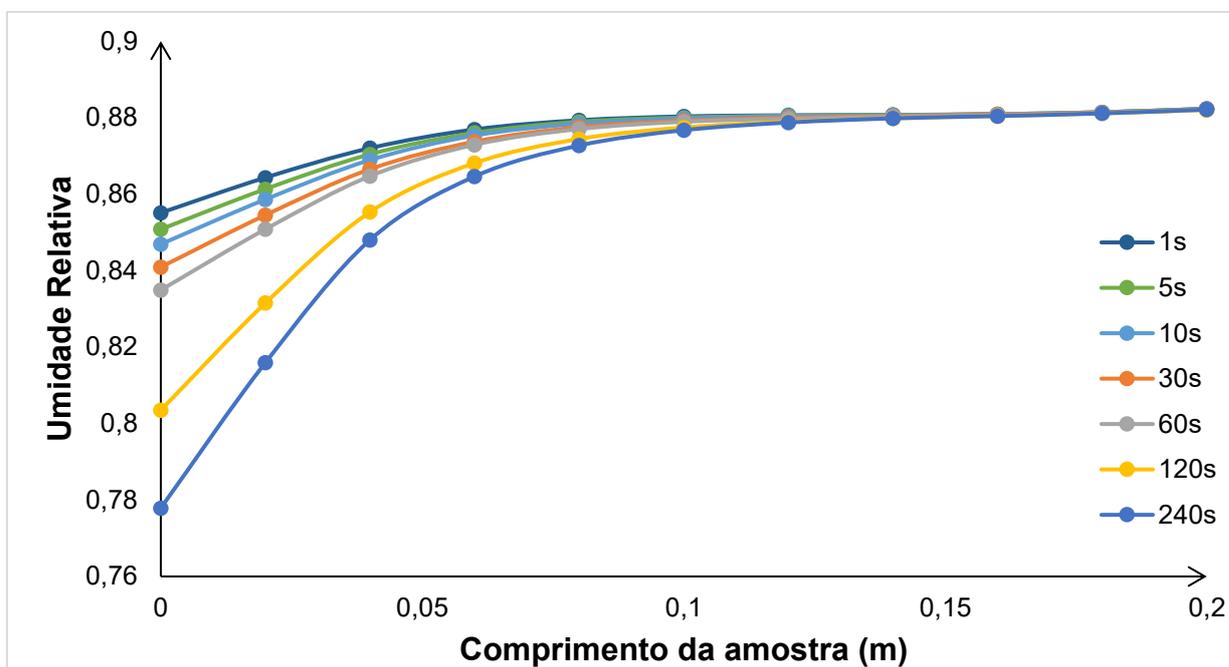


Gráfico 8 – Convergência da temperatura a partir do passo de tempo



**Gráfico 9 – Convergência da umidade relativa a partir do passo de tempo**



Os Gráficos 7, 8 e 9 apresentam os resultados obtidos para os diferentes passos de tempo simulados. Sendo assim, observa-se que o passo de tempo não interfere na temperatura, porém apresenta significativa sensibilidade em relação à umidade relativa e concentração de cloreto. De acordo com os resultados obtidos nas Figuras 7 e 9, o passo de tempo de 30 segundos apresentou boa convergência tanto para a umidade relativa quanto para a concentração de cloreto, como também em relação ao tempo computacional (287 s para um período total de 1 mês de simulação).

#### 4.3 COMPORTAMENTO DA DIFUSÃO DE DIFERENTES SAIS EM CONCRETO

Nesta seção apresentam-se os testes realizados para diferentes tipos de sais. Para isso utilizou-se o mesmo cenário apresentado na Seção 4.1 Figura 9, onde uma névoa salina atinge agora uma parede de concreto de espessura de 20 cm, com uma malha uniforme de 20 nós. Considerou-se o lado interno da parede adiabático e o lado externo em contato com o ambiente, apresentando uma temperatura de 25 °C e uma quantidade de umidade inicial ( $w_0$ ) de 80 kg/m<sup>3</sup>, variando de acordo com as estações

do ano, como mostrado na Equação (43) proposta por Zanden, Taher e Arends (2015). O passo de tempo utilizado foi de 30 segundos.

Para os testes implementados o comportamento da quantidade de água na amostra é o mesmo apresentado pelo Gráfico 1. Os sais escolhidos para esse teste são cloreto de sódio (NaCl), cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>), sulfato de magnésio (MgSO<sub>4</sub>) e sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>). Como visto na Seção 2.3.1, os sais de cloro e de sulfato apresentam elevada agressividade quando se trata da corrosão de estruturas de concreto. Portanto, buscou-se escolher os sais de cloro e sulfato com maior coeficiente de difusão que possuem íons na água do mar partir da Tabela 6 e Tabela 7.

**Tabela 6– Coeficientes de difusão de sais a 25°C**

SAIS	COEFICIENTE DE DIFUSÃO (m <sup>2</sup> /s. 10 <sup>-9</sup> )	SAIS	COEFICIENTE DE DIFUSÃO (m <sup>2</sup> /s. 10 <sup>-9</sup> )
LiCl	1,379	SrCl <sub>2</sub>	1,336
NaCl	1,612	BaCl <sub>2</sub>	1,386
KCl	1,996	Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,041
RbCl	2,057	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,230
MgCl <sub>2</sub>	1,251	MgSO <sub>4</sub>	0,849
CaCl <sub>2</sub>	1,336	ZnSO <sub>4</sub>	0,849
CASO <sub>4</sub>	0,905		

**Tabela 7– Composição da água do mar**

ÍONS PRESENTES NA ÁGUA DO MAR	PORCENTAGEM
Cl <sup>-</sup>	55,06%
Na <sup>+</sup>	30,68%
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,72%
Mg <sup>2+</sup>	3,65%
Ca <sup>2+</sup>	1,17%
K <sup>+</sup>	1,13%
OUTROS SAIS	0,59%

O teste foi realizado para uma amostra sem quantidade de sal inicial e atingida por uma névoa salina de 19 Kg/m<sup>3</sup> do respectivo sal, onde o fluxo de entrada é livre, mas não há fluxo de saída de sal, a temperatura foi considerada constante em 25°C. Os Gráficos 10, 11, 12 e 13 apresentam os resultados dos testes para o mês 3, 6, 9 e 12 de simulação.

Gráfico 10– Resultados do teste para diferentes sais no mês 3

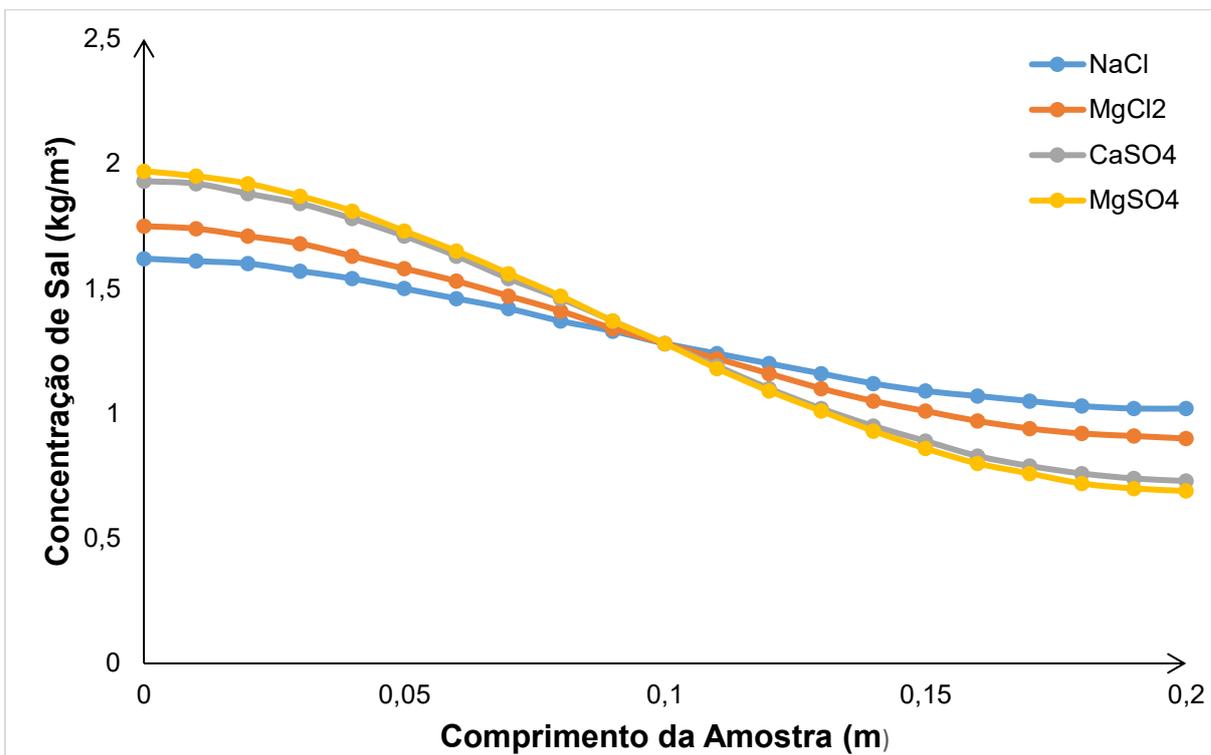


Gráfico 11– Resultados do teste para diferentes sais no mês 6

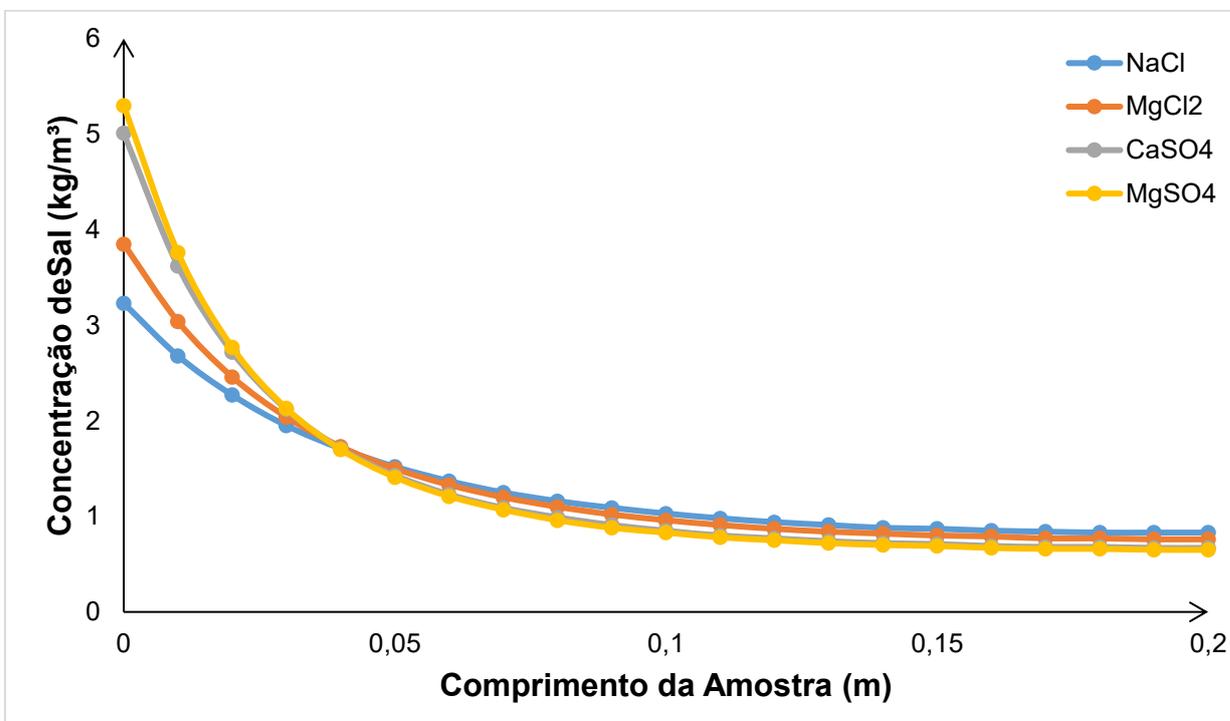


Gráfico 12– Resultados do teste para diferentes sais no mês 9

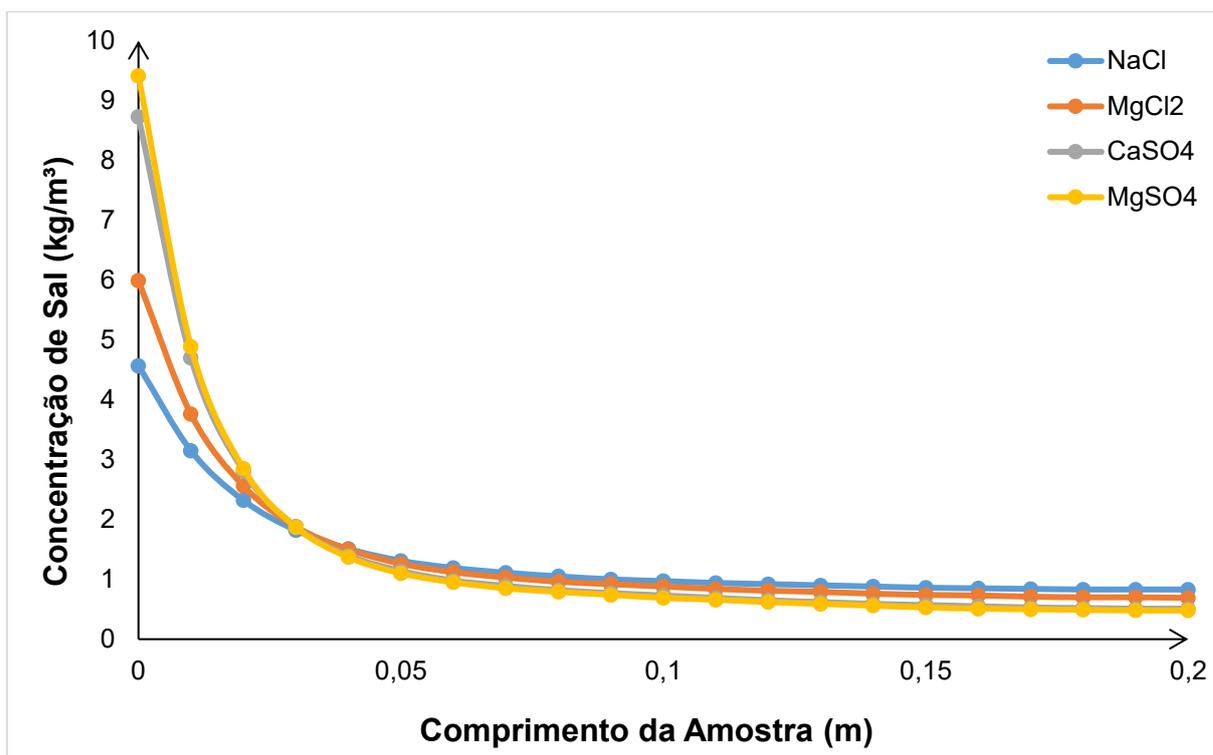
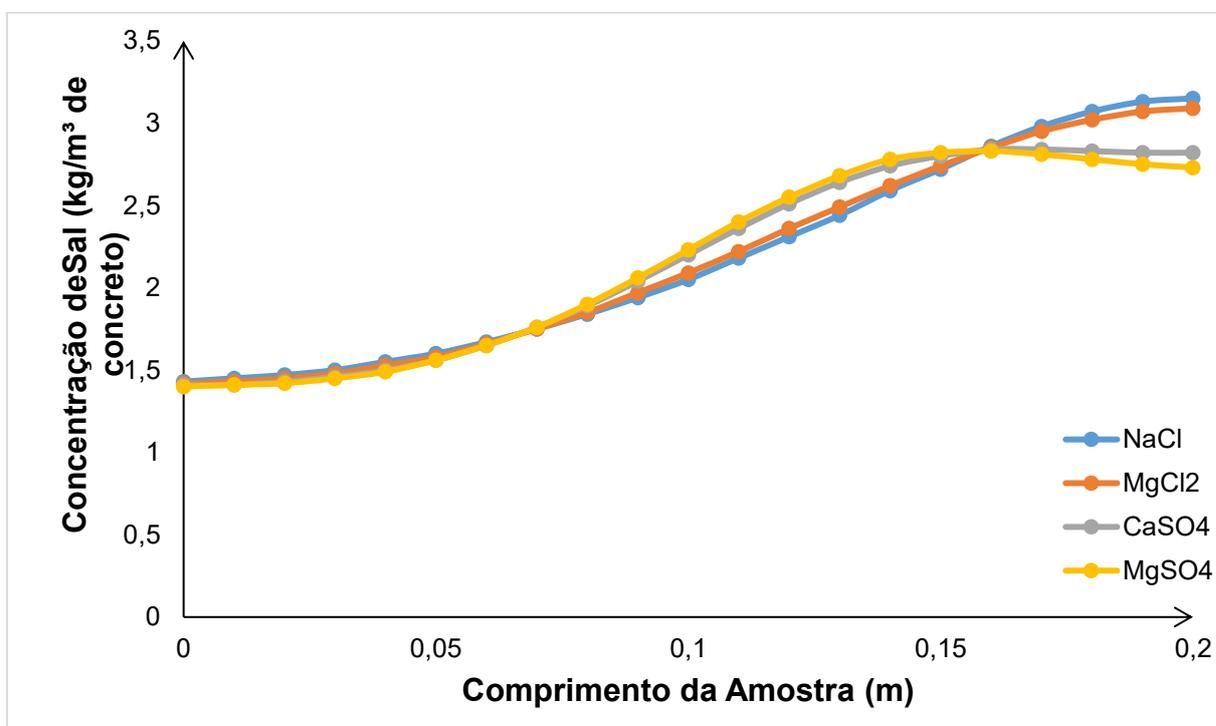


Gráfico 13– Resultados do teste para diferentes sais em 1 ano



A partir dos Gráficos 10, 11, 12 e 13 apresentadas observa-se que os sais de cloro apresentam comportamento similar aos de sulfato, devido à proximidade dos valores dos respectivos coeficientes de difusão. No Gráfico 10, período de 3 meses

de simulação, o cloreto de sódio e cloreto de magnésio apresentam curvas mais estáveis se comparados ao sulfato de cálcio e sulfato de magnésio. Este fato deve-se aos seus maiores coeficientes de difusão, nos quais estabelecem uma velocidade maior de espalhamento de seus íons pelos poros da amostra.

Os Gráficos 11 e 12, períodos de 6 e 9 meses de simulação respectivamente, apresentam a secagem da amostra, como a velocidade dos sais de sulfato é menor que dos sais de cloro, ocorre um acúmulo desses no início da amostra no período de embibição, causando um aumento maior da concentração de sal no período de perda de água, devido ao fluxo ocorrer para fora da amostra.

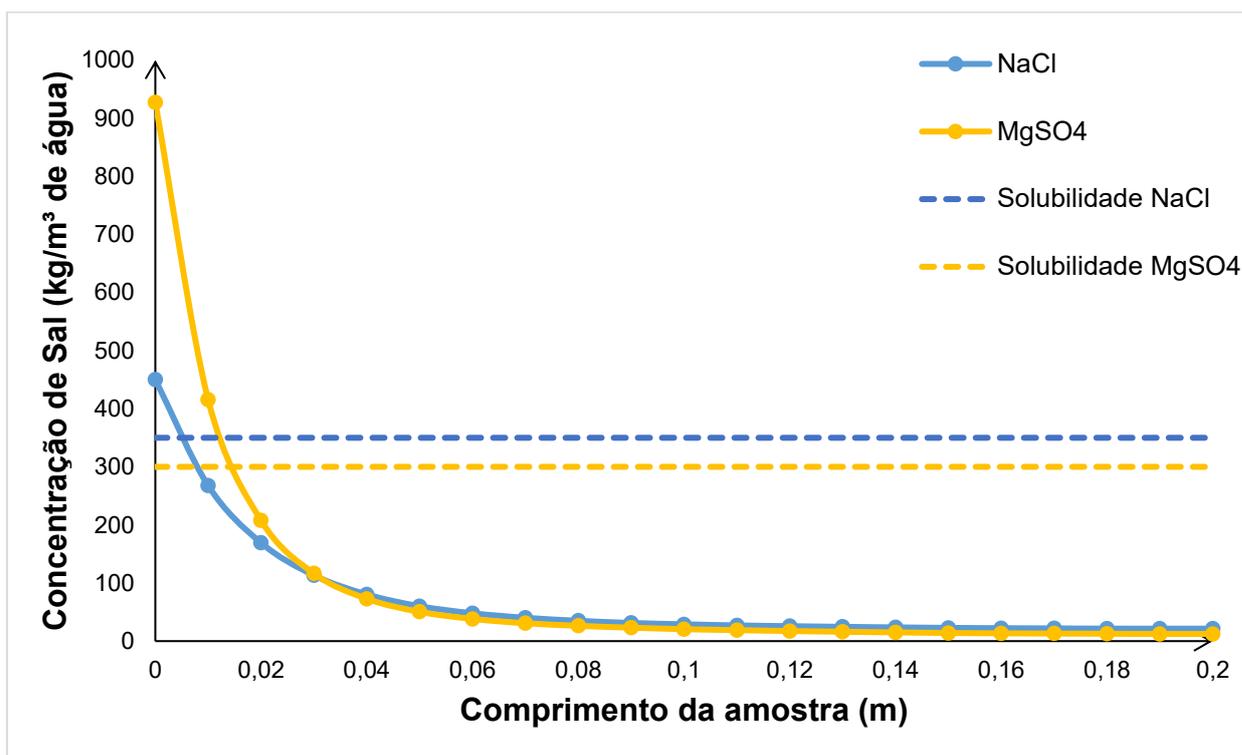
Ao final de um ano de simulação (Gráfico 13) percebe-se que os sais de cloro penetram de forma mais efetiva até os últimos nós da amostra, obtendo uma concentração maior. Portanto, a partir dos Gráficos 10, 11, 12 e 13 pode-se concluir que os sais de cloro se deslocam mais facilmente na amostra até a superfície interna, ou seja possuem maior mobilidade, sendo passíveis de causar maiores problemas na estrutura mais interna do concreto. Por outro lado, os sais de sulfato podem apresentar maiores corrosões superficiais e em períodos mais secos do ano. É importante ressaltar que todos esses sais podem causar danos as estruturas de concreto, dependendo de fatores como: concentração, umidade, temperatura, se reage ou não com a estrutura de contato, podendo desse modo, ser considerados mais ou menos nocivos a estrutura.

A análise do Gráfico 14 apresenta a avaliação da concentração de sal (em kg do sal /m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O) ao longo da amostra, para o nono mês. O objetivo de realizar essa simulação é avaliar a possibilidade de cristalização para uma situação crítica real, considerando que os íons inicialmente em solução permanecem no concreto após a secagem. Nesse caso, ocorre o acúmulo dos íons de sal na face externa da parede que com a perda de água pela vaporização, possibilita a formação de cristais de sal.

Desse modo, o Gráfico 14 mostra que a concentração dos sais é maior na face mais externa da parede. O limite de solubilidade para o cloreto de sódio e para o sulfato de magnésio a 25°C é de aproximadamente 360 kg/m<sup>3</sup> e 300 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, os quais são representados pelas linhas pontilhadas. Nota-se que há a possibilidade de formação de cristais já no nono mês para ambos os sais, porém o cloreto de magnésio, por apresentar maior concentração na face externa e menor

coeficiente de solubilidade, cristaliza em maior quantidade. Portanto, é possível constatar a grande possibilidade de cristalização do sal ao longo do tempo, ocorrendo gradualmente em pontos mais internos da amostra e assim elevando a chance de deterioração devido ao aumento da pressão interna.

**Gráfico 14– Concentração dos sais em água para 9 meses de simulação**



#### 4.4 EFEITOS DOS GRADIENTES DE TEMPERATURA NO TRANSPORTE DE UMIDADE E SAL

Estas simulações foram realizadas considerando uma parede de concreto com espessura de 20 cm, uma malha uniforme com 20 volumes e um período de simulação de 6 meses e 1 ano. Adotou-se a superfície direita como interna, enquanto a superfície esquerda foi considerada exposta ao ambiente externo. A névoa salina que atinge a parede, composta por íons cloreto (Cl<sup>-</sup>), possui um coeficiente de difusão em água de  $1,26 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  a 20° C, o qual varia de acordo com a temperatura. O domínio analisado é o mesmo apresentado na Figura 9.

Os três primeiros testes executados foram isotérmicos com a face interna da parede sendo adiabática e impermeável, ou seja, a mesma não permite fluxo de calor,

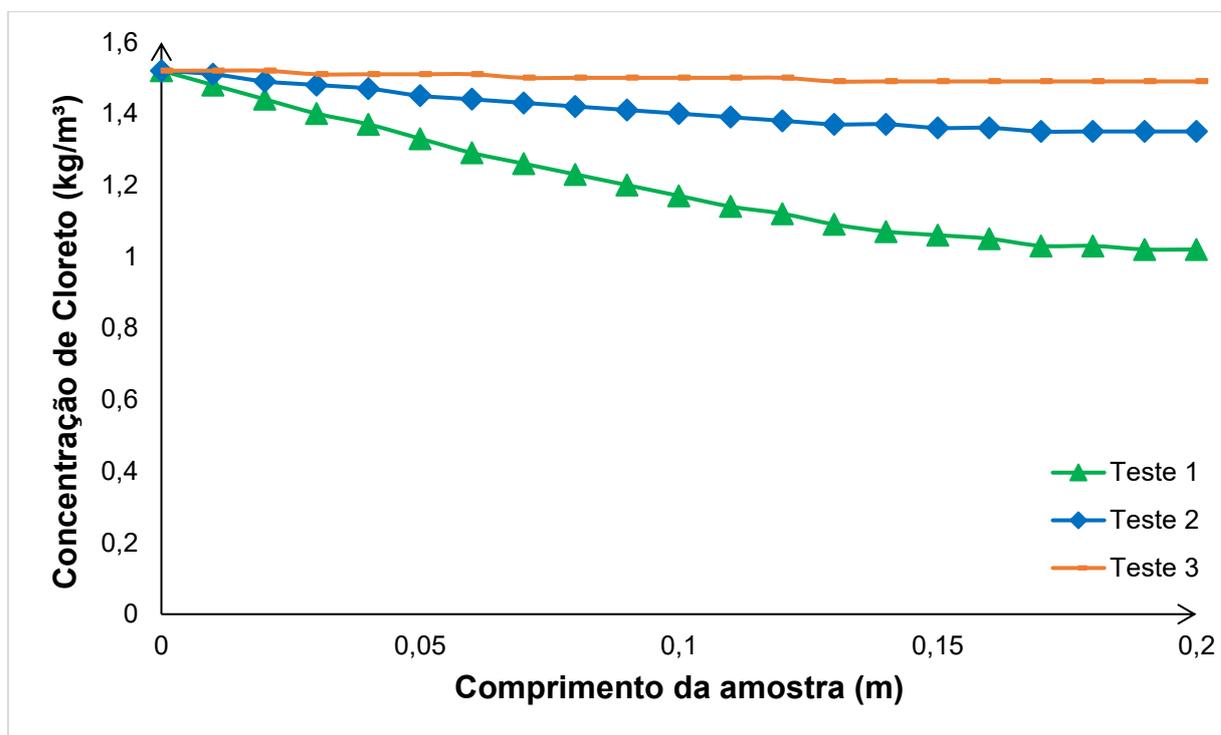
sal e água por seus poros. No início dos testes, a umidade relativa adotada foi de 88% na amostra a qual não havia presença de sal em seu interior. A temperatura inicial foi a mesma da temperatura uniforme, apresentadas na Tabela 8 junto com as condições dos testes realizados:

**Tabela 8– Condições dos testes isotérmicos executados**

Teste	Temperatura uniforme (K)	Umidade relativa na face externa (%)	Concentração da névoa salina na face externa (kg/m <sup>3</sup> )
1	283	88	1,52
2	293	88	1,52
3	303	88	1,52

O Gráfico 15 apresenta os resultados obtidos para concentração de sal ao longo de cada amostra, para os Testes 1, 2 e 3, após um período de 6 meses.

**Gráfico 15– Resultados obtidos para a concentração de cloreto ao longo da amostra para os Testes 1, 2 e 3**



Pode-se observar que o Teste 1, o qual apresenta uma temperatura de 283 K, apresenta um gradiente de concentração de sal maior entre as duas superfícies, quando comparado aos outros testes. Isto ocorre devido a sua temperatura ser mais baixa, o que dificulta a difusão do sal, impedindo que ele se propague rapidamente

pela amostra. Em temperaturas mais altas, com coeficientes de difusão maiores, a propagação ocorre de forma mais veloz, como mostra o Teste 3.

Os demais testes realizados foram em condições não isotérmicas, com ambas as faces da parede impermeáveis à água e com temperaturas diferentes. Considerou-se uma umidade relativa inicial de 88%, temperatura inicial de 283 K e adotou-se que não há presença de sal no interior da amostra. Ressalta-se que durante esses testes não há possibilidade de entrada de sal por convecção (entrada sal carregado pela água). As condições desses testes são apresentadas na Tabela 9.

**Tabela 9- Condições dos testes não isotérmicos executados**

Teste	Temperatura da face externa da parede (K)	Temperatura face interna da parede (K)	Umidade relativa na face externa (%)	Concentração da névoa salina na face externa (kg/m <sup>3</sup> )
4	293	283	88	1,52
5	298	283	88	1,52
6	303	283	88	1,52

Os resultados dos Testes 4, 5 e 6 em relação a distribuição da concentração de sal e de umidade, onde considerou-se a variação da temperatura na parede externa, estão representados nos Gráficos 16 e 17, respectivamente.

**Gráfico 16– Resultados dos testes 4, 5 e 6 para a Concentração de Cloreto ao longo da amostra**

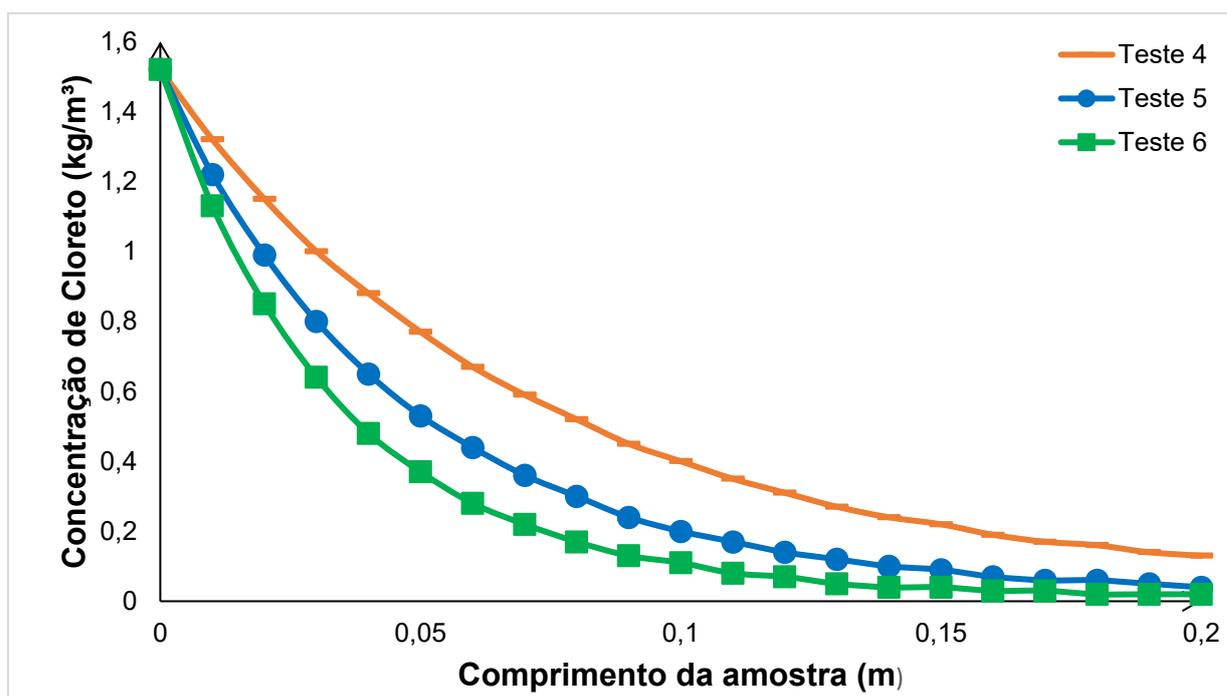
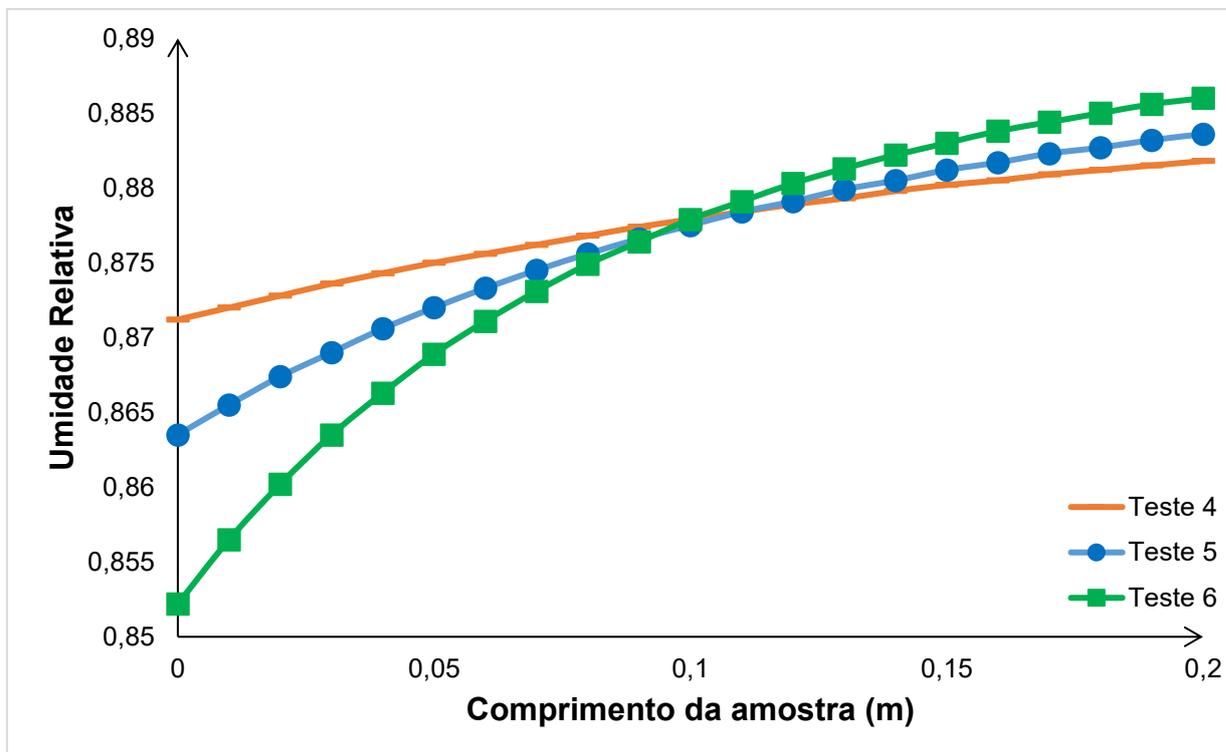


Gráfico 17– Resultados dos testes 4, 5 e 6 para a umidade ao longo da amostra



O Gráfico 16 mostra os resultados dos Testes 4, 5 e 6 para a concentração de cloreto ao longo da amostra. Percebe-se que quando a temperatura da superfície esquerda (externa) é maior, o gradiente de concentração de cloreto também é maior ao longo da amostra. Isso pode ser explicado pela velocidade de difusão do sal que é maior em temperaturas mais altas e pelo comportamento da água. No Teste 4 (Gráfico 17), ocorre uma secagem da face esquerda (redução da umidade), fazendo com que a água presente na amostra fique maior na superfície interna, o que gera uma redução na concentração de sal na superfície direita da amostra, como verificado no Gráfico 16.

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

## 5 CONCLUSÃO

Considerando que o concreto seja o material mais utilizado no mundo para a construção civil, a sua corrosão pode trazer grandes prejuízos econômicos e ambientais. Existem diversas formas para a degradação do concreto, desde estresses mecânicos até a ação de sais. Todos esses processos, sejam eles físicos, químicos, biológicos ou mecânicos, desgastam e reduzem o tempo de vida da estrutura. Um dos grandes causadores de degradação do concreto está na ação dos íons de sais. Os íons de sal dissolvidos na umidade da névoa marítima, penetram no concreto podendo chegar até sua armadura, começando um processo de corrosão. Por outro lado, com o decorrer do tempo, estes íons também podem cristalizar-se em alguns pontos, causando fissuras.

Desse modo, o presente trabalho busca analisar a ocorrência do transporte de sal dentro das estruturas de concreto, bem como os efeitos causados por gradientes de temperatura e umidade. Inicialmente, apresentou-se um modelo matemático para descrever os transportes de calor, umidade e sal em um meio poroso como o concreto. Posteriormente, as equações governantes foram discretizadas utilizando o Método dos Volumes Finitos, o que gerou um sistema de equações algébricas. Com o objetivo de resolver estas equações de forma simultânea, aumentando assim a robustez na obtenção da solução numérica, aplicou-se o MTDMA. Na sequência, realizaram-se algumas comparações considerando diferentes condições de contorno, como apresentado por Zanden, Taher e Arends (2015). A verificação do modelo apresentou satisfatória similaridade nos resultados apesar de suas diferenças de modelagem e discretização. O modelo de Zanden, Taher e Arends(2015) foi discretizado por meio do método de Crank-Nicolson e implementado no *aplicativo* MATLAB. Essa forma de solução requer grande esforço computacional, levando em consideração problemas multidimensionais e o período de simulação, o que foi reduzido a partir da aplicação do MTDMA. Por meio dos testes de comparação pode-se constatar nos processos de imbibição e secagem, a influência do transporte de umidade no deslocamento do sal dentro do meio poroso.

Foram realizados testes para avaliação do comportamento de diferentes tipos de sais em estruturas de concreto, para isso, definiram-se quais sais seriam utilizados

com base em seu coeficiente de difusão e sua presença na água do mar. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que os sais de cloro têm uma difusão mais rápida que os sais sulfato, portanto os mesmos apresentam uma maior tendência a causarem problemas voltados para os últimos nós da amostra, incluindo a armadura a qual é facilmente corroída por sais de cloro. Já os sais de sulfato por serem mais lentos podem ter maior propensão em causar danos superficiais na amostra, a partir da sua cristalização em períodos mais secos, ou devido a reações com a estrutura de concreto. Sendo assim, todos os sais apresentados podem causar danos as estruturas, sendo eles de maior ou menor gravidade dependendo das condições do ambiente e sua reatividade com a estrutura.

Finalmente outras simulações foram também realizadas com o objetivo de analisar o comportamento do transporte de sal e umidade causado por gradientes de temperatura. Os resultados apresentados permitem concluir que pequenas diferenças de temperatura causam significativo impacto no transporte de sal e umidade. Sua difusão é mais rápida em locais mais quentes com um aumento da concentração de sal, devido a redução da quantidade de água.

Portanto, este trabalho apresentou grande potencial para analisar diversas condições de contorno, podendo, ser incrementado para considerar o efeito da cristalização nas equações governantes, permitindo o acompanhamento de suas fases (nucleação, crescimento e dissolução). Apesar das simplificações impostas é possível prever a formação e o tempo que leva para a cristalização ocorrer. Sendo assim o modelo proposto mostrou sua capacidade de representar situações cada vez mais próximas da realidade, sendo capaz de fornecer informações importantes para a prevenção dos processos de corrosão e deterioração do concreto.

Embora não abordado neste trabalho, destaca-se que o processo de cristalização que ocorre a partir do transporte de sal para o interior poroso do concreto é um dos grandes causadores de deterioração em concreto. Sendo assim, para trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de um modelo para a análise da nucleação do sal. Sugere-se também a avaliação do transporte de sal a partir da tortuosidade do concreto e do coeficiente de mobilidade do íon.

## 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: 5<sup>th</sup> 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-1**: Concreto autodesável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projetos de estruturas de concreto- Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais- Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM67**: Concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- BOTELHO, M. H. C. **Concreto Armado Eu te Amo para Arquitetos**. 2. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2005.171 p. *Ebook*
- CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais : uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. ISBN 9788521631033.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica Dos Solos e Suas Aplicações**. 6ªed. v.1. Rio de Janeiro: LTC,1996.
- CASTELLAZZI. G; COLLA. C; MIRANDA. S; FORMICA. G; GABRIELLI. E; MOLARI. L; UBERTINI. F. A coupled multiphase model for hygrothermal analysis of masonry structures and prediction of stress induced by salt crystallization. **Elsevier Journal: Construction and Building Materials**. [s.l]. v.41, p.717-731, 2013. *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

CEB. 2. ed.v.2. São Paulo: Editora LMS, 1983.

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.

CHUNQIU, L.; KEFEI.C; CHEN, Z. Numrical Analysis of Moisture Influential Depth in Concrete During Drying-Wetting Cycles. **Tsinghua Science and Technology**. [s.l.]. v.13, p. 696–701,2008. ISSN: 1007-0214.

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

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.

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.

ESPINOSA. R. M; FRANKE, L; DECKELMANN. G. Model for the mechanical stress due to the salt crystallization in porous materials. **Elsevier Journal: Construction and Building Materials**. [s.l.]. v. 22, p. 1350-1367, 2008.

SILVA FILHO, L.C.P. **Durabilidade Do Concreto À Ação De Sulfatos: Análise Do Efeito Da Permeação Da Água E Da Adição De Microssilica**. Dissertação (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul,1994.

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

GONÇALVES, D.B. **Ensaio de Capilaridade**. Geomorfologia Aplicada. Universidade Federal de Uberlândia. 2012. Disponível em: <http://www.lages.ig.ufu.br/Capilaridade>. Acessado em: 20/10/2020.

HELENE, P. **A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a Vida Útil das Estruturas de Concreto**. São Paulo: Ibracon. 2014. 43p.

HELENE, P.R.L. Introdução a Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto. **Ambiente Construído**. São Paulo. v.1. n.2. p. 45-57, 1997. *Ebook*

INCROPERA, F. P; DEWITT, D.P; BERGMAN. T.L; LAVINE. A.S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ªed. Rio de Janeiro: LTC,2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) .2019 **Global status report for building and construction**. ISBN: 978-92-807-3768-4. 2019. Disponível em: [www.iea.org](http://www.iea.org).

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). **Recommendations for the characterization of porous solids**. v. 66. n. 8. p. 1739-1758. 1994

SOUZA JUNIOR, T.F. **Tecnologia e Qualidade do Material Concreto em Construções Agroindustriais**. 2004. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Agrícola- Construções Rurais e Ambiência). Universidade Federal de Lavras. Lavras, Minas Gerais, 2004.

KAEFER, L.F.A **Evolução do Concreto Armado**. São Paulo.1998

LOFRANO. F.C. **Escoamento em Meios Porosos: Modelo Analítico não darciano baseado no Princípio da Entropia Máxima**. Tese (Doutorado em Ciências) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

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.

PEDROSO, L.F. Concreto: as origens e evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **CONCRETO & CONSTRUÇÕES**. São Paulo: IBRACON, 2009-. ISSN 1809-7197. Trimestral. Ano XXXVII, N°53, p.14, 2009.

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 Restoration 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](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.

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.

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](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.

SANTOS, L. M. dos. **Cálculo de concreto armado:** segundo a nova NB-1 e o

SCODELER, M., LIMA, C., COSTA, S., SARKIS, M., SANTOS, A., TORRES, A. Praia do Futuro é a dona do título de lugar com a maresia mais forte do Brasil. **Fantástico.** Fortaleza, 2018. Disponível em: <http://g1.globo.com/fantastico/noticia/2018/01/praias-do-futuro-e-dona-do-titulo-de-lugar-com-maresia-mais-forte-do-brasil.html>. Acesso em : 20 de setembro de 2019.

SOUZA, K. N. **Estudo Experimental E Probabilístico Da Vida Útil De Estruturas De Concreto Armado Situadas Em Ambiente Marítimo: Influência Do Grau De Saturação Do Concreto Sobre A Difusividade De Cloretos.** 2005. Dissertação (Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2005.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de concreto.** [s. l.]: Editora Globo S.A., 1984

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*