



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**FELIPE MATEUS OLIVEIRA DA COSTA**

**TALES HENRIQUE ALMEIDA VAZ PEREIRA ROCHA**

**MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO  
DE CLORETOS EM CONCRETO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA  
LITERATURA**

**BELÉM-PA**

**2023**

**FELIPE MATEUS OLIVEIRA DA COSTA**

**TALES HENRIQUE ALMEIDA VAZ PEREIRA ROCHA**

**MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO  
DE CLORETOS EM CONCRETO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA  
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Engenharia Civil do Instituto  
de Tecnologia da Universidade Federal do  
Pará, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil

**Orientadora: Mariana Domingues Von  
Paumgarten**

**BELÉM-PA**

**2023**

**FELIPE MATEUS OLIVEIRA DA COSTA**

**TALES HENRIQUE ALMEIDA VAZ PEREIRA ROCHA**

**MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO  
DE CLORETOS EM CONCRETO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA  
LITERATURA**

Belém, 23 de agosto de 2023

Prof.a. Mariana Domingues Von Paumgarten  
Dra. pela UFPA  
Orientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof.a. Mariana Domingues Von Paumgarten (UFPA)**  
Dra. pela UFPA

**Prof. Felipe José Losada Reis (UFPA)**  
Dr. pela UFPA

**Prof. Felipe de Sá Moreira (UFPA)**  
Dr. pela UFPA

CONCEITO FINAL: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Aos familiares, Márcia Ferreira, Patrícia do Socorro, Gabriel Oliveira, Maria Lúcia, Fernanda Isabelle e Paulo André pela força e incentivo à árdua caminhada da graduação.

Aos amigos Bianca do Vale, Camila Pina, Deivison, Elber Amorim, Fernando Sammuel, Gabriel Carvalho, Ítalo Cunha, Jayne Benmuyal, João Henrique, Keven Bryan, Lívia Monise, Maria Clara, Nívia Lisboa e Sandro Matheus, por tornarem a jornada mais leve. Aos professores Nívea Albuquerque, Manoel Sena, Tony Carlos, e Renato das Neves pelas valiosas lições e ensinamentos.

Em especial, agradecemos a Profa. Dra. Mariana Domingues Von Paumgarten por aceitar o desafio de com sucesso nos orientar.

# MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Felipe Mateus Oliveira da Costa(1); Tales Henrique Almeida Vaz Pereira Rocha (2)

(1) UFPA (2) UFPA

## RESUMO

O ataque de cloretos se configura como uma das principais ameaças à integridade das estruturas de concreto armado. Dessa forma, é fundamental o entendimento acerca dos mecanismos de ação desse fenômeno. Contudo, a normatização vigente ainda carece de ferramentas necessárias para a plena caracterização da penetração de íons de cloretos em corpos de concreto, tornando, assim, essencial a busca de um referencial teórico que auxilie no melhor entendimento da causa de manifestações patológicas, tais como a corrosão. Portanto, este trabalho concentrou-se em estabelecer uma revisão sistemática acerca dos métodos matemáticos para avaliação da infiltração de cloretos em concreto, buscando as principais abordagens teóricas e tecnologias empregadas no que se refere à difusão iônica. Dessa maneira, após a finalização do processo da RSL, foram encontrados diversos trabalhos aderentes ao tema, apresentando variadas perspectivas com este enfoque, desde aproximações puramente numéricas e analítica, a aplicação de inteligência artificial, demonstrando tendência da informatização dos mecanismos de modelagem para descrição do processo.

*Palavras-chave:* cloretos, concreto, infiltração.

## **ABSTRACT**

Chloride attack is one of the main threats to the integrity of reinforced concrete structures. Therefore, understanding the mechanisms of action of this phenomenon is essential. However, current regulations still lack the necessary tools to fully characterize the penetration of chloride ions in concrete bodies, thus making it essential to search for a theoretical framework that helps to better understand the cause of pathological manifestations, such as corrosion. So this work focused on establishing a systematic review of mathematical methods for evaluating chloride infiltration in concrete, seeking the main new theoretical approaches and technologies employed with regard to ionic diffusion. Thereby, after the conclusion of the RSL process, several works related to the theme were found, presenting different perspectives with this focus, from purely numerical and analytical approaches, to the application of artificial intelligence, demonstrating a trend towards the computerization of modeling mechanisms for process description.

*Keywords:* chloride, concrete, diffusion.

# 1 INTRODUÇÃO

O concreto, devido às suas propriedades que lhe conferem boa resistência à maioria dos esforços e excelente trabalhabilidade (CARVALHO e FILHO, 2021), bem como componentes facilmente encontrados na natureza e relativamente baratos (METHA & MONTEIRO, 2008), configura-se como o material de construção civil mais utilizado do mundo. Contudo, em seu uso estrutural, devido seu baixo desempenho frente aos esforços de tração - quando comparado aos de compressão - e pequena deformabilidade, leva o material a necessitar de outro material complementar: o aço (CARVALHO e FILHO, 2021).

A junção dos dois materiais origina o concreto armado, em que o concreto protege a armadura de aço dos agentes corrosivos externos ao concreto em elementos estruturais. As estruturas de concreto podem apresentar sinais patológicos durante a construção. Contudo, muitos fenômenos são difíceis de identificar sem o uso de equipamentos especializados, como microscópios e ensaios de Difusão de Raios-X (DRX), que mostram a estrutura interna dos componentes. Também, é necessário fazer uma análise de vários elementos para identificar o fenômeno que afeta a estrutura, determinar a extensão da penetração do agente nocivo e avaliar o nível de degradação para determinar o melhor tratamento e prolongar a vida útil da estrutura.

É fundamental entender a importância de proteger as estruturas contra patologias para garantir a estabilidade estrutural do concreto. As patologias do concreto são essenciais para um entendimento completo dos erros conceituais e executivos que ocorrem ao longo do processo produtivo de construção, de acordo com Souza e Ripper (2008). A ação dos íons cloreto é o fenômeno mais preocupante neste caso dentre todos os agentes nocivos que podem afetar o concreto armado.

Mesmo em infiltrações mínimas, os íons cloreto podem corroer e causar danos significativos à armadura interna da estrutura, como afirma Helene (2004) que constatou o crescimento de ocorrências de patologia relacionadas à corrosão de armaduras, ligado tanto a problemas de execução quando ao uso inadequado de materiais e erros de planejamento. Esses íons podem penetrar no concreto e atingir a armadura de aço, causando processos corrosivos que prejudicam a integridade e a durabilidade da estrutura. A diminuição da capacidade de carga, fissuras, deslocamentos e até mesmo colapso estrutural são todos os efeitos possíveis da

corrosão da armadura. Portanto, a vida útil e a segurança das estruturas de concreto armado são altamente afetadas pela ação dos íons cloreto.

Diversos pesquisadores têm trabalhado para encontrar o coeficiente de difusão dos íons cloreto, bem como o tempo de ação e a evolução desses íons dentro do volume do concreto. O método de migração acelerada, desenvolvido pelo professor Medeiros (2012) nesse contexto, permite a determinação deste coeficiente em poucas horas.

Apesar disso, deve-se observar que a norma ASTM C 1202 (2018) é a única instrução atual para parametrizar esse fenômeno. Porém essa norma não permite calcular diretamente o coeficiente de difusão, se utilizando apenas de parâmetros indiretos para cálculo da entrada de íons, como a resistência elétrica e sem considerar outros fatores que influenciam neste índice como a temperatura ou a umidade. Essa falta de um método definitivo para estudar os íons cloreto no concreto continua sendo um problema aberto.

Diante desse contexto, o objetivo do presente trabalho é compreender os principais métodos de quantificação desse fenômeno, e através de uma Revisão Sistemática da Literatura catalogar e analisar os modelos desenvolvidos pela comunidade científica.

## **2 MÉTODO**

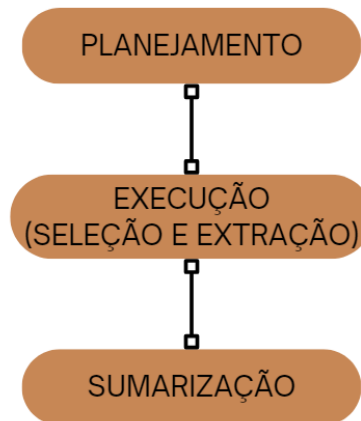
### **2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

De acordo com Galvão e Pereira (2014), revisões sistemáticas se configuram como estudos secundários, tendo nos estudos primários sua fonte de dados, diferenciando-se das demais revisões por apresentar caráter imparcial e reproduzível.

Dessa forma, o presente trabalho se caracteriza como uma revisão sistemática da literatura acerca das metodologias matemáticas para avaliação da infiltração de cloretos em concreto, utilizando o software StArt para a organização, filtragem e seleção de material.

No programa, as etapas podem ser resumidas como no exposto no fluxograma explícito na Figura 01, compreendendo as fases: de planejamento, em que o protocolo da pesquisa é confeccionado; execução, fase em que os critérios de seleção são aplicados bem como a fase de extração de material pertinente à pesquisa; e, por fim, a sumarização dos dados encontrados.

**Figura 01:** Etapas do processo de RSL no software StArt.



**Fonte:** Autores.

Os procedimentos encontram-se melhor demonstrados abaixo:

### 2.1.1 Questões da Pesquisa

A pesquisa se orienta pela seguinte pergunta: “ Quais são os principais métodos matemáticos empregados para avaliação da penetração de cloretos em concreto?”.

### 2.1.2 Processo de Busca

A partir de uma busca exploratória sobre o assunto na base de dados Scopus, retirou-se os resumos dos 5 primeiros artigos que tinham conexão com a questão da pesquisa. Assim, a partir dos resumos obtidos, com o recurso da nuvem de palavras, elencou-se os termos com maior número de repetições: “chloride” com 19 ocorrências; “concrete” com 16; “diffusion” e “mortar” com 5 e “corrosion”; “expression”; “infiltration” e “method” com 4, a partir desses termos, foi realizada uma busca por sinônimos para construção de uma string abrangente e consistente, para as pesquisas principais do trabalho.

Partindo dos termos achados, realiza-se a confecção da string de pesquisa com auxílios de operadores booleanos: (method or equation)and(infiltration or seepage or diffusion or penetration or transport )and( chloride )and( concrete ). Em seguida, utiliza-se a string criada para o processo de pesquisa nas bases de dados Scopus, Web of Science, Science Direct e Scielo, que retornam a quantidade de artigos explícita na Tabela 01:

**Tabela 01:** Resultados por Base de Dados

Base	Número de Resultados
Scopus	1187
Science Direct	60
Scielo	0
Web Of Science	1128

**Fonte:** Autores

### 2.1.3 Critérios de Inclusão e Exclusão de Material

Na fase de execução da pesquisa, em seleção, aplicam-se os critérios definidos para a filtragem do material, sendo esses listados na Tabela 02

**Tabela 02:** Critérios de inclusão e exclusão de material

INCLUSÃO	EXCLUSÃO
1- Contextualizado na construção civil	1- Artigos de Revisão Sistemática
2- Não ser Revisão Sistemática	2 - Trabalhos com menos de 3 páginas
3 - Trabalhos com até 10 anos de publicação	3 - Trabalhos sem resumo ou abstract disponíveis
4 - Trabalhos que tratam de metodologias matemáticas utilizadas para avaliação da infiltração de cloretos em concreto	4 - Trabalho não disponível totalmente na base buscada
5 - Trabalhos com 3 páginas ou mais	5 - Não tratar de Metodologias Matemáticas para Avaliação da Infiltração de Cloretos em Concreto

**Fonte:** Autores

Aos trabalhos que atenderem a todos os critérios de inclusão e não aderirem a nenhum de exclusão, é feita a extração de material para a confecção desta RSL.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A string de pesquisa retornou 2375 artigos, passando 238 pela fase de seleção, resultando em 55 artigos que tiveram adesão ao tema proposto, sendo 25 com origem na base “Web of Science” e 30 na base “Scopus”.

A origem cronológica dos trabalhos encontrados se comportaram como disposto no gráfico da Figura 02

**Figura 02:** Quantidade de artigos por ano.



Fonte: Autores.

Dos trabalhos encontrados, a grande maioria utilizou as leis de Fick como base de cálculo, e puderam ser divididos de acordo com a abordagem adotada, como exposto no decorrer deste capítulo.

#### 3.1 LEI DE FICK:

A priori, grande parte dos métodos apresentados nos trabalhos encontrados utilizam por base a segunda Lei de Fick como base para formulação de suas ramificações em situações específicas de cálculo, portanto para melhor explanação de cada uma dos resultados encontrado ao findar-se o processo revisional é fundamental ter o entendimento deste conceito.

Como é evidenciado por Callister (2014), a segunda lei de Fick estuda os casos em que existe variação no no fluxo difusional e no gradiente de concentração de acordo com o tempo, provocando assim acúmulo ou esgotamento do que estiver sendo difundido. Ademais é válido ressaltar que as formulações matemáticas deste postulado são aplicadas para as condições de regime não estacionário caracterizado pelas seguintes condições:

1. Antes da difusão, todos os átomos do soluto em difusão que estiverem no sólido estão distribuídos de maneira uniforme, com uma concentração  $C_0$ ;
2. O valor de  $x$  na superfície é zero e aumenta com a distância para o interior do sólido;
3. O tempo zero é tomado como o instante imediatamente anterior ao início do processo de difusão.

O modelo de não difusão estacionária, que nos estudos analisados os átomos de gás são substituídos pelos íons de cloreto que atravessam o concreto sob diferentes condições de contorno.

**Figura 03:** Formulação matemática da Segunda Lei de Fick.

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

**Fonte:** Callister (2014).

## 3.2 AMOSTRAGENS E MODELOS

Os artigos encontrados apresentaram diversas formas de extração dos dados relativos aos corpos de prova concreto. Às amostras físicas, dos trabalhos que optaram por essa abordagem, a maioria utilizou o método de ensaio NT Build 492, RCM (Rapid Chloride Migration), bem como a amostragem prevista. Outras utilizadas foram: GB/T50082-2009 (HAN et al., 2023) e (WANG *et al.*, 2023), C1202 (ASTM 2010) (AASHTO T277) (RYAN *et al.*, 2014), ASTM C1556 (SZWEDA et al., 2023), e JGJ52-2006 (YANG; et al, 2023)

Entretanto, dos 55 estudos retomados, 32 optaram por modelos computacionais para a avaliação da infiltração de cloretos, havendo trabalhos com procedimentos em meso-escala,

micro-escala e multiescala. Dentre as metodologias computacionais utilizadas se encontram autômatos celulares em 3 dimensões, de Ma e Lin (2022), programas como COMSOL Multiphysics 5.3a, baseado na metodologia de elementos finitos, apresentado por Jin, Yu, Wang, Wang e Fan (2022), ou métodos numéricos com representação polar de agregados como Jiang, Qian, Gu, Zhu, Long e Xing (2022), modelo Pluri Gaussiano para descrições de campo (RICKETTS et al, 2023), havendo também a aplicação de inteligência artificial como nos trabalhos de Taffese e Espinosa-Leal (2022) e Wan, Zheng e Wang (2023) por meio de redes neurais, etc.

Do mesmo modo, alguns trabalhos demonstraram os métodos de descrição dos agregados e distribuição, seja utilizando o método de Monte Carlo para disposição espacial de agregados e método de distribuição de Fuller para determinação de dimensões, como visto nos trabalhos de Li e Song (2022), e Sun, Xie, Zhou e Zhou (2022); ou outras abordagens estocásticas.

### 3.3 TIPOLOGIA DOS TRABALHOS

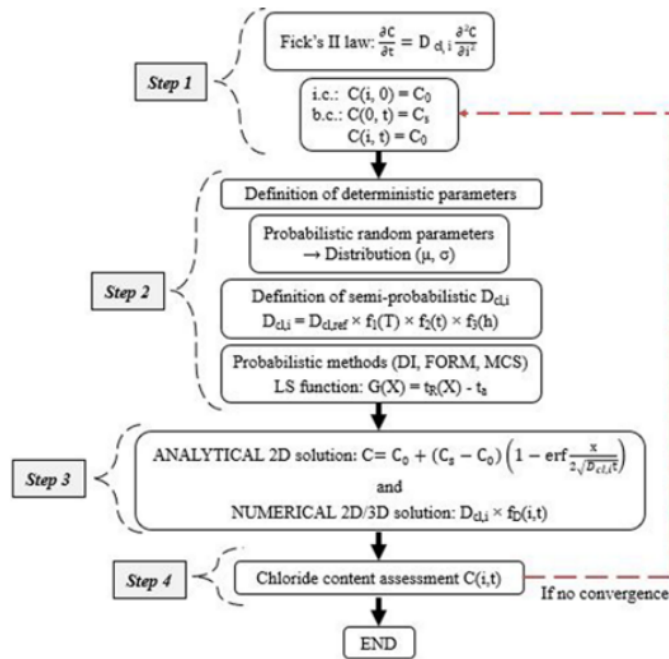
Com o universo de trabalhos definido, foi necessário definir quais formas de abordagem fenômenos possuíam semelhanças o suficiente para agrupá-los e catalogá-los de maneira coerente. Portanto, foram definidos dois grupos entre os artigos selecionados, sendo estes separados por sua modelagem do fenômeno, sendo elas:

- Abordagens numéricas;
- Abordagens analíticas;

#### 3.3.1 - Abordagem numérica:

Os trabalhos inseridos neste grupo são caracterizados principalmente por estabelecerem uma forte relação com ensaios e simulações de situações específicas, exemplos disso são a simulação de ciclos de umedecimento e secagem das amostras ou ciclos de ensaios para simulação da correnteza para estruturas totalmente submersas. Uma vez que estas condições foram estabelecidas, os autores desenvolveram modelos baseados na segunda lei de Fick para comparação com os resultados experimentais obtidos após o término de cada período de ensaios, assim como forma de validação do modelo desenvolvido.

**Figura 04:** Infográfico para formulação de abordagens numéricas.



Fonte: Zacchei e Nogueira (2021).

Também é válido ressaltar que muitos destes trabalhos focaram suas análises na compreensão de parâmetros randômicos a que convencionalmente não se dá atenção, sendo os principais o fator de forma do agregado ou a disposição destes dentro das peças moldadas para os ensaios, sendo assim necessária a compreensão do processo de difusional em mais de uma dimensão. O enfoque dado estes fatores foi inserido matematicamente a formulação padrão da segunda lei de Fick, como no exemplo abaixo, na pesquisa de Wu, Tian Jin *et al* (2020):

**Figura 05:** Modelo para compreensão de difusão em duas dimensões.

$$C(x, y, t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{Dt}}\right) \right]$$

Fonte: Wu, Tian Jin *et al* (2020).

Ademais, é importante ressaltar que os trabalhos analisados buscaram simular situações reais de carregamento dessas estruturas estudando principalmente os efeitos que as microfissuras geradas pelos vários esforços que suportados durante a utilização padrão das edificações causaram no processo de difusão dos íons de cloreto dentro destas peças. Como mostra o estudo conduzido por Wang (2014), que considera um sistema de treliças para explicação dos

poros internos do concreto e utilizando fatores chaves para entender as relações de escoamento desenvolveu as seguintes formulações para entender como este fenômeno se comporta a uma estrutura submetida a flexão:

**Figura 06:** Modelagem interna do tipo treliça de uma microestrutura de concreto.

$$\left(\frac{1}{2}K + \frac{1}{\Delta t}P\right)G(t + \Delta t) = \left(-\frac{1}{2}K + \frac{1}{\Delta t}P\right)G(t) - F$$

**Fonte:** Wang (2014).

Também é destacado aqui o estudo realizado na coreia do sul para a experimentação e correlação da difusão dos íons de cloreto com fatores como a porosidade e o teor de umidade, sendo o modelo desenvolvido utilizado para fazer previsões de até 100 anos de exposição cíclica da estrutura a diferentes períodos de molhagem e secagem, sendo englobados fatores como a saturação de poros a temperatura e a umidade relativa, como é possível ver na equação abaixo:

**Figura 07:** Definição do coeficiente de difusão, correlacionando com parâmetros externos

$$Dh = \left(Kl \frac{pwRT}{M_{wh}} + KvPo\right) \frac{\partial h}{\partial w}$$

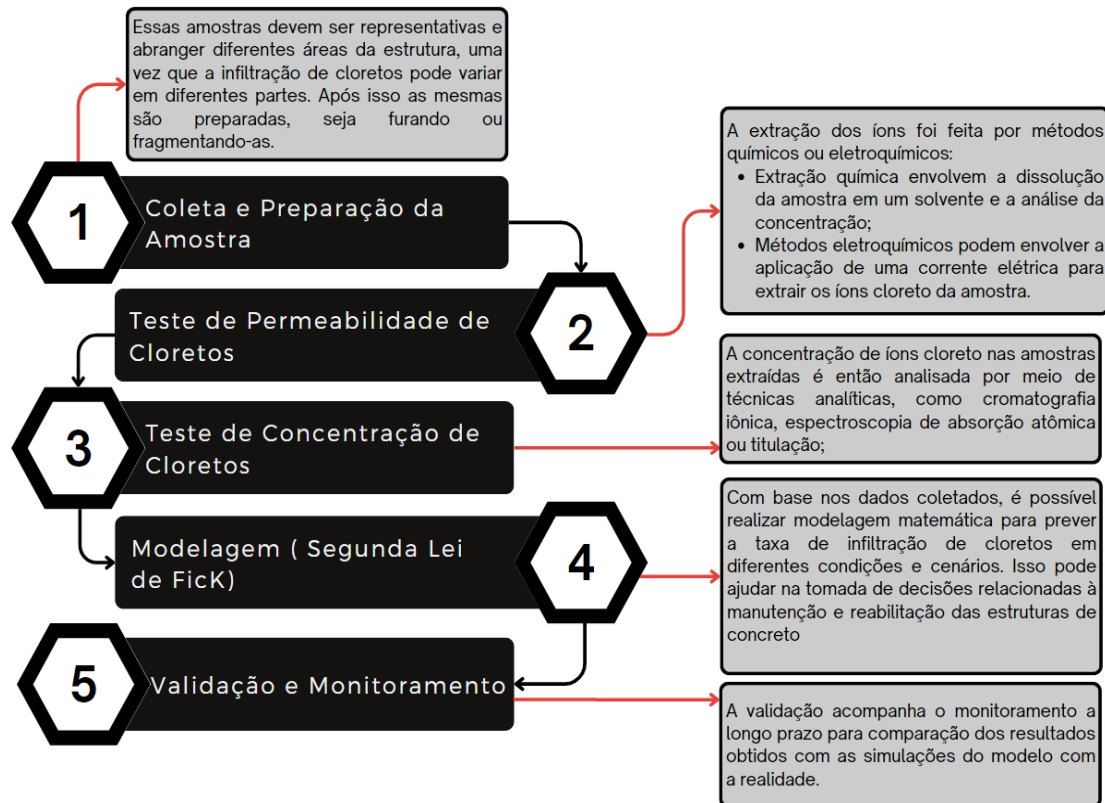
**Fonte:** Lee *et al* (2022).

Dentre o número total de trabalhos selecionados para esta categoria foram aderidos a este um total de 29 trabalhos representando um percentual de 55% do total analisado no resultado da revisão sistemática.

### 3.3.2 - Abordagem analítica

A abordagem analítica para o estudo da infiltração de cloretos em estruturas de concreto envolveu a análise de amostras de concreto e a determinação da concentração de íons cloreto ao longo do tempo. A infiltração de cloretos é um processo que está diretamente ligada à corrosão das armaduras do concreto, comprometendo a integridade estrutural ao longo do tempo. As abordagens seguiram o seguinte roteiro de forma geral:

**Figura 08** Infográfico para explicação da abordagem analítica.

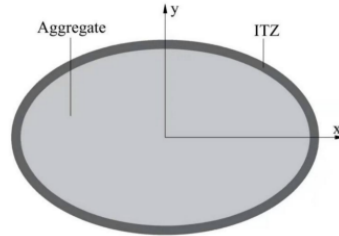


Fonte: Autores.

É interessante ressaltar que houveram algumas diferenças tecnológicas devido a algumas limitações ou para interesses específicos de cada foco de pesquisa, mas de forma geral foram seguidos os passos supracitados.

Destaca-se aqui o trabalho de Zhang *et al* (2021), com foco na simulação no efeito da forma do agregado que é simulada como elipse e a modelagem desenvolvida buscou aproximar a matriz consagradamente considerada trifásica, para efeitos de cálculos e considerações, para uma aproximação bifásica com base na mesoestrutura do concreto. Como exemplo do modelo construído na pesquisa.

**Figura 09:** Modelagem elíptica para simulação do agregado disposto no concreto

$$D_x = D_i + D_i \left[ \frac{(1 + \mu)A_a}{(1 + \mu)A_a + \mu A_i} \right]$$
$$D_y = D_i + D_i \left[ \frac{(1 + \mu)A_a}{(1 + \mu)A_a + A_i} \right]$$


Fonte: Zhang *et al* (2021).

Dentre o número total de trabalhos selecionados para esta categoria foram aderidos a este um total de 24 trabalhos representando um percentual aproximado de 45% do total analisado no resultado da revisão sistemática.

## 4 CONCLUSÃO

Com a finalização do processo de análise e sumarização dos trabalhos aderentes ao tema, foi evidenciado a importância do entendimento do processo de modelagem das peças estudadas, seja referente forma de suas microestruturas internas ou ao processo de difusão em si, pois diante dessas informações e pontos de visão foram iniciadas as considerações matemáticas e definição dos roteiros de ensaio necessários para validação e comprovação dos métodos sugeridos por cada pesquisador.

Ademais, é importante destacar que grande parte dos artigos avaliados buscaram novas formas para verificação do fenômeno de infiltração de cloretos sob diversas situações problema e buscando cada vez a simulação da realidade de funcionalidade de cada tipo de edificação, seja por métodos numéricos e analíticos tradicionais, ou informatizados-salientando a tendência do uso deste último. O fato supracitado foi verificado após a emissão dos relatório de pesquisa da plataforma StArt, com a análise dos trabalhos aderentes resultando em um percentual de aproximadamente 51% dos trabalhos buscando simular situações relacionadas à exposição do concreto à água ou relacionado a configurações de carregamento específicas, e 32 dos 55 trabalhos optarem por abordagens computacionais.

Ao estudar as diferentes formas de abordar o fenômeno da infiltração de cloretos, foram encontradas variados pontos de vista e modelos construídos pela comunidade acadêmica, todavia, em suas maioria buscam solucionar situações pontuais e condições específicas do processo difusional, sendo evidenciado a falta de uma formalização global e uma modelagem contundente para união das mais variadas ocasiões.

Por fim, é importante destacar que foram constatados avanços significativos em relação aos procedimentos sugeridos na normatização vigente e portanto é sugerida a atualização dos regulamentos normativos atuais e ainda a criação de novas normas visando a maior e melhor compreensão acerca do tema e seus ensaios.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. *et al.* Testing and modelling chloride penetration into concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 39, p. 9-18, fev. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.012>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

CALLISTER, William. “Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução”, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (2008), p. 178.

CARVALHO, Roberto; JASSON FILHO,. **Concreto Armado**: segundo a nbr 6118:2014. 4. ed. São Carlos: Edufscar, 2021. 415 p.

CHEN, Dingshi *et al.* A meso-stochastic research on the chloride transport in unsaturated concrete. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 273, p. 121986, mar. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121986>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

CHIDIAC, S.e.; SHAFIKHANI, M.. Phenomenological model for quantifying concrete chloride diffusion coefficient. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 224, p. 773-784, nov. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.006>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

FAN, Zhihong *et al.* Transfer Parameter Analysis of Chloride Ingress into Concrete Based on Long-Term Exposure Tests in China’s Coastal Region. **Materials**, [s.l.], v. 15, n. 23, p. 8517, 29 nov. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma15238517>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

FJENDBO, Simon *et al.* The square root method for chloride ingress prediction—Applicability and limitations. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 54, n. 2, p. 1-19, 4 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-021-01643-8>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

GALVÃO, Taís; PEREIRA, Mauricio. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, [s.l.], v. 23, n. 1, p. 183-184, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.5123/s1679-49742014000100018>. Disponível em: [http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1679-49742014000100018](http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742014000100018). Acesso em: 03 jul. 2023.

GUO, Li *et al.* Multi-scale peridynamic formulations for chloride diffusion in concrete. **Engineering Analysis With Boundary Elements**, [s.l.], v. 120, p. 107-117, nov. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.08.012>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

HAN, Yanxing *et al.* Chloride ion penetration resistance of matrix and interfacial transition zone of multi-walled carbon nanotube-reinforced concrete. **Journal Of Building Engineering**, [s.l.], v. 72, p. 106587, ago. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2023.106587>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

HELENE, Paulo R. L. **Envelhecimento das superfícies de concreto aparente e produtos de proteção**. São Paulo, SP. 1989. p.173-208. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, 9º, 1989, São Paulo.

HU, Yuquan *et al.* A time-variant model of chloride diffusion in prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) considering the effects of curing age. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 368, p. 130411, mar. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130411>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

JIANG, Zhi-Lu; QIAN, Zhi-Wei; GU, Xiang-Lin; ZHU, Ji-Hua; LONG, Wu-Jian; XING, Feng. Statistical analysis of chloride concentration distribution in concrete by a meso-scale model considering irregular shape aggregates. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 319, p. 126143, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126143>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

JIN, Libing *et al.* Developing a model for chloride transport through concrete considering the key factors. **Case Studies In Construction Materials**, [s.l.], v. 17, p. 01168, dez. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01168>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

JIN, Ling; YU, Hua Long; WANG, Zhen; WANG, Zhen Ping; FAN, Tai. Developing a model for chloride transport through concrete considering the key factors. **Case Studies In Construction Materials**, [s.l.], v. 17, p. 01168-01182, dez. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01168>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

KONEČNÝ, Petr *et al.* Comparison of procedures for the evaluation of time dependent concrete diffusion coefficient model. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 258, p. 119535, out. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119535>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

LAI, Ning *et al.* Service life of RC seawall under chloride invasion: a theoretical model incorporating convection-diffusion effect. **Ocean Engineering**, [s.l.], v. 279, p. 114590, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114590>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

LE, Tuan Duc *et al.* Probabilistic Modeling of Chloride Penetration with Respect to Concrete Heterogeneity and Epoxy-Coating on the Reinforcement. **Materials**, [s.l.], v. 12, n. 24, p. 4068, 6 dez. 2019. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma12244068>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

LEE, Jae-Min *et al.* Numerical Modeling of Chloride Transport in Concrete under Cyclic Exposure to Chloride. **Materials**, [s.l.], v. 15, n. 17, p. 5966, 29 ago. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma15175966>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

LI, Chen-Zhi; SONG, Xiao-Bin. Mesoscale modeling of chloride transport in unsaturated concrete based on Voronoi tessellation. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 161, p. 106932, nov. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106932>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

LIAO, Chenyue *et al.* Numerical and experimental analysis of chloride and iodide transports in concrete under natural diffusion. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 392, p. 131902, ago. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131902>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

LIU, J. *et al.* New equation for description of chloride ions diffusion in concrete under shallow immersion condition. **Materials Research Innovations**, [s.l.], v. 18, n. 2, p. 252-265, maio 2014. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1179/1432891714z.000000000413>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

MA, Junjun; LIN, Peng Zhen. Simulation Approach for Random Diffusion of Chloride in Concrete under Sustained Load with Cellular Automata. **Materials**, [s.l.], v. 15, n. 13, p. 4384, 21 jun. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma15134384>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

MEHTA, P.K. MONTEIRO. P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

NILENIUS, Filip *et al.* FE2 Method for Coupled Transient Diffusion Phenomena in Concrete. **Journal Of Engineering Mechanics**, [s.l.], v. 141, n. 2, p. 1-16, fev. 2015. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0000684](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0000684). Acesso em: 24 de julho de 2023.

POLLMANN, Nele *et al.* Modeling and computational homogenization of chloride diffusion in three-phase meso-scale concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 271, p. 121558, fev. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121558>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

QU, Fulai *et al.* Experimental Study on Chloride Ion Diffusion in Concrete Affected by Exposure Conditions. **Materials**, [s.l.], v. 15, n. 8, p. 2917, 16 abr. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma15082917>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

REUGE, Nicolas *et al.* Sensitivity analysis of a physicochemical model of chloride ingress into real concrete structures subjected to long-term exposure to tidal cycles. **Applied Ocean Research**, [s.l.], v. 138, p. 103622, set. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2023.103622>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

RICKETTS, Evan John; FREEMAN, Brubeck Lee; CLEALL, Peter John; JEFFERSON, Anthony; KERFRIDEN, Pierre. A Statistical Finite Element Method Integrating a Plurigaussian Random Field Generator for Multi-scale Modelling of Solute Transport in Concrete. **Transport In Porous Media**, [s.l.], v. 148, n. 1, p. 95-121, 4 abr. 2023. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1007/s11242-023-01930-8>. Acesso em: 24 de julho de 2023. Acesso em: 24 de julho de 2023.

RYAN, Eric *et al.* Comparison of Two Methods to Assess the Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 26, n. 4, p. 698-704, abr. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000844](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000844). Acesso em: 24 de julho de 2023.

SHI, Danda *et al.* Corrosion initiation life prediction of RC square piles based on a dual time-dependent bidirectional chloride diffusion model. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 275, p. 122192, mar. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122192>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

SOUZA, Vicente; RIPPER, Thomas. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

SUN, Jianyuan; XIE, Jinbao; ZHOU, Yong; ZHOU, Yun. A 3D three-phase meso-scale model for simulation of chloride diffusion in concrete based on ANSYS. **International Journal Of Mechanical Sciences**, [s.l.], v. 219, p. 107127, abr. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107127>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

SZWEDA, Zofia *et al.* Comparison of Standardized Methods for Determining the Diffusion Coefficient of Chloride in Concrete with Thermodynamic Model of Migration. **Materials**, [s.l.], v. 16, n. 2, p. 637, 9 jan. 2023. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma16020637>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

TAFFESE, Woubishet Zewdu; ESPINOSA-LEAL, Leonardo. A machine learning method for predicting the chloride migration coefficient of concrete. **Construction And Building**

**Materials**, [s.l.], v. 348, p. 128566, set. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128566>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

TONG, Liang-Yu; XIONG, Qing Xiang; ZHANG, Mingzhong; MENG, Zhaozheng; MEFTAH, Fekri; LIU, Qing-Feng. Multi-scale modelling and statistical analysis of heterogeneous characteristics effect on chloride transport properties in concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 367, p. 130096, fev. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130096>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

TONGNING, Cao *et al.* Simulation of chloride ion transport in concrete under the coupled effects of a bending load and drying–wetting cycles. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 241, p. 118045, abr. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118045>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

TOUIL, Brahim *et al.* Durability assessment of the oldest concrete structure in the Mediterranean coastline: the ghazaouet harbour. **Marine Structures**, [s.l.], v. 81, p. 103121, jan. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103121>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

WAN, Yutong; ZHENG, Wenzhong; WANG, Ying. Identification of chloride diffusion coefficient in concrete using physics-informed neural networks. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 393, p. 132049, ago. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132049>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

WANG, Chencui; JIN, Zuquan; LIU, Guanlin; DONG, Wenkui; PANG, Bo; DING, Xiaofeng. Mechanisms of chloride transport in low carbon marine concrete: an alkali-activated slag system with high limestone powder. **Journal Of Building Engineering**, [s.l.], v. 72, p.

106539, ago. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106539>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

WANG, Kai *et al.* Mesoscale numerical simulation of chloride ion penetration in geopolymer concrete under the externally applied electric field. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 394, p. 131380, ago. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131380>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

WANG, Qiannan; ZHANG, Guoshuai; TONG, Yunyun; GU, Chunping. A Numerical Study on Chloride Diffusion in Cracked Concrete. **Crystals**, [s.l.], v. 11, n. 7, p. 742, 25 jun. 2021. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/cryst11070742>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

WANG, Tiao *et al.* Analysis of time-dependent chloride diffusion in surface-treated concrete based on a rapid numerical approach. **Structure And Infrastructure Engineering**, [s.l.], v. 19, n. 3, p. 332-344, 28 jun. 2021. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2021.1945113>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

WANG, Yuanzhan *et al.* Comparisons of instantaneous chloride diffusion coefficients determined by RCM method and chloride natural diffusion test. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 223, p. 595-604, out. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.014>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

WEI, Song *et al.* Time-fractional derivative model for chloride ions sub-diffusion in reinforced concrete. **European Journal Of Environmental And Civil Engineering**, [s.l.], v. 21, n. 3, p. 319-331, 26 nov. 2015. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2015.1116467>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

WU, Linjian *et al.* Modelling of two-dimensional chloride diffusion concentrations considering the heterogeneity of concrete materials. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 243, p. 118213, maio 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118213>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

YANG, Lu Feng *et al.* Compensation length of two-dimensional chloride diffusion in concrete using a boundary element model. **Acta Mechanica**, [s.l.], v. 224, n. 1, p. 123-137, 19 out. 2012. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00707-012-0721-1>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

YANG, Yiming; PENG, Jianxin; CAI, C.s.; TANG, Huang. Probabilistic analysis of corrosion initiation in existing reinforced concrete structures with imprecise random field. **Structures**, [s.l.], v. 52, p. 877-888, jun. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.040>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

YU, Bo *et al.* Numerical modelling and experimental validation of two-dimensional chloride concentration distribution within concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 298, p. 123804, set. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123804>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

YU, Bo *et al.* Probabilistic prediction model for chloride diffusion coefficient of concrete in terms of material parameters. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 215, p. 941-957, ago. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.147>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

YU, Lei *et al.* Effects of aggregate and interface characteristics on chloride diffusion in concrete based on 3D random aggregate model. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 314, p. 125690, jan. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125690>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

YU, Libo; CHU, Hongqiang; ZHU, Zhengyu; JIANG, Linhua; DONG, Hao. Determination of the chloride ion content in concrete under simultaneous chloride and sulphate ion attack. **Journal Of Building Engineering**, [s.l.], v. 72, p. 106579, ago. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106579>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

ZACCHEI, Enrico; NOGUEIRA, Caio Gorla. 2D/3D Numerical Analyses of Corrosion Initiation in RC Structures Accounting Fluctuations of Chloride Ions by External Actions. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [s.l.], v. 25, n. 6, p. 2105-2120, 12 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-021-1242-z>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

ZACCHEI, Enrico *et al.* Numerical Solutions for Chloride Diffusion Fluctuation in RC Elements from Corrosion Probability Assessments. **Buildings**, [s.l.], v. 12, n. 8, p. 1211, 11 ago. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings12081211>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

ZHANG, Jian *et al.* Analytical Solution for Chloride Diffusivity of Concrete with Aggregate Shape Effect. **Materials**, [s.l.], v. 14, n. 14, p. 3957, 15 jul. 2021. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14143957>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

ZHANG, Qingzhang *et al.* Investigation on Numerical Simulation of Chloride Transport in Unsaturated Concrete. **Advances In Materials Science And Engineering**, [s.l.], v. 2021, p. 1-16, 17 nov. 2021. Hindawi Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2021/7548071>. Acesso em: 24 de julho de 2023.

ZHANG, Zhenhao *et al.* Durability degradation simulation of RC structure based on gamma process considering two-dimensional chloride diffusion and life probabilistic prediction. **Structures**, [s.l.], v. 48, p. 159-171, fev. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.059>. Acesso em: 24 de julho de 2023.