

Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura – Parte 1

Service life prediction models of concrete structures subjected to the initiation of reinforcing steel corrosion by chloride ions: contribution to the state of the art through systematic literature review – Part 1

Rayane Campos Lopes¹ , Andrielli Morais de Oliveira¹ , Oswaldo Cascudo¹ 

¹ Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil. Av. Universitária, nº 1488, Qd. 86, Lt. Área, 74.605-220, Setor Universitário, Goiânia, GO, Brasil.

e-mails: rayaneclopes@discente.ufg.br, andriellimorais@ufg.br, ocascudo@ufg.br.

RESUMO

A modelagem da penetração de agentes agressivos no concreto pode melhorar a qualidade de projetos e concorrer para uma especificação otimizada de concretos, contribuindo assim com a previsibilidade comportamental da estrutura, aspecto este muito importante para assegurar condições de serviço adequadas durante o uso, operação e manutenção das estruturas de concreto. Contribuir para o cumprimento de vida útil, minimizando custos de manutenção e riscos aos usuários, é papel desse tipo de estudo, que colabora com a concepção de estruturas duráveis, baseada em desempenho, voltando-se ao controle da corrosão da armadura induzida por cloretos. São diversos os modelos preditivos de vida útil existentes em escala mundial, porém eles se apresentam de forma difusa e heterogênea, o que dificulta sua compreensão e consequente aplicação. O presente trabalho contribui, então, com a realização uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com o objetivo de identificar os principais modelos utilizados mundialmente, considerando uma abordagem que vai até a etapa de iniciação da corrosão induzida por cloretos. A pesquisa foi realizada em quatro bases de dados, quais sejam: *Engineering Village*, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. Após exclusão em diferentes fases (título, resumo, busca dos artigos completos e leitura), permaneceram 50 publicações, nas quais foi realizado um levantamento bibliométrico com diversas informações (autores, instituições, países e palavras-chave). Observou-se que a maioria dos modelos preditivos identificados é baseada na difusão de cloretos, conforme a *Segunda Lei de Fick*, com ou sem modificações pela solução de *Crank*. Os modelos preditivos mais citados foram a *Segunda Lei de Fick* e o *Life-365*, como forma de prever o tempo de início de corrosão e, conseqüentemente, a vida útil das estruturas de concreto.

Palavras-chave: Estrutura de concreto; Modelos preditivos; Vida útil; Corrosão da armadura; Iniciação por cloretos; Revisão Sistemática da Literatura.

ABSTRACT

Modeling the penetration of aggressive agents in concrete can improve the quality of projects and contribute to an optimized specification of concrete, thus contributing to the behavioral predictability of the structure, an aspect that is very important to ensure adequate service conditions during use, operation and maintenance of concrete structures. Contributing to the fulfillment of service life, minimizing maintenance costs and risks to users, is the role of this type of study, which collaborates with the design of durable structures, based on performance, focusing on the control of chloride-induced reinforcement corrosion. There are several predictive models of service life on a world scale, but they are presented in a diffuse and heterogeneous way, which makes their understanding and consequent application difficult. The present work contributes, then, by carrying out a Systematic Literature Review (SLR) with the objective of identifying the main models used worldwide, considering an approach that goes up to the step of initiation of chloride-induced corrosion. The research was carried out in four databases, namely: *Engineering Village*, *Science Direct*, *Scopus* and *Web of Science*. After exclusion at different stages (title, abstract, search for complete articles and reading), 50 publications remained, in which

a bibliometric survey was carried out with different information (authors, institutions, countries and keywords). It was observed that most of the predictive models identified are based on chloride diffusion, according to Fick's Second Law, with or without modifications by Crank's solution. The most cited predictive models were *Fick's Second Law* and *Life-365*, as a way of predicting the time to initiate the corrosion and, consequently, the service life of concrete structures.

Keywords: Concrete structure; Predictive models; Service life; Reinforcement corrosion; Initiation by chlorides; Systematic Literature Review.

1. INTRODUÇÃO

Demandas de aspectos legais, de mercado, de recursos financeiros e tecnológicos, de produtividade e otimização de tempo e de sustentabilidade na construção civil exigem a concepção de estruturas e materiais mais duráveis e de alta performance em serviço. Em âmbito nacional e internacional, muitos estudos e pesquisas, organizações e entidades, assim como normas técnicas, têm contribuído nos últimos anos para consolidar os fundamentos de uma abordagem contemporânea baseada no desempenho dos sistemas estruturais, levando-se em conta a durabilidade e a vida útil de estruturas de concreto. Apesar destes conceitos terem sido incorporados no contexto das edificações a partir da década de 80 por normas internacionais, sua aplicação prática em nível nacional contém subjetividades e limita-se em deficiências de normatização [1, 2]. No Brasil, efetivamente a primeira norma que se referiu à durabilidade de estruturas de concreto foi a NBR 6118, em sua edição revisada de 2003 [3]. A partir dela, outras normas incorporaram conteúdos de durabilidade, podendo-se destacar a NBR 12655: 2015 [4] e a NBR 15575: 2013 [5]. Esta última norma apresenta uma perspectiva que versa sobre o desempenho de edificações habitacionais e preestabelece, ao nível do projeto, vidas úteis para os sistemas da construção. No caso do sistema estrutural em concreto, a vida útil de projeto mínima é de 50 anos (considerando o menor nível de desempenho—nível inferior).

A durabilidade de estruturas de concreto armado está associada, entre outras coisas, à dificuldade de penetração de agentes agressivos, como gás carbônico, cloretos, oxigênio e água em sua rede de poros, demonstrando assim a importância do concreto de cobertura. [6, 7]. Nesse sentido, vários autores vêm consolidando esses resultados, avaliando a influência da relação água/cimento, da espessura de cobertura, das condições de moldagem e cura e da presença de adições minerais na solução dos poros e na durabilidade do concreto de cobertura por meio de diferentes métodos [8–16]. O estudo dos mecanismos de transporte desses agentes agressivos é fundamental para indicar a qualidade do concreto de cobertura, ajudando a quantificar a penetrabilidade desses agentes agressivos e auxiliando na previsão da resistência do concreto à deterioração [17, 18].

Dentre os mecanismos que podem deteriorar estruturas de concreto, a corrosão das armaduras possui protagonismo, pois pode afetar a integridade do sistema estrutural, produzindo riscos de colapsos. Ela se caracteriza por exigir altos investimentos para recuperação das estruturas e por não haver plenas garantias de solução definitiva [19–22]. Um modelo de corrosão muito utilizado é o proposto por TUUTTI [23], formado por duas etapas do processo corrosivo: iniciação e propagação. O início da corrosão se dá quando a armadura perde sua película passivadora de proteção de forma local ou generalizada e a propagação da corrosão ocorre após este período. Além da carbonatação, que diminui o pH do concreto, uma das formas de despassivar a armadura é por meio dos cloretos [23]. Diferentes critérios relacionados à corrosão das armaduras podem ser adotados para se considerar o fim da vida útil de uma estrutura de concreto. Em uma abordagem a favor da segurança, o fim do período de iniciação (quando ocorre a despassivação) é considerado por alguns pesquisadores como sendo o término da vida útil de um elemento estrutural ou da estrutura como um todo, não porque tenham chegado ao final as condições de serviço, mas porque não há como garantir mais a durabilidade a partir do momento em que se instala o fenômeno corrosivo [19, 24–26]. Normalmente, considera-se neste momento o fim da vida útil de projeto.

HELENE [17] apresenta, em uma classificação geral, quatro métodos para estimar a vida útil de estruturas de concreto, tendo como base prescrições de normas (como exemplos, norma brasileira NBR 6118: 2014 [27] e norma mexicana NMX-C-530:2018 [28]); ensaios acelerados, como de carbonatação e ataque de cloretos; métodos deterministas e métodos probabilistas. Em relação aos dois primeiros métodos, pode haver dificuldades em estabelecer e adaptar parâmetros de normas para cada contexto ambiental e a correlação entre ensaios acelerados e naturais pode demandar longo tempo. Já a previsão da vida útil, por meio de modelos deterministas, ocorre baseada em transportes de massa, gases e íons, em que eles são quantificados, segundo equações, sendo a permeabilidade, a absorção capilar, a difusão e migração de íons os principais mecanismos considerados na previsão da penetração desses agentes agressivos na estrutura porosa do concreto [17, 29, 30].

O método probabilista, também conhecido como estocástico, é o mais moderno e realístico, contudo de muito maior complexidade. Ele considera a variabilidade dos fenômenos, como as incertezas inerentes aos materiais de construção e ao meio ambiente, inserindo-as no modelo com diferentes distribuições de probabilidade e superando algumas limitações de modelos determinísticos. Como nos outros métodos, há diferentes

níveis de estudos, que variam de uma combinação de métodos deterministas e probabilísticos a estudos mais profundos que consideram teoria das falhas e conceitos de riscos (probabilidade da falha associado ao custo do prejuízo causado). Por ser mais completo, esse método acarreta mais dificuldades de implementação, devido à necessidade de dados confiáveis e da avaliação das possíveis fontes de incerteza [17, 19, 31–33].

Nas últimas décadas, um extenso esforço na modelagem da corrosão, iniciação e propagação tem sido feito com o aumento do uso da abordagem probabilística e com o objetivo de prever mais apropriadamente a vida útil, projetar estruturas mais duráveis, mais econômicas e mais ambientalmente amigáveis, além de ampliar a vida útil com melhores estratégias de manutenção [34–36]. Considerando o conceito de vida útil de projeto já apresentado, uma forma de prevê-la seria a modelagem do ingresso de cloretos no concreto até a despassivação da armadura.

Essa modelagem pode ser aplicada na fase de projeto e dosagem do concreto, e também no monitoramento e planejamento de inspeções e manutenções de estruturas já existentes submetidas à corrosão, induzida por cloretos [37]. LI e TORRENT [38] destacam que o verdadeiro uso dos modelos preditivos é a atualização dinâmica da previsão de desempenho da estrutura, baseando-se em observações ativas e dados de inspeções e monitoramento. Com o efeito estufa maior nas últimas décadas, fatores e condições ambientais (temperatura, umidade, vento etc.) no macro e microclima local passam a ser parâmetros ativos [39], os quais podem ser constantemente monitorados e atualizados nos modelos.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é apresentar, por meio de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), os principais modelos preditivos de vida útil aplicáveis às estruturas de concreto armado em ambientes marinhos, tendo-se como critério fundamental de término da vida útil a iniciação da corrosão de armaduras provocada pela ação dos íons cloro (cloretos) no concreto. O conteúdo total da pesquisa está presente em dois artigos (Partes 1 e 2). A Parte 1 está contida no presente artigo e apresenta a metodologia detalhada da RSL, os resultados bibliométricos e uma breve descrição dos modelos identificados. Na Parte 2, maior atenção será dada à descrição e à avaliação dos modelos levantados, promovendo-se uma discussão que envolve classificações, usos e limitações dos modelos.

Ressalta-se que já existem alguns levantamentos de modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto armado na literatura [40, 41], contudo o presente artigo apresenta contribuições ao utilizar um método de “busca” de artigos com critérios bem definidos pela Revisão Sistemática da Literatura (RSL), abordando quais modelos preditivos são mais utilizados por pesquisadores em um contexto mundial. Os resultados obtidos desses artigos irão contribuir com a identificação e a classificação dos modelos, além de propiciar uma fonte de consulta confiável, acessível e atual para pesquisadores, profissionais e projetistas na resposta de qual modelo melhor lhes atenderá. Um estado da arte do conhecimento sobre os modelos preditivos de vida útil baseados no ataque por cloretos em estruturas de concreto é apresentado neste trabalho, de forma a atualizar, consubstanciar e balizar estudos futuros no tema.

2. METODOLOGIA EMPREGADA NA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Na Revisão Sistemática da Literatura (RSL), a busca é realizada de forma sistematizada para avaliar e sintetizar evidências de pesquisa. Além disso, a metodologia utilizada é expressa de forma transparente para facilitar a replicação [42]. A metodologia utilizada nesta pesquisa foi proposta por TRANFIELD, DENYER e SMART [43], que divide a RSL em três etapas: planejamento, condução e relatórios (análise).

Na etapa de planejamento, foram definidos o tema da pesquisa, a *string* de busca, as bases de dados e os critérios de exclusão e inclusão. A pergunta norteadora da pesquisa foi: *Quais são os principais modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto em ambiente marinho, sujeitas somente à fase de iniciação de corrosão de armaduras induzida por cloretos?*

Assim, primeiro, foram selecionadas as palavras-chave para se obter a resposta ao questionamento mencionado, sendo elas: previsão, modelo, vida útil, durabilidade, ingresso, penetração, iniciação, concreto, cloreto e corrosão. Procurando limitar a busca já a partir da *string*, foram retirados os termos “carbonatação” e “gelo-degelo”.

A partir dessas palavras-chave, a *string* utilizada nas buscas foi: (prediction OR model*) AND (service life OR durability) AND (ingress OR penetration OR initiation) AND concrete AND chloride AND corrosion NOT carbonation NOT freeze thaw.

Foram selecionadas quatro bases de dados: *Engineering Village*, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*, tendo como foco publicações internacionais. Durante as buscas, não foi utilizado nenhum critério de restrição como ano, área do conhecimento ou tipo de artigo desejado, somente foram definidos os locais de busca: título, resumo e palavras-chave.

Os resultados das buscas de cada base, com as principais informações, incluindo, por exemplo, título, autores, ano, local de publicação e resumo, foram exportados nos formatos *CSV* ou *bibtex* para o programa

online Rayyan.qrci. Este software ajudou na identificação dos arquivos duplicados que foram verificados e eliminados, além de facilitar a seleção dos artigos.

Para determinar a forma como a revisão foi conduzida, foram definidos critérios de exclusão e inclusão de artigos técnicos. Após a eliminação dos duplicados, os documentos passaram por três fases de seleção. Na primeira fase, foram excluídos os artigos pela leitura dos títulos. Na segunda, pela leitura dos resumos. E na última fase, após exclusão dos artigos que não foram obtidos na íntegra, selecionaram-se os artigos completos que atendiam ao critério de inclusão, a partir de sua leitura parcial. Posteriormente, após a leitura completa, foram obtidos os artigos aderidos.

O critério de inclusão final considerou artigos que calcularam o tempo de vida útil do concreto armado ou que apresentaram, em forma de “passo a passo”, o modelo com formulações diretas para cálculo de tempo, devido à corrosão induzida por cloretos. Uma ressalva que se coloca é que foram contemplados modelos que consideram somente o período de iniciação, descartando-se aqueles que adentram na corrosão (etapa de propagação) e que consideram, portanto, aspectos da vida útil de serviço da estrutura de concreto (e não exclusivamente a vida útil de projeto). O levantamento possibilitou, assim, a classificação e a sistematização dos modelos preditivos da literatura, considerando, conceitualmente, a vida útil de projeto, ou seja, o período que decorre desde a colocação da estrutura em serviço até a despassivação do aço por cloretos.

A Tabela 1 apresenta os critérios de exclusão adotados. Parte desses critérios foi definida na etapa de planejamento e outra parte durante a condução da pesquisa, à medida que novas situações apareceram. Artigos que consideravam outros mecanismos de degradação foram excluídos, como, por exemplo, a reação álcali-agregado. O tipo de concreto armado também foi restringido, sendo eliminadas estruturas que continham alguns tipos especiais de concreto (como citados na Tabela 1). Porém, concretos com adições minerais e inibidores de corrosão foram selecionados, quando atendiam ao critério de inclusão. Quanto à fonte de cloretos, considerou-se somente fontes externas em ambientes marinhos, principalmente zonas de maré (*tidal zones*) ou zonas de respingo de maré (*splash zones*), em que o concreto fica submetido a ciclos de molhagem e secagem. Foram também eliminados artigos que consideravam o concreto submerso (continuamente saturado em água).

Após todas as fases de exclusões, os artigos aderidos finais foram selecionados. Eles foram analisados, dentro da última etapa da revisão, com auxílio de uma planilha *Excel*, por meio do levantamento bibliométrico. Este levantamento consistiu na análise dos dados obtidos com a revisão sistemática, tais como: quantidade de publicações no decorrer dos anos, autores, instituições, países das instituições e palavras-chave recorrentes.

Quanto aos autores recorrentes, foi levantado o índice “h”, na base *Scopus* na maioria dos casos e na base *Web of Science*, quando não foi encontrado na base *Scopus*. Esse índice visa caracterizar a produção científica acumulada individual, estimando sua relevância e contribuição, já que leva em consideração a quantidade de artigos publicados e suas citações [44].

Quanto às instituições e seus países, houve contabilização por publicação, de modo que quando existia mais de um autor no artigo da mesma instituição ou país, eles foram registrados somente uma vez. Para a análise do fator de impacto das publicações em revistas, considerou-se o índice JCR 5 anos do ano 2019. Quando a revista apresentava o índice JCR, porém de uma forma mais recente, foi considerado o *Journal Impact Factor* do

Tabela 1: Critérios de exclusão adotados.

CATEGORIA	CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO
Outros mecanismos de degradação	Reação álcali-agregado, corrosão induzida por carbonatação, ciclos de gelo-degelo e ataque combinado do cloreto com outro íon (sulfato, por exemplo).
Tipo de concreto ou de aço e formas de tratamento superficial	Concretos auto cicatrizante, com agregados reciclados ou sintéticos, leve, fibroso, modificados com polímeros ou com algum tipo de proteção superficial; e aço inoxidável ou armadura com algum tipo de proteção (pintura, proteção catódica).
Tipo de estrutura ou elemento estrutural	Estrutura de concreto protendido, estruturas recuperadas, submersas ou enterradas, estrutura com carregamento externo e pilar circular.
Fonte de cloretos e meio ambiente	Fontes internas de contaminação (aditivo acelerador, agregados ou água de amassamento contaminados), saís de degelo, clima frio.
Outros	Penetração de cloretos em argamassa, modelos que considerem terremoto ou outros fenômenos conjuntos, aprimoramento de modelos, modelagem somente do ingresso de cloretos sem previsão do tempo, modelos que considerem a etapa de propagação da corrosão e artigos não disponíveis na íntegra.

ano 2019. Algumas revistas não possuem esse índice e ele não avalia o impacto de artigos de congressos, que também foram considerados nesta revisão. Também foram levantados o número de citações dos artigos aderidos, nas bases *Scopus* e *Web of Science* (quando não tinha na primeira base) e foi feita a soma dessas citações, por modelo.

Na parte 2 do artigo (Artigo II) é apresentada a classificação da aplicação dos modelos de forma determinística ou probabilística, conforme HELENE [17], e a classificação dos modelos em empíricos, analíticos e/ou numéricos, com sua explicação.

Os artigos aderidos finais também tiveram leitura completa e análise crítica, com o objetivo de responder à pergunta norteadora desta RSL. Assim, buscou-se uma melhor compreensão dos principais modelos preditivos de vida útil do concreto armado em ambientes marinhos, com suas aplicações, pontos fortes e limitações.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1. Levantamento bibliométrico

O levantamento com a *string* apresentada retornou 1381 documentos nas quatro bases anteriormente mencionadas. Após todas as fases de exclusão (Tabela 2), permaneceram 50 artigos aderidos. Os motivos de exclusão que mais apareceram foram modelos que consideravam a propagação da corrosão e artigos que modelam o ingresso, mas não preveem o tempo de vida útil. A Figura 1 apresenta a quantidade de publicações totais e artigos aderidos para cada base pesquisada, com suas porcentagens equivalentes.

Considerando os 50 artigos selecionados, a Figura 2 apresenta um panorama temporal desses artigos com a quantidade de artigos em relação ao ano de publicação.

Analisando-se o gráfico, pode-se perceber que esse é um tema relativamente recente de pesquisa (cerca de 20 anos), com as primeiras publicações no final do século XX, poucas publicações nos anos 2000 e um aumento a partir de 2008. Isso indica um crescente interesse no tema e possibilidade de avanços nesta área.

A Tabela 3 mostra autores recorrentes, que se apresentam duas vezes ou mais e seus índices “h”. Além desses, apareceram mais 121 autores.

Os autores com a maior quantidade de publicações são Ki Yong Ann, da Universidade de Yonsei na Coreia do Sul, com quatro publicações, e Mohammad Shekarchi da Universidade do Teerã no Irã, com três. Entre os autores com um artigo publicado aparecem alguns pesquisadores brasileiros, como Caio Gorla Nogueira, da Universidade de São Paulo (USP), e Ronaldo de Medeiros-Júnior, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

Tabela 2: Processo de filtragem das publicações.

ETAPA	QUANTIDADE
Resultado das buscas	1381
Artigos Duplicados	-656
Exclusão por título	-145
Exclusão por resumo	-329
Artigos não disponíveis	-55
Exclusão por leitura parcial ou completa	-146
Artigos aderidos	50

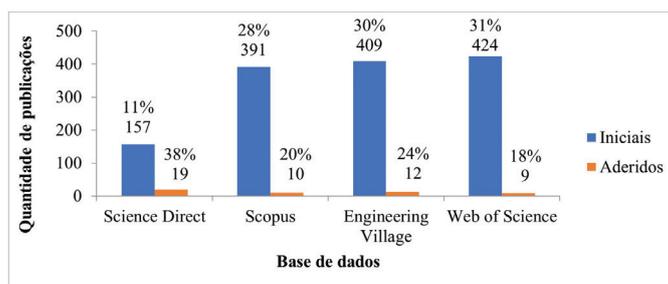


Figura 1: Quantidades iniciais e finais, inclusive em percentual, de publicações (artigos aderidos) nas quatro bases de pesquisa utilizadas.

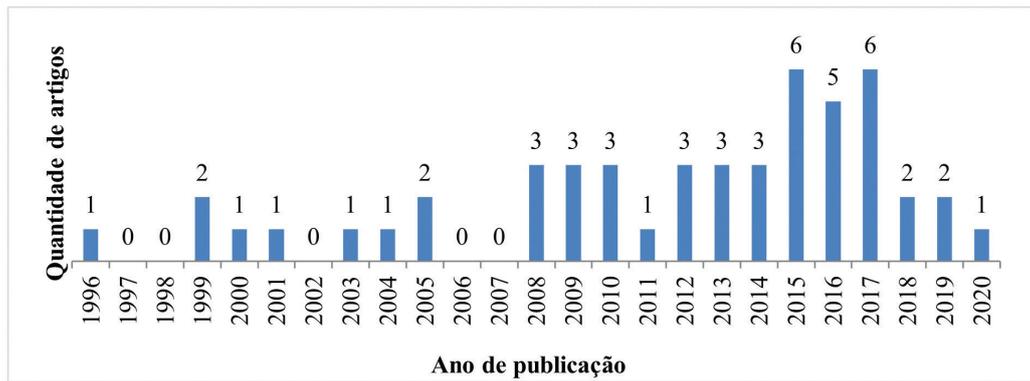


Figura 2: Ano de publicação dos artigos aderidos considerados.

Tabela 3: Autores mais recorrentes, frequências em citações de publicações e índice “h”.

AUTORES	REPETIÇÕES	ÍNDICE h	AUTORES	REPETIÇÕES	ÍNDICE h
Ann, K.Y.	4	16	Li, Q.	2	15
Shekarchi, M.	3	24*	Pack, S.-W.	2	15
Alizadeh, R.	2	16	Smith, B. G.	2	3
Chini, M.	2	3	Song, H.-W.	2	22
Ghods, P.	2	16	Thomas, M.D.A.	2	38
Hooton, R.D.	2	39	Yu, Z.	2	22
Hoseini, M.	2	5			

*Índice h da *Web of Science*, por não ter na *Scopus*.

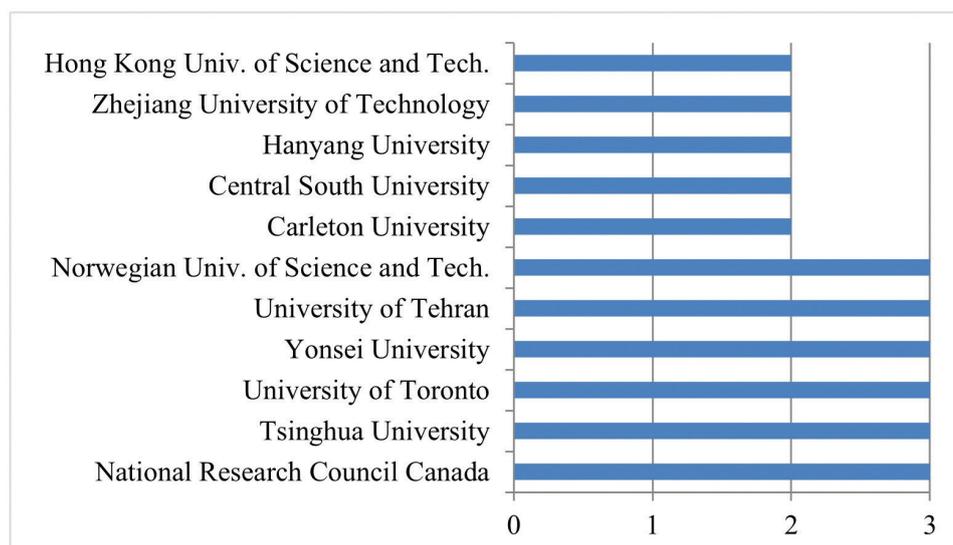


Figura 3: Instituições mais recorrentes nos artigos aderidos obtidos.

A Figura 3 mostra as instituições recorrentes entre os artigos aderidos. Além dessas, existiram outras 62 instituições, porém que apareceram somente uma vez.

As instituições que mais apareceram, com três artigos cada, foram a Universidade do Teerã do Irã, Universidade de Yonsei da Coreia do Sul, Universidade de Toronto do Canadá, Universidade de Tsinghua da China, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia e o *National Research Council of Canada*, a maior agência

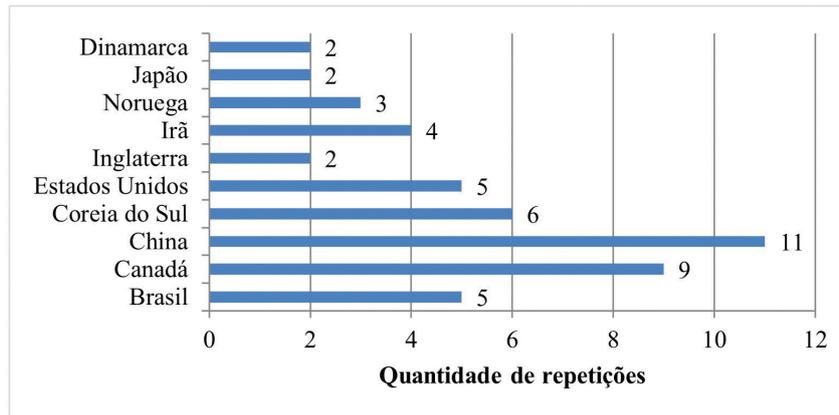


Figura 4: Países das instituições dos pesquisadores com artigos aderidos estudados.

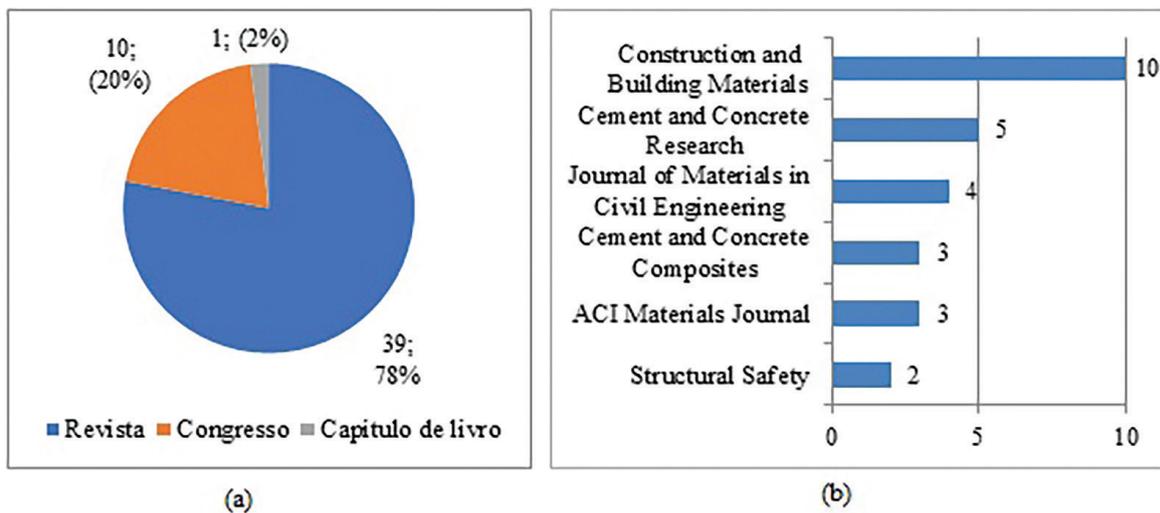


Figura 5: Artigos aderidos: (a) número, percentual e identificação do tipo de veículo da publicação e (b) identificação e número dos periódicos e frequência.

nacional de pesquisa e organização tecnológica do governo do Canadá [45]. Além das instituições já citadas, outras universidades brasileiras aparecem, como a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Quanto aos países, realizou-se levantamento dos países das instituições dos autores, apresentado na Figura 4. A China lidera com participação em 11 pesquisas, seguido pelo Canadá com nove pesquisas, a Coreia do Sul com seis e o Brasil e os Estados Unidos com cinco participações.

Dos 50 artigos aderidos, 78% são artigos de periódicos, 20% são artigos de congresso e 2% referem-se a um capítulo de livro, conforme mostrado na Figura 5(a). As revistas mais frequentes estão apresentadas na Figura 5(b), com destaque para a *Construction and Building Materials*, com 10 publicações. Além dessas, existem 12 revistas que se apresentaram somente uma vez.

A Figura 6 apresenta o fator de impacto JCR (Journal Impact Factor) dos periódicos, considerando o índice de 5 anos. A *Cement and Concrete Research* (8,515), a *Cement and Concrete Composites* (7,035), a *Structural Safety* (5,142) e a *Construction and Building Materials* (5,036) são as revistas com os maiores valores.

A pesquisa das palavras-chave mais recorrentes também foi realizada, sendo apresentada na forma de nuvem de palavras (Figura 7). No total foram 212 palavras-chave, sendo ilustradas no gráfico as que se mostraram duas ou mais vezes. As palavras com maior quantidade de repetições (que aparecem maior na nuvem) foram *corrosion*, *chloride*, *durability*, *service life* e expressões que continham a palavra *chloride* (*chloride penetration*, *chloride-induced corrosion*, *chloride diffusion*). Além das palavras utilizadas na *string*, que foram a maioria,

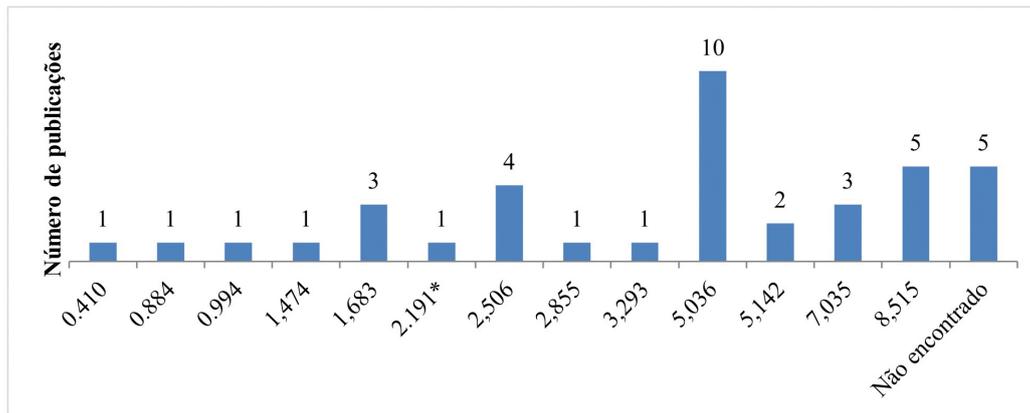


Figura 6: Fator de impacto – JCR 5 anos do ano 2019.

*JCR – Journal Impact Factor 2019.



Figura 7: Nuvem de palavras das palavras-chave mais recorrentes.

também se apresentaram outras palavras recorrentes, como *diffusion*, *sensitivity*, *probability*, *marine environment*, *structures* e *reliability*.

3.2. Modelos identificados na pesquisa

Dentre os artigos, houve diferentes abordagens em relação aos modelos: sete apresentaram uma revisão dos modelos preditivos, sendo este o foco principal dos artigos ou uma parte da análise realizada [29, 30, 34, 46–49]; cinco compararam diferentes modelos, sem propor um modelo novo, geralmente como foco principal [26, 50–53]; e os demais aplicaram modelos existentes ou propuseram novos modelos, comparando-os ou não aos existentes.

Foram sintetizados 40 modelos diferentes aplicados 68 vezes nos 50 artigos aderidos, sendo utilizados de forma determinística ou probabilística, conforme HELENE [17]. Cabe ressaltar que os modelos foram contabilizados quando o artigo procedeu à sua aplicação. Assim, entre os artigos de revisão, alguns aplicaram modelos específicos [30, 34, 48, 49], que foram contados entre os identificados e outros citaram vários modelos. Se o modelo citado estiver entre os encontrados, isso foi destacado na Tabela 4 (com o símbolo ^{*R}), que resume os 40 modelos. Nessa tabela, eles não foram ordenados por ordem alfabética ou cronológica, mas por complexidade, sendo apresentados primeiros aqueles baseados na Segunda Lei de Fick.

Pela Tabela 4, fica claro que a maioria dos modelos dos artigos aderidos é baseada na Segunda Lei de Fick (com diversas modificações que tentam incrementar essa solução). A Tabela 5 apresenta os modelos com mais de uma aparição.

Tabela 4: Modelos de previsão de vida útil levantados.

MODELO	ARTIGOS ADERIDOS	DESCRIÇÃO	SOMA DE CITAÇÕES DOS ARTIGOS ADERIDOS	EQUAÇÕES
Segunda Lei de Fick* ^R	[30, 36, 48, 50, 54–58]	Fick – solução de Crank – D e C _s constantes	233	$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right)$
RILEM (1996)	[50]	Fick – solução simplificada	6	$t_i = \frac{d^2}{12D} \left(\frac{1}{1 - \sqrt{\frac{C_{cr}}{C_s}}} \right)$
Ann <i>et al.</i> (2009)	[58]	Fick + C _s (t)	138	$C_s(t) = kt / C_s(t) = k\sqrt{t}$ $C_s(t) = C_0 + k\sqrt{t}$
Software CIKS	[59]	Fick + C _s cíclico + fixação	1	$\frac{C_{cr}}{C_s} = \operatorname{erf} \frac{d}{2\sqrt{D} t_i}$
Amey <i>et al.</i> (1998)	[51]	Fick + D (T)	14	$D(T) = D_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[k \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$
Kristiawan <i>et al.</i> (2017)	[60]	Fick + D (T)	3	$D_{fa}(T) = D_0 FA \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ $FA = 0.00014fa^3 - 0.0242fa^2 + 1.351fa - 23.8$
Maage <i>et al.</i> (1995) * ^R	[34, 48, 61, 62]	Fick + D (t)	240	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$
UCT (2001)	[63]	Fick + D (t)	0	$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_0 t^{(1-n)}}} \right) \right)$
HZM (2015)	[25]	Fick + D (t)	32	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n / C_s = A(w/b)^*$ *ver [22]
Kwon <i>et al.</i> (2009)	[64]	Fick + D (t) + fissuras	167	$D_m(t) = \frac{D_0}{1-n} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n (t < t_{cte})$ $D_m(t) = D_0 \left[1 + \frac{t_{cte}}{t} \left(\frac{n}{1-n} \right) \right] \left(\frac{t_0}{t_{cte}} \right)^n (t \geq t_{cte})$ $D(w) = (31.61 w^2 + 4.73 w + 1)$ $D_m(w \geq 0.1 \text{ mm})$
Leung, Hou (2015)	[65]	Fick + D (t) + fissura	8	$D_{eq} = \frac{D_{cr} + D_{unc} A1 \left(D_{unc} \frac{t}{X^2} \right)^{A2}}{1 + A1 \left(D_{unc} \frac{t}{X^2} \right)^{A2}}$

MODELO	ARTIGOS ADERIDOS	DESCRIÇÃO	SOMA DE CITAÇÕES DOS ARTIGOS ADERIDOS	EQUAÇÕES
CHLODIF (1995)	[26]	Fick + D (t) + C _s (t)	29	$D(t) = D_{w/c} D_c t^{-0.1}$ $C_x = [C_0 + k(t-1)] \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right)$ + [...] * *consultar [26]
CTDRC/ BHRC (2007)	[52]	Fick + D (t) + C _s (t)	53	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n / C_s(t) = C_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m$ Consultar equação empírica em [66]
Pack <i>et al.</i> (2010)	[56]	Fick + D (t) + C _s (t)	136	$D_m(t) = \frac{D_0}{1-n} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n +$ $C_s(t) = k_1 [\ln(k_2 t + 1)] + k_3$
Duan <i>et al.</i> (2015)	[67]	Fick + D (t) + C _s (t)	22	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $C_s(t) = C_0 + k(1 - e^{-m(t-t_0)})$
Pang e Li (2016)	[68]	Fick + D (t) + C _s (t)	43	$D_{app}(t) = D_{app,0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{n*}$ $C_s(t) = C_{s,1} t^m$ *fórmulas empíricas em [68]
DuraCrete (2000)* ^R	[26, 53, 69; 70]	Fick + D (t) + fatores k	62	$D_{app}(t) = K_c K_g K_{tm} D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$
LNEC E465 (2007)	[53]	Fick + D (t) + fatores k	22	$D_{app}(t) = K_c K_n K_T D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$
Smith (2001)	[49, 71]	Fick + D (t, T)	21	$D_{eff} = D_0 f(t) f(T) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $f(t) = \frac{1}{[1 + 2 \log(t+1)]} \text{ para OPC}$ $\hat{f}(t) = \frac{1}{[1 + (2 + 0.01sf) \log(t+1)]}$ para concreto com sílica ativa $f(T) = \frac{T}{T_0} \exp \left[k \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$
Ferreira (2010)	[72]	Fick + D (t, T)	74	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$ $f(T) = \frac{T}{294} \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{294} - \frac{1}{T} \right) \right] \text{ unid: K}$
Life-365* ^R	[26, 52, 53, 56, 73, 74]	Fick + D (t, T) + C _s (t)	249	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n / f(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$

MODELO	ARTIGOS ADERIDOS	DESCRIÇÃO	SOMA DE CITAÇÕES DOS ARTIGOS ADERIDOS	EQUAÇÕES
Concrete Works	[73]	Fick + D (t, T) + C _s (t)	9	$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n / D_{ult} \left[1 - \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \right] t_0 = 28 \text{ d}$ $f(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ $C_s(t) = C_{s,max} \frac{kt}{1+kt}$
ClinConc	[48]	Fick + D (t,T,x) + C _s (t) – senoidal	1	$C_s(t) = \frac{C_{s,max} + C_{s,min}}{2} + \frac{C_{s,max} - C_{s,min}}{2} \sin k(t + t_{exp})$ $D(x, t) = \frac{D_0}{N} f(x) f(t) f(T)$ $f(x) = \begin{cases} \varphi + (1 - \varphi) \left(\frac{x}{x_s} \right)^k; & x < x_s \\ 1; & x \geq x_s \end{cases}$ $f(t) = \begin{cases} \left(\frac{t_{cte}}{t + t_{exp}} \right)^n; & t < t_{cte} - t_{exp} \\ 1; & t \geq t_{cte} - t_{exp} \end{cases}$ <p>Equação de Arrhenius:</p> $f(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$
DuraPGulf (2008)	[52, 75;76]	Fick + D (t, T, h)	100	<p>f(t) igual Maage <i>et al.</i> (1995) f(T): Equação de Arrhenius (ver ClinConc) f(h) = [1 + 256 (1 - h)⁴]⁻¹</p>
Farahani <i>et al.</i> (2015)	[72]	Fick + D (t, T, h)	74	<p>f(t) igual Maage <i>et al.</i> (1995) f(T): Equação de Arrhenius</p> $f(h) = \left[1 + \left(\frac{100 - h}{100 - h_c} \right)^4 \right]^{-1}$ $D_0 = (-4.002 + 18.09w/b + 1.8129(w/b)^2 - 0.09937sf + 0.01861sf^2 - 0.8558w/b sf) 10^{-12}$
Yu <i>et al.</i> (2015)	[77]	Fick + D (t, T, h)	50	$D_{eq} = D_{app} f(t) f(T) f(h)$ $f(t) = \begin{cases} (t_0/t)^n; & t \leq 30 \text{ anos} \\ (t_0/t_{cte})^n; & t > 30 \text{ anos} \end{cases}$ $f(T) = \frac{T}{T_0} \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ <p>f(h) igual Farahani <i>et al.</i> (2015)</p>

MODELO	ARTIGOS ADERIDOS	DESCRIÇÃO	SOMA DE CITAÇÕES DOS ARTIGOS ADERIDOS	EQUAÇÕES
Shi <i>et al.</i> (2012)	[78]	Fick + D (t, T, h, fixação, fissura)	0	$D = f(T)f(h)f(C_b)f(w)D_{app}$ $D_{app} = D_0f(t)^*$ $f(T) = \exp\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_0 + 273} - \frac{1}{T + 273}\right)\right]$ $f(h) \text{ igual Farahani } et al. (2015)$ $f(C_b) = 1 + \frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ $f(w) = 31.61w^2 + 4.73w + 1$ <p>*consultar [78]</p>
Van Dinh (2017)	[79]	Fick + D (t, T, h, fissuras) + Cs (t)	0	$D_{app} = D_0[\exp(-0.165 sf)]f(t)f(T)f(h) + w/s_{cr} D_{Cr}$ $f(t): \text{Maage } et al. (1995) / f(T): \text{Equação de Arrhenius} / f(h): \text{Farahani } et al. (2015)$ $n = 0, 2 + 0, 4(fa/50 + sg/70)$ $C_s(t) = \begin{cases} kt; t \leq t_{cte} \\ C_{s,max}; t \geq t_{cte} \end{cases}$
Dominicini (2016)	[35]	Fick + D (t, T, h) + diferentes Cs (t) + efeito radiação solar	6	$D = D_0f(t)f(T)f(h)$ $f(t) \text{ igual Maage } et al. (1995)$ $f(T): \text{Equação de Arrhenius}$ $f(h) \text{ igual Farahani } et al. (2015)$ <p>Ver efeito radiação solar em [35]</p>
Zhang <i>et al.</i> (2019)	[80]	Fick + D (t) + Convecção*	1	$C_{s,\Delta x} = C_i + k\sqrt{t} / \Delta x = k_1 + k_2 \ln t$ <p>Equação empírica em [80]</p>
<i>fib</i> (2006) *R	[52, 81, 82]	Fick + D (t, T) + Convecção*	54	$C_x = C_i + (C_{s,\Delta x} - C_i) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2\sqrt{D_{app}t}} \right) \right)$ $D_{app} = D_{RCM}f(t)f(T)K_{tm}$ $f(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^n / f(T) = \exp \left[K \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$
Da Costa <i>et al.</i> (2013)	[83]	Fick + Convecção	27	$\frac{\partial C(t,x)}{\partial t} + u \frac{\partial C(t,x)}{\partial x} - D \frac{\partial^2 C(t,x)}{\partial x^2} = 0$
Hong e Ann (2018)	[84]	Fick + Convecção + Transporte de umidade	0	$\left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f} + S\Phi \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \nabla(S\Phi D_{eff} \nabla C_f + S\Phi C_f D_h \nabla h)$ $\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(-K'_1 \nabla P_c + K'_v \nabla P_v)$
RMTC	[85]	Fick + Convecção + transporte de umidade + fissura	77	$\frac{\partial \theta C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} - D \frac{\partial^2 \theta C}{\partial x^2} = 0$ <p>Alterna entre o transporte na fissura e na matriz Fórmulas do transporte de umidade: [85]</p>

MODELO	ARTIGOS ADERIDOS	DESCRIÇÃO	SOMA DE CITAÇÕES DOS ARTIGOS ADERIDOS	EQUAÇÕES
Saetta <i>et al.</i> (1993)	[51, 72]	Fick + D (t, T, h) + Convecção + Transfer. decalor + Transporte de umidade	88	$D = D_0 f(t) f(T) f(h)$ $f(t) = \zeta + (1 - \zeta) \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2}$ $f(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ $f(h) = \left[1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right)^4 \right]^{-1}$ <p>*Demais equações ver em [86]</p>
Lin, <i>et al.</i> (2010) * ^R	[87]	Fick + D (t, T, h, de) + Convecção + Transf. de calor + Transporte de umidade	72	$D = D_0 f(t) f(T) f(h) f(de)$ <p>f(t) igual Maage <i>et al.</i> (1995) f(T): Equação de Arrhenius f(h) = h^k / k – Power index</p> $f(de) = 1 + \frac{D_{max}}{D_0} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{de}{K_1} \right)^{k_2} \right]^{-1} \right\}$
Universidade de Toronto (1999)* ^R	[88, 89]	Fick + D (t, T) + Convecção + Permeabilidade + <i>Wicking</i>	578	$D(t, T) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$ $\frac{\partial C_f}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_f}{\partial x} + \frac{\rho}{N} \frac{\partial C_h}{\partial t}$
Sub-difusão	[82]	investigações teóricas de Janett (2010) ¹	0	$\frac{\partial C}{\partial t} = D \propto D_t^{1-\alpha} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$
Bob (1996)	[51]	–	14	$d = 150 \left(\frac{cK_T K_h K_{c_r/cs}}{f_c} \right) \sqrt{T_1}$
Frente de ingresso de cloretos	[90]	–	49	Sem equações / graficamente se faz a frente de penetração de cloreto ao longo do tempo para cada tipo de concreto – únicos parâmetros são teor crítico obtido experimentalmente e cálculo da frente de ingresso de cloretos

*Obs: essa é a soma do número de citações que os artigos que aplicaram o modelo tiveram na base *Scopus* ou na base *Web of Science*, quando não tinha esse levantamento na primeira base.

PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES: A – coeficiente com equação / c – capacidade de fixação de cloretos em função do tipo de cimento / C₀ – concentração superficial inicial de cloreto / C_h – concentração de cloretos fixos / C_{cr} – teor crítico de cloretos / C_{em} – concentração de cloretos livres no ambiente / C_f – concentração de cloretos livres / C_i – concentração de cloretos inicial no concreto / C_s – concentração superficial de cloretos / C_{s,max} – concentração superficial máxima / C_{s,min} – concentração superficial mínima / C_{s,1} – concentração superficial depois de um ano de exposição / C_{s,Δx} – concentração de cloretos na profundidade Δx em um tempo específico / C_x = concentração de cloretos na profundidade x e tempo t / d – cobrimento (m) / de – decaimento do desempenho da estrutura de concreto / D – coeficiente de difusão (m²/s) / D₀ – D referência ou inicial / D_{app} – D aparente / D_c – D que leva em conta o tipo de cimento / D_{cr} – D na fissura / D_{eff} – D efetivo / D_{eq} – D equivalente / D_{fa} – D de concreto auto adensáveis com alta substituição de cinza volante / D_h – D da umidade / D_m – D médio / D_{max} – D máximo devido decaimento estrutural / D_{RMC} – coeficiente de migração obtido pelo ensaio / D_{unc} – D do concreto não fissurado / D_{w/c} – D que leva em conta a influência da relação a/c / D_α – coeficiente de sub-difusão do cloreto / Dt (1-α) – termo derivado da fração / erf = equação/ função de erro de Gauss / fa – teor de substituição de cinza volante / fc – resistência à compressão do concreto / h – umidade relativa do concreto / h_c – umidade relativa crítica (geralmente 0.75) / k – constante / K – parâmetro do modelo / Kc – tipo de cura / Ke – ambiental / Ktm – *test method* para medição do D / K¹ – permeabilidade do concreto à água líquida (kg/m.s.Pa) / K^v – permeabilidade do concreto ao vapor da água (kg/m.s.Pa) / m – age factor do C_s / n – age factor, ageing factor, fator de envelhecimento do D / N – porosidade do concreto / P_c – pressão capilar (Pa) / P_v – pressão do vapor d’água (Pa) / R = constante universal dos gases (8,314472 J/mol. K) / s_{cr} – distância entre fissuras / sf – teor de substituição do cimento por sílica ativa / sg – teor de substituição do cimento de escória / t – tempo / t₀ – tempo referência ou inicial / t_{ce} – tempo a partir do qual certa variável é admitida constante / t_{exp} – idade do concreto quando começou a exposição / t_i = tempo de início de corrosão / T – temperatura / T₀ – temperatura referência / U = energia de ativação do processo de difusão (J/mol) / v – velocidade média linear / w – abertura de fissuras / w/b – relação água cimento / x – profundidade (m) / xs – profundidade da zona superficial / Δx – profundidade da zona de convecção / ∇ – nabla – operador diferencial parcial / ρ – densidade do concreto / Φ – razão entre D da superfície e D da zona interior do concreto.

^R – Modelos citados pelos artigos de revisão aderidos / convecção de forma simplificada / D (t, T, h, de) – coeficiente de difusão variando conforme tempo, temperatura, umidade e decaimento estrutural, respectivamente / C_s (t) – concentração superficial variando com o tempo.

¹ P. Janett, Diffusion on fractals and space-fractional diffusion equations. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Naturwissenschaften, Dissertation (2010).

Tabela 5: Número de repetições dos modelos apresentado nos artigos aderidos.

MODELO	QUANTIDADE DE REPETIÇÕES
Segunda Lei de Fick	9
Life-365	6
Maage <i>et al.</i> (1995)	4
DuraCrete (2000)	4
DuraPGulf (2008)	3
<i>fib</i> (2006)	3
Smith (2001)	2
Saetta <i>et al.</i> (1993)	2
Universidade de Toronto (1999)	2

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente, é preciso destacar algumas propriedades da **Segunda Lei de Fick**. Essa lei, apresentada na Equação (1), modela a difusão de partículas em um meio homogêneo saturado (coeficiente de difusão independente da profundidade – x), devido a um gradiente de concentração [7].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Em que:

C = concentração da substância na solução na profundidade (x) e tempo (t); e

D = coeficiente de difusão.

A Segunda Lei de Fick pode ser utilizada para modelar o ingresso de cloretos por difusão no interior do concreto saturado, em regime não estacionário [20]. COLLEPARDI *et al.* (1972)² foram os primeiros a utilizar a Segunda Lei de Fick para cálculo do ingresso de cloretos no concreto [76]. A solução analítica dessa lei, proposta por CRANK (1975), considera as seguintes condições de contorno e está apresentada na Equação (2) (CRANK, 1975³ *apud* ALIZADEH *et al.* [75]):

$$C(x > 0 \text{ e } t = 0) = 0;$$

$$C(x = 0 \text{ e } t > 0) = C_s;$$

$$C(x = \infty \text{ e } t > 0) = 0.$$

Essas condições indicam que inicialmente o concreto não tem contaminação interna de cloretos, ou seja, abaixo da superfície a concentração de cloretos é nula. Além disso, a concentração na superfície do concreto permanece constante no valor C_s .

$$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (2)$$

Em que:

C_x = concentração de cloretos na profundidade “ x ” e tempo “ t ”;

C_s = concentração superficial de cloretos;

x = profundidade (m);

t = tempo (s);

D = coeficiente de difusão (m²/s);

erf = equação de erro de Gauss.

² M. Collepardi, A. Marcialis, R. Turriziani, Penetration of chloride ions into cement pastes and concrete. J. Am. Ceram. Soc. 55(10), 534–535 (1972).

³ J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, 2nd ed. (Clarendon Press, Bristol, 1975), 2nd Ed., Oxford Press, London.

Como condição de contorno, pode-se também considerar que o concreto tem uma concentração inicial de cloretos em toda a sua massa. Assim, a equação sofre pequena alteração ao se retirar esse teor dos cálculos. Entre os artigos selecionados, alguns autores consideraram uma concentração inicial de cloretos [66, 67, 81]. Por exemplo, VAN BREUGEL *et al.* [69] consideraram uma C_i de 0,01% de cloretos em relação à massa do cimento.

A Segunda Lei de Fick ignora o complexo processo que é o transporte iônico em materiais cimentícios saturados, por envolver interações físicas e químicas com outros íons em solução, bem como a fixação de cloretos pela pasta de cimento – na forma de sal de Friedel ou por meio de adsorção de íons pelo C-S-H. A Segunda Lei de Fick é válida para substâncias indissociáveis e não para movimento de íons, já que em uma solução iônica, como a solução do poro, a presença de cátions e ânions na solução gera campos elétricos internos que afetam o movimento e a velocidade de difusão dos íons [29, 91, 92]. Além disso, modelos baseados somente na Segunda Lei de Fick consideram a difusão como único mecanismo de transporte do cloreto nos poros do concreto. A rigor, isto representa uma simplificação da realidade, especialmente em concretos não saturados, submetidos a ciclos de molhagem e secagem, já que o transporte nesses casos também depende da convecção, fenômeno que envolve mecanismos de absorção capilar da água e que ocorre com frequência nas camadas do concreto de cobertura [93].

Conforme observado na Tabela 5, nove artigos diferentes aplicaram a solução de Crank para a Segunda Lei de Fick, aplicando a Equação (2) e considerando o D e C_s constantes. Porém, apesar da maioria ter calculado de forma determinística, três artigos calcularam de forma probabilística [50, 55, 57].

O modelo **RILEM (1996)** é baseado na Segunda Lei de Fick, porém, ao invés de solucionar a equação diferencial por meio da função de erro (solução de Crank), ele utiliza uma simplificação: uma função de parábola. Esse modelo foi aplicado por DO *et al.* [50] e comparado com a Segunda Lei de Fick (solução de Crank). Entre esses dois modelos, o RILEM é mais conservador, apresentando um tempo de início de corrosão menor.

Entre os modelos obtidos, muitos apresentaram modificações na Segunda Lei de Fick. Uma das principais modificações é considerar que o coeficiente de difusão (aparente ou efetivo) não é constante, mas sofre interferência de diferentes fatores, a saber: tempo, temperatura, umidade, decaimento estrutural, fissuras e fixação. Outra mudança recorrente é considerar que a concentração superficial varia conforme o tempo. Assim, na Tabela 4, os modelos entre Ann *et al.* (2009) e Dominicini (2016) apresentaram essas modificações, considerando a difusão como o único mecanismo de transporte, sendo modelos com diferentes graus de complexidade. Os modelos entre Zhang *et al.* (2019) e Universidade de Toronto (1999) consideraram, além da difusão, outros mecanismos de transporte, principalmente a convecção. Alguns inclusive modelaram o transporte de umidade e a transferência de calor.

Os últimos três modelos apresentados na Tabela 4 diferem um pouco dos demais: **sub-difusão**, **Bob (1996)** e **frente de ingresso de cloretos**. Eles serão melhor descritos na continuação do presente artigo, na parte 2.

5. CONCLUSÕES

Modelar o ingresso de cloretos no concreto, considerando a alta variabilidade e os diferentes parâmetros que influenciam nesse processo, é um grande desafio. Existem diversos modelos preditivos de vida útil de concretos em ambientes marinhos e algumas revisões da literatura sobre o assunto, porém há limitações no tocante a uma metodologia com critérios muito bem definidos em termos de levantamento bibliográfico sistemático, de forma a direcionar, substanciar e referendar os principais modelos utilizados no mundo.

Assim, após pesquisa em quatro bases internacionais (1381 publicações) e critérios de exclusões, foram obtidos 60 artigos aderidos e 38 modelos aplicados. A análise bibliométrica indicou que o presente tema representa um assunto relativamente recente, com o interesse crescendo de forma mais significativa a partir de 2008. Os autores, as instituições e os países recorrentes indicaram a grande participação da China, país com a maior quantidade de publicações (11), seguido pelo Canadá, Coreia do Sul, Brasil e Estados Unidos. A participação significativa do Brasil mostra o interesse de pesquisadores brasileiros pelo tema, já que o país possui extensa costa marítima. Observou-se que a maior parte dos artigos foi publicada em periódicos internacionais qualificados, com destaque para a *Construction and Building Materials*.

Por uma análise inicial, observou-se que a maioria dos modelos se baseou na Segunda Lei de Fick, propondo modificações por meio da solução de Crank dessa lei, com o objetivo de melhor prever o tempo de início da corrosão e, conseqüentemente, a vida útil da estrutura de concreto armado.

Os modelos mais citados foram, em ordem decrescente, Segunda Lei de Fick (solução de Crank, com D e C_s constantes), Life-365, Maage *et al.* (1995), DuraCrete (2000), DuraPGulf (2008), *fib* (2006), Smith (2001), Saetta *et al.* (1993) e Universidade de Toronto (1999). Todos estes baseados, principalmente, na Segunda Lei de Fick.

Em relação à soma de citações dos artigos aderidos, o modelo que se destaca é o da Universidade de Toronto (1999), com 578 citações dos dois artigos que aplicaram esse modelo [88, 89]. Isso indica a relevância desses artigos e dos modelos, bem como seu impacto no mundo científico, ponderando-se o seu tempo de publicação, que esteve entre os mais antigos dos artigos aderidos.

Uma análise qualitativa mais detalhada dos modelos foi realizada em complemento ao presente artigo, conteúdo este que consta na Parte 2 (um segundo artigo, submetido em paralelo a este). Nesse artigo (Parte 2), aprofunda-se na descrição conceitual dos modelos, na sua classificação e na sua aplicação de forma determinística ou probabilística. O conteúdo da Parte 2 é, portanto, complementar e essencial ao presente artigo, dentro da visão holística proposta na submissão conjunta dos dois artigos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANEEL—Agência Nacional de Energia Elétrica e a Furnas Centrais Elétricas pelo suporte financeiro destinado à realização da pesquisa, bem como à CAPES—Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao CNPq—Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelas bolsas concedidas de mestrado e de pesquisador, respectivamente.

7. REFERÊNCIAS

- [1] MEDEIROS, M.H.F., ANDRADE, J.J.O., HELENE, P., “Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto”, In: ISAIA, G.C. (org), *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1 ed. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2011.
- [2] POSSAN, E., DEMOLINER, C.A., “Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral”, *Revista técnico-científica do CREA-PR*, v. 1, pp.1–14, 2013.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação—Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15575 – Partes 1–6: Desempenho de Edifícios Habitacionais*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- [6] NEPOMUCENO, A.A., “Mecanismo de transporte de fluidos no concreto”, In: ISAIA, G.C. (org), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*, v. 2. São Paulo: IBRACON, 2005.
- [7] OLLIVIER, J.P., TORRENTI, J.M., “A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte”. In: OLLIVER, J.P., VICHOT, A. (org), *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo como ambiente*. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [8] CASTRO, A., *Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.
- [9] COUTO, A.B.P., *Influência das condições de cura nas características do cobrimento de diferentes concretos*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.
- [10] FERREIRA, R.B., *Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.
- [11] MALAGONI, M.A., *Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.
- [12] NGUYEN, M.H., NAKARAI, K., KAI, Y., *et al.*, “Early evaluation of cover concrete quality utilizing water intentional spray tests”, *Construction and Building Materials*, v. 231, pp.117–144, 2020.
- [13] KIM, J., MCCARTER, W.J., SURYANTO, B., “Cover-zone protective qualities under corrosive environments”, *Journal of Building Engineering*, v. 33, 101618, 2021.
- [14] OLIVEIRA, A.M., CASCUDO, O., “Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion”, *Construction and Building Materials*, v. 192, pp. 467–477, 2018.

- [15] CASCUDO, O., PIRES, P., CARASEK, H., *et al.*, “Evaluation of the pore solution of concretes with mineral additions subjected to 14 years of natural carbonation”, *Cement and Concrete Composites*, v. 115, 103858, 2020.
- [16] BRAUN, V., Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.
- [17] HELENE, P.R.L., “Introdução da durabilidade no projeto de estruturas de concreto”, *Ambiente Construído*, v. 1, n. 2, pp. 45–57, 1997.
- [18] BEUSHAUSEN, H., TORRENT, R., ALEXANDER, M.G., “Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs,” *Cement and Concr. Resear.*, v.119, p.11–20, 2019.
- [19] AKIYAMA, M., FRANGOPOL, D.M., TAKENAKA, K., “Reliability-based durability design and service life assessment of reinforced concrete deck slab of jetty structures”, *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 13, n. 4, pp. 468–477, 2017.
- [20] BAROGHEL-BOUNY, V., CAPRA, B., LAURENS, S., “A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento”, In: OLLIVER, J.P.; VICHOT, A. (org), *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo como ambiente*. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [21] CASCUDO, O., O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1 ed. São Paulo: Pini, 1997.
- [22] PANESAR, D.K., CHING, G.H., “Implications of coupled degradation mechanisms of cement-based materials exposed to cold climates”, *Internat. Journal of Mechanical Sciences*, v. 144, pp. 865–76, 2018.
- [23] TUUTTI, K., *Corrosion of steel in concrete*. Estocolmo: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [24] HELENE, P., “A Nova ABNT NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto”, In: *Anais do Seminário de Patologia das Construções*. Porto Alegre, 2004.
- [25] LI, Q., LI, K., ZHOU, X., *et al.*, “Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong–Zhuhai–Macau Sea link Project”, *Structural Safety*, v. 53, pp.1–12, 2015.
- [26] OSLAKOVIC, I.S., BJEGOVIC, D., MIKULIC, D., “Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environment”, *Materials and Structures*, v. 43, n. 10, pp. 1397–1412, 2010.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6118: “Projeto de Estruturas de Concreto–Procedimento”*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- [28] ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y EDIFICACIÓN (ONNCCE). *NMX-C-530: Industria de la Construcción – Durabilidad – Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Criterios y Especificaciones*. Ciudad de Mexico: ONNCCE, 2018.
- [29] SHI, X., XIE, N., FORTUNE, K., *et al.*, “Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview”, *Construction and Building Materials*, v. 30, pp. 125–138, 2012.
- [30] SONG, H.W., ANN, K.Y., PACK, S.W., *et al.*, “Factors influencing chloride transport and chloride threshold level for the prediction of service life of concrete structures”, In: *Proceedings of the International Conference on Durability of Concrete Structures*. Hangzhou, 2008. pp.131–144.
- [31] PEREIRA, C., HAMADYK, E., SILVA, A., “Probabilistic analysis of the durability of architectural concrete surfaces”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 77, pp.199–215, 2020.
- [32] SLIKA, W., SAAD, G., “An Ensemble Kalman Filter approach for service life prediction of reinforced concrete structures subject to chloride-induced corrosion”, *Construction and Building Materials*, v.115, pp. 132–142, 2016.
- [33] YANG, K.H., LIM, H.S., KWON, S.J., *et al.*, “Repair cost estimation techniques for reinforced concrete structures located at the seashore: Considering various probabilistic service life functions and actual mix proportions”, *Construction and Building Materials*, v. 256, 119469, 2020.
- [34] ANGST, U.M., “Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides”, *Cement and Concrete Research*, v. 115, pp. 559–567, 2019.
- [35] VIEIRA, D.R., MOREIRA, A.L.R., CALMON, J.L., *et al.*, “Service life modeling of a bridge in a tropical marine environment for durable design”, *Construction and Building Materials*, v. 163, pp. 315–325, 2018.

- [36] ZHANG, J., LOUNIS, Z., “Nonlinear relationships between parameters of simplified diffusion-based model for service life design of concrete structures exposed to chlorides”, *Cement and Concrete Composites*, v. 31, pp. 591–600, 2009.
- [37] BASTIDAS-ARTEAGA, E., SCHOEFS, F., “Stochastic improvement of inspection and maintenance of corroding reinforced concrete structures placed in unsaturated environments”, *Engineering Structures*, v. 41, pp. 50–62, 2012.
- [38] LI, K., TORRENT, R., “Analytical and experimental service life assessment of Hong Kong-Zhuhai-Macau Link”, In: *Proceedings of the 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2016*. Foz do Iguaçu, 2016.
- [39] DE JONG, P., BARRERO, T.B., TANAJURA, C.A.S., *et al.*, “Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model”, *Renewable Energy*, v. 141, pp. 390–401, 2019.
- [40] ASSOCIATION FRANCAISE DE GENIE CIVIL (AFGC). *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages*. Paris: AFGC, 2004.
- [41] POONGUZHALI, A., SHAIKH, H., DAYAL, R.K., *et al.*, “A review on degradation mechanism and life estimation of civil structures”, *Corrosion Reviews*, v. 26, n. 4, pp. 215–294, 2008.
- [42] GRANT, M.J., BOOTH, A., “A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies”, *Health Information and Libraries Journal*, v. 26, pp. 91–108, 2009.
- [43] TRANFIELD, D., DENYER, D., SMART, P., “Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review”, *British Journal of management*, v. 14, pp. 207–222, 2003.
- [44] OLIVEIRA, E.F.T., GRACIO, M.C.C., “Indicadores bibliométricos em ciência da informação: análise dos pesquisadores mais produtivos no tema estudos métricos na base Scopus”, *Perspectivas em Ciência da Informação*, v. 16, n. 4, pp. 16–28, 2011.
- [45] NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA (NRC). *Canada’s largest federal research and development organization*, 2020. <https://nrc.canada.ca/en/>
- [46] HOOTON, R.D., “Achieving concrete durability in chloride exposures”, *Key Engineering Materials*, v.711, pp 607–614, 2016
- [47] KHAN, M.U., AHMAD, S., AL-GAHTANI, H.J., “Chloride-induced corrosion of steel in concrete: An overview on chloride diffusion and prediction of corrosion initiation time”, *International Journal of Corrosion*, v. 2017, 5819202, 2017.
- [48] NILSSON, L.-O., “On the uncertainty of service-life models for reinforced marine concrete structures”, In: *Proceedings of the International Rilem Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structure*. Paris, 2000.
- [49] SMITH, B.G., CREVELING, M., TEIG, J.W. “Sustainable concrete mix designs for 100-year service life for bridges in san diego county coastal environments”, In: *Proceedings of Conference on Coastal Engineering Practice*. Florida, 2011. pp. 184–197.
- [50] DO, J., SONG, H., SO, S., *et al.*, “Comparison of deterministic calculation and fuzzy arithmetic for two prediction model equations of corrosion initiation”, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, v. 4, n. 2, pp. 447–454, 2005.
- [51] MEDEIROS-JUNIOR, R.A., LIMA, M.G., MEDEIROS, M.H.F., “Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport”, *Environment development and sustainability*, v. 17, pp. 1103–1119, 2015.
- [52] SAFEHIAN, M., RAMEZANIANPOUR, A.A., “Assessment of service life models for determination of chloride penetration into silica fume concrete in the severe marine environmental condition”, *Construction and Building Materials*, v. 48, pp. 287–294, 2013.
- [53] WU, L., LI, W., YU, X., “Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments”, *Construction and Building Materials*, v. 152, pp. 406–413, 2017.
- [54] ARYA, C., VASSIE, P., BIOUBAKHSH, S., “Chloride penetration in concrete subject to wet–dry cycling: influence of pore structure”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, v. 167, n. 6, pp. 343–354, 2014.
- [55] NOGUEIRA, C.G., LEONEL, E.D., “Probabilistic models applied to safety assessment of reinforced concrete structures subjected to chloride ingress”, *Engineering Failure Analysis*, v. 31, pp. 76–89, 2013.

- [56] PACK, S.W., JUNG, M.S., SONG, H.W., *et al.*, “Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment”, *Cement and Concrete Research*, v. 40, pp. 302–312, 2010.
- [57] POSSAN, E., ANDRADE, J.J.O., “Markov chains and reliability analysis for reinforced concrete structure service life”, *Materials Research*, v. 17, n. 3, pp. 593–502, 2014.
- [58] ANN, K.Y., AHN, J.H., RYOU, J.S., “The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures”, *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 1, pp. 239–245, 2009.
- [59] DOMINGUEZ, J.G., MENDOZA, C.G., “Durability of reinforced concrete applying some expert systems from the world wide web”, In: *Proceedings of the International Conference Achieving Sustainability in Construction*. Scotland, 2005. pp. 299–306.
- [60] KRISTIAWAN, S., GAN, B.S., NURROHMAH, S., “Estimating corrosion initiation period due to chloride ingress into reinforced self-compacting concrete incorporating high volume fly ash”, In: *Proceedings of the International Symposium on Civil and Environmental Engineering, ISCEE 2016*. Shenzhen, 2017.
- [61] KHATRI, R.P., SIRIVIVATNANON, V., “Characteristic service life for concrete exposed to marine environments”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 5, pp. 745–752, 2004.
- [62] MAAGE, M., HELLAND, S., POULSEN, E., *et al.*, “Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment”, *ACI Materials Journal*, v. 93, n. 6, 1996.
- [63] HEATH, K. “Marinas in the Arabian Gulf region”. In: ALEXANDER, M. (org) *Marine Concrete Structures*. 1 ed. United Kingdom: Woodhead Publishing, 2016. pp. 215–240,
- [64] KWON, S.J., NA, UJ., PARK, S.S., *et al.*, “Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion”, *Structural Safety*, v. 31, n. 1, pp. 75–83, 2009.
- [65] LEUNG, C.K., HOU, D., “Numerical simulation of chloride-induced corrosion initiation in reinforced concrete structures with cracks”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 3, 04014122, 2015.
- [66] ASHRAFI, H.R., RAMEZANIANPOUR, A.A., “Service life prediction of silica fume concretes”, *International Journal of Civil Engineering*, v. 5, n. 3, pp. 182–197, 2007.
- [67] DUAN, A., DAI, J.G., JIN, W.L., “Probabilistic approach for durability design of concrete structures in marine environments”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 2, A4014007, 2015.
- [68] PANG, L., LI, Q., “Service life prediction of RC structures in marine environment using long term chloride ingress data: Comparison between exposure trials and real structure surveys”, *Construction and Building Materials*, v. 113, pp. 979–987, 2016.
- [69] VAN BREUGEL, K., POLDER, R.B., DE ROOIJ, M.R., “Long-term performance of marine structures in the Netherlands – validation of predictive models for chloride ingress”. In: *Proceedings of 5th International Symposium on Life-Cycle Engineering*. Netherlands, 2016. pp. 1285–1294.
- [70] YU, B., NING, C.L., LI, B., “Probabilistic durability assessment of concrete structures in marine environments: Reliability and sensitivity analysis”, *China Ocean Engineering*, v. 31, n. 1, pp.63–73, 2017.
- [71] SMITH, B.G., “Durability of silica fume concrete exposed to chloride in hot climates”, *Journal of materials in civil engineering*, v. 13, n. 1, pp. 41–48, 2001.
- [72] FARAHANI, A., TAGHADDOS, H., SHEKARCHI, M., “Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment”, *Cement and Concrete Composites*, v. 59, pp.10–17, 2015.
- [73] BURRIS, L.E., RIDING, K.A., “Diffusivity of binary and ternary concrete mixture blends”, *ACI Materials Journal*, v. 111, n. 4, pp. 373–382, 2014.
- [74] JACIR, U., NAGI, M., “Evaluation of service life of reinforced concrete in the middle east – five year testing”, In: *Proceedings of European Corrosion Congress, EUROCORR 2016*. Paris, 2016.
- [75] ALIZADEH, R., GHODS, P., CHINI, M., *et al.*, “Effect of curing conditions on the service life design of RC structures in the Persian Gulf region”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 20, n. 1, pp. 2–8, 2008.
- [76] SHEKARCHI, M., GHODS, P., ALIZADEH, R., *et al.*, “Durapgulf, a local service life model for the durability of concrete structures in the south of Iran”, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 33, pp.78–88, 2008.
- [77] YU, Z., CHEN, Y., LIU, P., WANG, W., “Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying–wetting alternation condition chloride environment”, *Construction and Building Materials*, v. 93, pp. 205–213, 2015.

- [78] SHI, W., YU, Z., KUANG, Y., *et al.*, “Probability-based durability analysis of structural concrete under chloride salt environment”, *Applied Mechanics and Materials*, v. 166, pp. 1843–1847, 2012.
- [79] VAN DINH, D., “Initiation time of corrosion in reinforced concrete structures exposed to chloride in marine environment”, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, v. 8, n. 9, pp. 564–571, 2017.
- [80] ZHANG, Y., ZHOU, X., ZHANG, Y., *et al.*, “Randomness of bidirectional chloride corrosion of sluice gate and time to corrosion initiation of reinforcement in a strong tidal environment”, *Construction and Building Materials*, v. 227, 116707, 2019.
- [81] NIELSEN, C.V. “Service life modelling for chloride ingress in reinforced concrete”, In: *Proceedings of the 2017 fib Symposium*. Netherlands, 2017. pp. 2234–2243.
- [82] YOGALAKSHMI, N.J., RAO, K.B., ANOOP, M.B., “Durability-based service life design of RC structures – chloride-induced corrosion”. In: *Proceedings of the International Conference on Reliability, Safety and Hazard, ICRESH 2019*. Chennai, 2020. pp. 580–590.
- [83] DA COSTA, A., FENAUX, M., FERNÁNDEZ, J., SÁNCHEZ, E., MORAGUES, A., “Modelling of chloride penetration into non-saturated concrete: Case study application for real marine offshore structures”, *Construction and Building Materials*, v. 43, pp. 217–224, 2013.
- [84] HONG, S.I., ANN, K.Y., “Numerical prediction of chloride penetration in concrete exposed to a marine environment at tide”, *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2018, 7591576, 2018.
- [85] BOULFIZA, M., SAKAI, K., BANTHIA, N., *et al.*, “Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 100, n. 1, pp. 38–48, 2003.
- [86] SAETTA, A.V., SCOTTA, R.V., VITALIANI, R.V. “Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 90, n. 5, pp. 441–451, 1993.
- [87] LIN, G., LIU, Y., XIANG, Z., “Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments”, *Cement and Concrete Composites*, v. 32, pp. 571–579, 2010.
- [88] BODDY, A., BENTZ, E., THOMAS, M.D.A., *et al.*, “An overview and sensitivity study of a multimechanistic chloride transport model”, *Cement and Concrete Research*, v. 29, pp. 827–837, 1999.
- [89] THOMAS, M.D.A., BAMFORTH, P.B., “Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag”, *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 4, pp. 487–495, 1999.
- [90] CHEEWAKET, T., JATURAPITAKKUL, C., CHALEE, W., “Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site”, *Construction and Building Materials*, v. 37, pp. 693–698, 2012.
- [91] CHATTERJI, S., “Transportation of ions through cement-based materials. Part 1. Fundamental equations and basic measurement techniques”, *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 5, pp. 907–912, 1994.
- [92] CHATTERJI, S., “Transportation of ions through cement-based materials. Part 2. Adaptation of the fundamental equations and relevant comments”, *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 6, pp. 1010–1014, 1994.
- [93] LU, C., GAO, Y., CUI, Z., *et al.*, “Experimental analysis of chloride penetration into concrete subjected to drying-wetting cycles”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 12, 2015.