

Computational modeling for predicting corrosion initiation in reinforced concrete structures

Modelagem computacional para predição do período de iniciação da corrosão em estruturas de concreto armado

W. K. DOMINICINI ^a
wagner.kd@gmail.com

J. L. CALMON ^a
calmonbarcelona@gmail.com

Abstract

This article presents a model for penetration of chloride by diffusion in reinforced concrete structures based on the solution of the Fick's 2nd Law, using the finite element method (FEM) in two-dimensional domain. This model predicts the time, in a given situation, so that a certain limit of chlorides for depassivation of reinforcement is reached, characterizing the end of service life. Several approaches for the chloride surface concentration and for the diffusion coefficient are used, parameter which must be corrected due to the effects of temperature, solar radiation, exposure time, and relative humidity. Moreover, a parametric analysis is carried out in order to study the factors involved and their impact on the ingress of chlorides by diffusion, contributing to a better understanding of the phenomenon. In addition, the developed model is applied to the cities of Vitória (ES) and Florianópolis (SC) to analyze the service life for different concrete covers, making a comparison with the Brazilian standard.

Keywords: chlorides, corrosion, diffusion, finite element method, service life.

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo de penetração de cloretos por difusão em estruturas de concreto armado baseado na solução da 2ª Lei de Fick, utilizando o método dos elementos finitos (MEF) no domínio bidimensional. Este modelo prevê o tempo necessário, em determinada situação, para que um determinado limite de cloretos para a despassivação da armadura seja atingido, caracterizando o fim da vida útil. Utilizam-se diversas abordagens para a concentração superficial de cloretos e para o coeficiente de difusão, parâmetro que deve ser corrigido devido aos efeitos da temperatura, da radiação solar, do tempo de exposição e da umidade relativa. Além do mais, é realizada análise paramétrica visando o estudo dos fatores intervenientes e seus impactos na penetração de cloretos por difusão, de modo a contribuir para uma maior compreensão do fenômeno. Ademais, o modelo desenvolvido é aplicado às cidades de Vitória (ES) e Florianópolis (SC) analisando-se a vida útil para diferentes cobrimentos de concreto, fazendo um paralelo com a norma brasileira.

Palavras-chave: cloretos, corrosão, difusão, método dos elementos finitos, vida útil.

^a Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Vitória, ES, Brasil.

1. Introdução

O atual processo de mudança de paradigma da sociedade em relação ao sistema físico-ecológico dá força ao tema de desenvolvimento sustentável e, conseqüentemente, a indústria da construção civil é fortemente afetada, tornando a durabilidade das construções um dos assuntos mais discutidos. Estruturas duráveis impactam a sustentabilidade de duas formas: através da conservação de energia, matérias-primas e recursos naturais; e pela redução na quantidade de resíduos gerados. Além do notável fator econômico, uma vez que tem grande influência no custo do ciclo de vida.

Diversos são os fatores de degradação das estruturas de concreto armado, entretanto, especial atenção deve ser dada para a corrosão das armaduras, um dos problemas mais frequentes e que geram custos mais elevados de reparo. Helene [1] traz uma análise da importância econômica da corrosão de armaduras no mundo, com levantamentos nos Estados Unidos e Espanha sobre a incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto e seus impactos. Skainy (1987) *apud* Helene [1] aponta que, em 1985, o volume de recursos manipulados pela construção civil nos Estados Unidos foi de 300 bilhões de dólares/ano, sendo os custos de reparos estimados em 50 bilhões de dólares/ano, representando cerca de 16% do total do setor. Em todos os estudos apresentados, a corrosão se mostrou uma das manifestações patológicas de maior incidência e maiores custos de reparo.

No Brasil observa-se situação similar. Dal Molin [2], em levantamento de casos no estado do Rio Grande do Sul, destaca que, apesar da incidência de corrosão de armaduras nas edificações estudadas ser da ordem de 11% do total de manifestações patológicas encontradas, ao se considerar apenas as manifestações graves, com implicações na segurança estrutural, esta cifra sobe ao patamar de 40%, sendo a de maior incidência entre estas. Além disso, a autora salienta que a corrosão de armaduras demanda uma atitude imediata de recuperação e, normalmente, onerosa, uma vez que sua permanência pode significar risco à estabilidade da edificação.

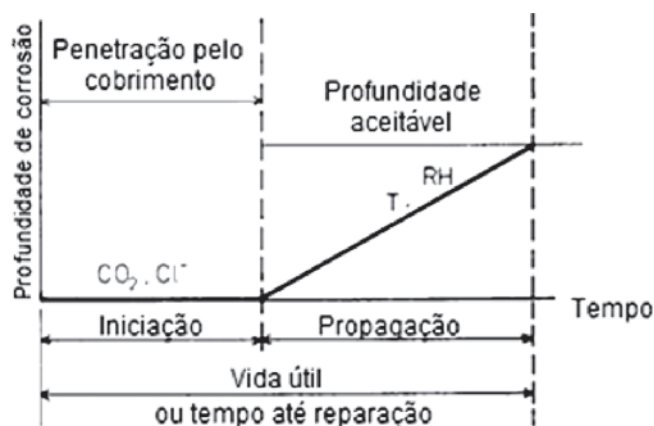


Figura 1
Modelo simplificado para vida útil associada à corrosão

Fonte: adaptado de Tuutti [6]

A corrosão em estruturas de concreto armado é um processo eletroquímico que requer a presença de um eletrólito, uma diferença de potencial e oxigênio. Entretanto, o processo de corrosão só terá início uma vez despassivada a armadura, ou seja, quando a fina camada de óxidos que envolve a armadura for rompida [3]. A despassivação da armadura acontece principalmente devido a dois mecanismos: carbonatação e ação de cloretos. Apesar da corrosão por carbonatação ocorrer de forma generalizada, o dano associado a ela usualmente se manifesta na forma de fissuração e deslocamento do cobrimento antes que uma redução significativa da seção da barra tenha ocorrido. Já no caso da ação de cloretos, pode-se ter como resultado uma perda extrema da área seccional da armadura antes que qualquer outra forma de deterioração possa ser detectada. Sendo este o mecanismo de corrosão mais estudado e que causa maiores prejuízos.

Na corrosão por ação de cloretos ocorre um acúmulo de íons cloreto na solução dos poros na região da armadura até que, ao se atingir uma quantidade crítica, decorre uma quebra localizada da camada passivadora [3]. Entre as fontes mais comuns de contaminação de cloretos no concreto estão aditivos ou agregados contaminados e a penetração de soluções de sais de degelo ou de água do mar através do cobrimento, que funciona como uma proteção física, dificultando a entrada de agentes agressivos externos [4].

A durabilidade das estruturas está intrinsecamente ligada ao conceito de vida útil. Dentre as diversas definições, destaca-se aquela apresentada por Andrade [5], em que considera vida útil como "aquela durante a qual a estrutura conserva todas as características mínimas de funcionalidade, resistência e aspectos externos exigíveis".

Um modelo simplificado para vida útil associada à corrosão foi proposto por Tuutti [6] e, desde então, vem sendo utilizado por praticamente a totalidade dos estudos. Nele, o processo de corrosão é dividido em duas etapas (Figura 1). O período de iniciação, que compreende o período de tempo até a despassivação da armadura, é normalmente o período mais longo e, no caso de ação de cloretos, sua duração depende da taxa de penetração de íons cloreto no concreto, da profundidade do cobrimento e da concentração limite de cloretos. O período de propagação é considerado como o tempo entre a despassivação da barra de aço, quando tem início o processo de corrosão propriamente dito, e o momento em que um grau inaceitável de corrosão é atingido, marcando o fim da vida útil da peça. Este período é consideravelmente mais curto e sua previsão é bastante complexa, devido à quantidade de fatores intervenientes e à dificuldade de obtenção de parâmetros de entrada precisos. Assim, é comum considerar o fim do período de iniciação como o fim da vida útil.

A norma brasileira NBR 6118 [7] ainda aborda a durabilidade de forma qualitativa, especificando cobrimentos mínimos e qualidades mínimas do concreto de cobrimento para assegurar a vida útil. Esta norma baseia-se em resultados anteriores, não oferecendo informações sobre a vida útil das estruturas. Entretanto, o maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos, gases e íons no concreto, possibilitam associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos. Assim, métodos deterministas permitem a avaliação da vida útil expressa em número de anos e não mais em critérios apenas qualitativos de adequação da estrutura a certo grau de exposição [8].

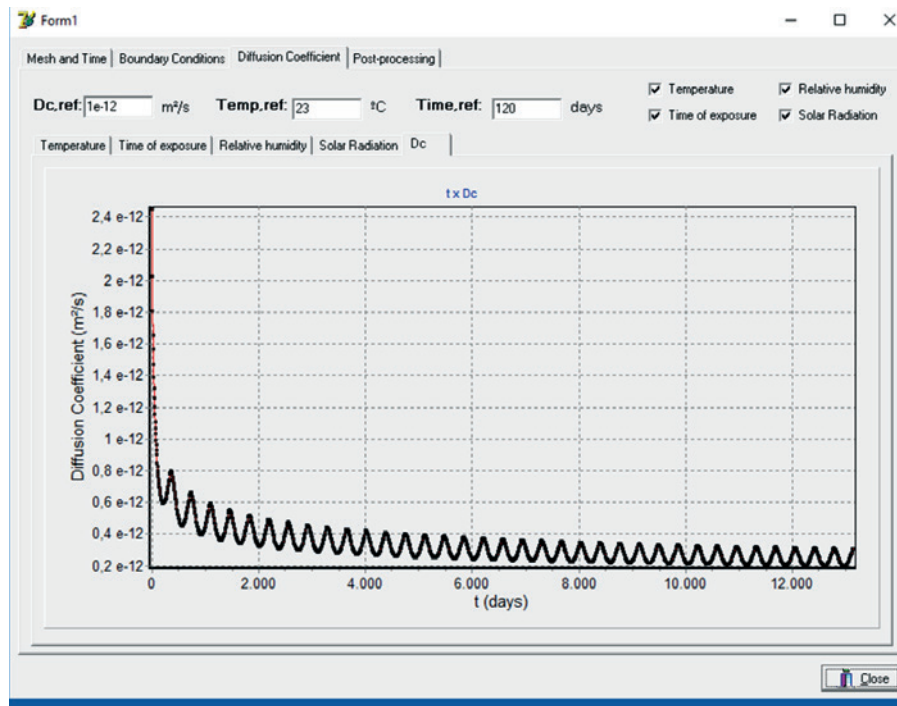


Figura 2
Interface do software desenvolvido

Consequentemente, há um esforço para modelar matematicamente o fenômeno de corrosão das armaduras, possibilitando a estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado a fim de orientar adequadamente as atividades de manutenção e permitir projetar com base na durabilidade, não somente na resistência mecânica e segurança estrutural.

Apesar de ser um tema muito estudado desde a década de 70, existem muitas lacunas no conhecimento dos processos de corrosão de armaduras. Uma quantidade considerável de modelos de previsão de vida útil já foi desenvolvida, entretanto, a existência de um grande número de fatores intervenientes, a falta de um entendimento preciso sobre os modelos físicos que abrangem esses fatores e a dificuldade na obtenção de parâmetros de entrada exatos, de estruturas reais e ao longo de grandes períodos, são enormes obstáculos encontrados em sua modelagem [9]. Desta forma, ainda não há uma abordagem amplamente aceita, sendo que esses modelos ainda não conseguiram alcançar efetivamente o mercado.

Assim, este trabalho apresenta um modelo de penetração de cloretos por difusão em estruturas de concreto armado utilizando o método dos elementos finitos (MEF) no domínio bidimensional. Este modelo prevê o tempo necessário, em determinada situação, para que um determinado limite de cloretos para a despassivação da armadura seja atingido. Este trabalho colaborará com o entendimento do fenômeno de corrosão em estruturas de concreto, além de servir como base para o desenvolvimento de futuros modelos, cada vez mais precisos na reprodução da realidade. Além do mais, é realizada análise paramétrica visando o estudo dos

fatores intervenientes e seus impactos na penetração de cloretos por difusão, de modo a contribuir para uma maior compreensão dos fenômenos envolvidos. Ademais, o modelo desenvolvido é aplicado à cidade de Vitória (ES) e Florianópolis (SC), utilizando os parâmetros climáticos locais, para analisar a vida útil para diferentes cobrimentos de concreto.

2. Modelo de difusão de cloretos

Esta seção fornece uma visão geral do *software* desenvolvido e apresenta o modelo utilizado. O programa foi desenvolvido utilizando Object-Pascal (Delphi® 7.0), uma linguagem orientada a objetos, no ambiente Windows® e é baseado no método dos elementos finitos (MEF) no domínio bidimensional. É utilizado um *software* externo livre (GMSH¹) para a geração de malhas. Entretanto, todo o restante dos procedimentos é efetuado pelo próprio programa, através de interface amigável (Figura 2) e janelas de entrada de dados que permitem a manipulação de todos os parâmetros considerados. O programa foi desenvolvido baseado em Tavares [10], com a inserção de diferentes modelos para concentração superficial e a implementação da influência da radiação solar e do efeito pele.

Este trabalho apresenta um modelo de penetração de cloretos em estruturas de concreto armado por difusão baseado na solução da 2ª Lei de Fick (Equação 1).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

¹ <http://gmsht.info/>

Onde C é a concentração de cloretos, t o tempo, x e y as coordenadas espaciais e D é o coeficiente de difusão aparente de cloretos.

Este modelo prevê a evolução da concentração de cloretos com o tempo, assim como o tempo necessário, em determinada situação, para que o limite de cloretos para a despassivação da armadura seja atingido. Utilizam-se diversas abordagens para a concentração superficial de cloretos e para a estimativa do coeficiente de difusão, parâmetro que deve ser corrigido devido a efeitos da temperatura, do tempo de exposição e da umidade relativa, de modo a estimar a vida útil da peça estudada.

2.1 Coeficiente de difusão

Diversos estudos mostram que a suposição sugerida por Crank [11], na qual o coeficiente de difusão é constante, não está correta [12,13]. Esta variação no tempo leva a grandes implicações para previsões de longo prazo da penetração de cloretos e, assim, um valor constante pode levar a graves erros [12]. Desta forma, o *software* desenvolvido neste trabalho possibilita, além da escolha de um coeficiente de difusão constante, a consideração do efeito da temperatura, da radiação solar, da umidade relativa, do tempo de exposição e do efeito pele.

O coeficiente de difusão é determinado a partir de um coeficiente de referência, medido em laboratório e influenciado por vários parâmetros internos, como dosagem, cura e composição do concreto, multiplicado por uma série de funções, utilizadas para modelar a influência da hidratação do cimento e do ambiente onde o concreto está localizado (Equação 2).

$$D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h) \tag{2}$$

Onde $D_{c,ref}$ é o coeficiente de difusão de referência, medido à temperatura e tempo especificados, $f_1(T)$ considera a influência da temperatura e da radiação solar, $f_2(t_e)$ do grau de hidratação e $f_3(h)$ da umidade relativa dos poros.

2.1.1 Efeito da temperatura

O efeito da temperatura no coeficiente de difusão é estimado através da equação de Arrhenius (Equação 3), que expressa a variação de uma reação química com a temperatura.

$$f_1(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \tag{3}$$

Onde U é a energia de ativação do processo de difusão de cloretos (kJ/mol), R é a constante dos gases (kJ/K . mol), T_{ref} é a temperatura de referência na qual o coeficiente de difusão foi medido (K) e T é a temperatura no concreto (K). A sensibilidade térmica de uma reação é indicada pela energia de ativação, que é a quantidade de energia necessária para que uma reação ocorra. Page *et al.* [14] sugere valores para a energia de ativação da difusão em pastas de cimento de (41,8 +- 4,0) kJ/mol , (44,6 +- 4,3) kJ/mol e (32,0 +- 2,4) kJ/mol para relações água/cimento de 0,4 , 0,5 e 0,6, respectivamente.

Para modelar matematicamente a variação da temperatura no concreto, o *software* desenvolvido utiliza uma função senoidal. A

Equação 4, definida a partir da temperatura máxima anual (T_{max}), da temperatura mínima anual (T_{min}) e do dia em que ocorre a maior temperatura (day_{max}), determina a temperatura (T) para um determinado dia do ano (t).

$$T = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \times \sin \left(\frac{t}{365} \times 2\pi + \left(0,5 - \frac{2 \times day_{max}}{365} \right) \times \pi \right) \tag{4}$$

2.1.2 Efeito da radiação solar

A radiação emitida pelo Sol e incidente na atmosfera terrestre causa um aumento de temperatura nas estruturas. Esta variação tem influência direta no coeficiente de difusão de cloretos. Apesar dessa influência, este ainda é um assunto pouco abordado e sua consideração é uma inovação apresentada neste modelo. A radiação solar é considerada na função multiplicativa $f_1(T)$ (Equação 3) a partir de um acréscimo na temperatura exterior.

Na ausência de medições específicas de radiação solar para determinado local, pode-se dispor dos dados presentes no Atlas Solarimétrico do Brasil [15]. Estes dados se referem à radiação solar global diária em média mensal recebida por uma superfície horizontal para cada mês. Conforme os dados disponíveis, a obtenção da radiação solar total diária em uma superfície inclinada se dá a partir da radiação global sobre uma superfície horizontal. Para tanto, deve-se conhecer as componentes direta e difusa da radiação na superfície horizontal. A radiação direta é aquela recebida do sol sem ter sido dispersa pela atmosfera e a radiação difusa aquela recebida do sol após sua direção ter sido alterada pela atmosfera [16].

O método proposto por Liu e Jordan (1963, 1967) *apud* Agullo [17], permite estimar a radiação diária difusa, H_d , a partir da radiação global diária em média mensal, H_o , segundo a Equação 5.

$$H_d = H_o \cdot (1,39 - 4,027K_T + 5,531K_T^2 - 3,108K_T^3) \tag{5}$$

Onde, K_T é o índice de nebulosidade médio mensal, definido pelo coeficiente entre a radiação global diária, média mensal, H_o e a radiação solar extraterrestre, média mensal, H_e (Equação 7). O método para obtenção da radiação solar diária em uma superfície inclinada apresentado a seguir é utilizado por Agullo [17], sendo descrito também por Duffie e Beckman [16].

$$K_T = \frac{H_o}{H_e} \tag{6}$$

A radiação solar extraterrestre pode ser encontrada pela expressão:

$$H_e = \frac{24}{\pi} \cdot r^2 \cdot I_{sc} (\cos \delta \cos \phi \sin h_s + h_s \sin \delta \cos \phi) \tag{7}$$

Onde:

r^2 : fator corretor da constante solar para cada dia do ano (Equação 8);

I_{sc} : constante solar $I_{sc}=4870,8$ KJ/hm²;

ϕ : latitude da superfície;

δ : declinação solar;

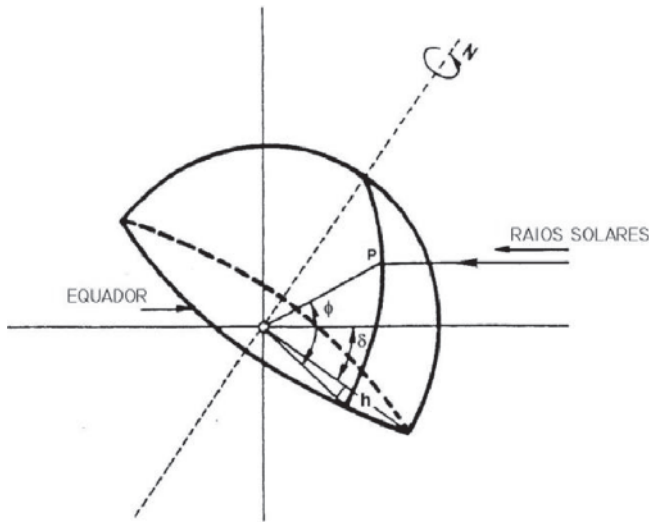


Figura 3
Latitude, ângulo horário e declinação solar

Fonte: adaptado de Agullo [16]

h_s : módulo do ângulo horário correspondente ao pôr do sol (radianos).

$$r^2 = 1 + 0,033 \cos \frac{360 Z}{365} \quad 1 \leq Z \leq 265 \quad (8)$$

O ângulo horário e a declinação são as coordenadas que definem a posição do sol em respeito a um ponto P na superfície terrestre (Figura 3). Segundo Duffie e Beckman [16]: a latitude (ϕ) é a localização angular ao norte ou ao sul do equador, sendo de valor nulo no equador, $+90^\circ$ no polo norte e -90° no polo sul; a declinação solar (δ) é a posição angular do sol do meio-dia solar em relação ao plano do equador, norte positivo ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$); o ângulo horário (h) é o deslocamento angular do sol a leste ou oeste do meridiano local devido à rotação da Terra sobre seu eixo, a 15° por hora (360° em 24 horas) - sendo nulo quando o sol passa pelo meridiano do ponto (meio-dia solar), positivo a tarde e negativo pela manhã. A declinação pode ser encontrada pela Equação 9:

$$\delta = \frac{180}{\pi} \left(\begin{array}{l} 0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - \\ 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - \\ 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B \end{array} \right) \quad (9)$$

Onde B é dado por:

$$B = \frac{360}{365} (n - 1) \quad (10)$$

Sendo n o enésimo dia do ano.

O ângulo horário correspondente ao pôr do sol pode ser obtido pela Equação 11:

$$h_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (11)$$

Ficando assim definida a componente de radiação difusa (H_d).

A componente direta da radiação, H_b , se obtêm pela diferença entre a radiação global diária e sua componente difusa (Equação 12).

$$H_b = H_0 - H_d \quad (12)$$

Após cálculo das componentes difusa e direta da radiação global diária, média mensal, em uma superfície horizontal, pode-se obter as radiações horárias no intervalo compreendido entre o nascer e o pôr do sol na localização estudada. Para tanto, deve-se conhecer a duração do dia solar, definido em relação ao tempo solar verdadeiro (TSV). TSV é o tempo baseado no movimento angular aparente do sol, com meio-dia solar quando o sol cruza o meridiano do observador, que não coincide com o horário local [16].

A hora inicial e a hora final do dia solar são definidas pela Equação 13 e Equação 14, respectivamente [17].

$$TSV_i = 12 - \frac{1}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (13)$$

$$TSV_f = 12 + \frac{1}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (14)$$

Assim, as radiações horárias, global e difusa, para cada hora do dia solar, podem ser obtidas, respectivamente, pelas Equações 15 e 16.

$$H_{h,0} = r_t \cdot H_0 \quad (15)$$

$$H_{h,d} = r_d \cdot H_d \quad (16)$$

Nas quais os fatores r_t e r_d , definidos em função do ângulo horário, são determinados a partir das Equações 17 e 18, respectivamente.

$$r_d = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos h - \cos h_s}{\sin h_s - h_s \cos h_s} \quad (17)$$

$$r_t = \frac{\pi}{24} \cdot (a + b \cos h) \cdot \frac{\cos h - \cos h_s}{\sin h_s - h_s \cos h_s} \quad (18)$$

Onde h é o ângulo horário, obtido por:

$$h = (TSV - 12) \cdot 15 \quad [graus] \quad (19)$$

$$a = 0,4090 + 0,5016 \sin(h_s - 60) \quad (20)$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \sin(h_s - 60) \quad (21)$$

A radiação horária direta é encontrada pela diferença entre a radiação horária global e a radiação horária difusa.

$$H_{h,b} = H_{h,0} - H_{h,d} \quad (22)$$

Uma vez obtidas as componentes horárias, direta e difusa, da radiação solar em uma superfície horizontal, pode-se determinar a radiação incidente em uma superfície inclinada. A componente direta em uma superfície inclinada pode ser expressa pela Equação 23.

$$I_{h,b} = R_b \cdot H_{h,b} \quad (23)$$

Onde o fator R_b é dado pela razão entre o cosseno do ângulo de incidência dos raios solares (θ) e o cosseno do ângulo zenital (ψ).

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \psi} \quad (24)$$

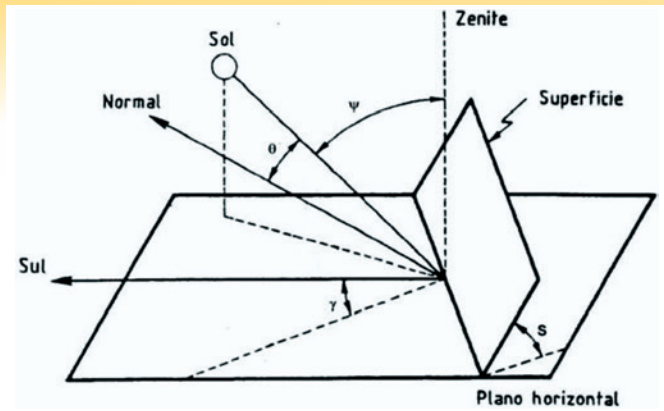


Figura 4
 Incidência de raios solares em superfície inclinada
 Fonte: adaptado de Agullo [16]

Sendo, onde S é o ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos S - \sin \delta \cos \phi \sin S \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos S \cos h + \cos \delta \tag{25}$$

$$\cos \psi = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \tag{26}$$

Segundo Duffie e Beckman [16]: o ângulo de incidência dos raios solares (θ) é o ângulo entre a radiação direta em uma superfície e a normal a essa superfície; o ângulo zenital (ψ) é o ângulo entre a vertical e uma linha até o sol; o azimute da superfície (γ) é o desvio da projeção, num plano horizontal, da normal à superfície, com zero no sul, leste negativo e oeste positivo (Figura 4).

Ao se utilizar a Equação 25, o ângulo θ pode exceder 90° , o que significa que o sol está atrás da superfície. Além disso, é necessário assegurar que a terra não está bloqueando o sol, ou seja, que o ângulo horário está entre o nascer e o pôr do sol.

Utilizando-se o modelo de radiação difusa isotrópica, proposto por Liu e Jordan (1963) *apud* Duffie e Beckman [16], a radiação na superfície inclinada é considerada como três componentes: radiação direta, radiação difusa isotrópica e radiação refletida pelo terreno. Uma superfície inclinada de em ângulo S com a horizontal tem um fator de visão do céu de $F_c = (1 + \cos S) / 2$. Assim, a componente difusa sobre a superfície inclinada é:

$$I_{h,d} = \frac{1 + \cos S}{2} H_{h,d} \tag{27}$$

A superfície inclinada tem um fator de visão do terreno de $F_T = (1 - \cos S) / 2$ e, se o entorno tem um coeficiente de reflexão ρ , a radiação refletida do terreno para a superfície é:

$$I_{h,r} = \rho \cdot \frac{1 - \cos S}{2} \cdot (H_{h,d} + H_{h,b}) \tag{28}$$

A Tabela 1 apresenta valores típicos do coeficiente de reflexão. A radiação solar total horária incidente na superfície inclinada será obtida pela soma das componentes horárias direta, difusa e refletida (Equação 29).

$$I_h = I_{h,b} + I_{h,d} + I_{h,r} \tag{29}$$

Finalmente, a radiação solar total diária na superfície inclinada, I_d , é calculada como a soma das radiações horárias no intervalo de horas de sol, desde o nascer do sol até o pôr do sol. Segundo Stucky e Derron [18], o concreto não é um corpo negro e, assim, apenas parte da energia recebida por insolação e outros fenômenos é

absorvida, podendo-se considerar, para a zona de comprimentos de onda em questão, de 50 a 70% de absorção. Os autores também afirmam que o efeito desta energia recebida por radiação no cálculo da temperatura do concreto pode ser considerado como um aumento da temperatura exterior, segundo a Equação 30.

$$\Delta T = (0,50 \text{ a } 0,70) \frac{I_d [MJ/m^2 \text{ dia}]}{24 [h/dia] \cdot \alpha [MJ/m^2 h^\circ C]} \tag{30}$$

Onde I_d é a radiação solar total diária e α é o coeficiente de transmissão no contato ar-concreto, que pode variar, dependendo da intensidade das correntes de convecção e de vento incidentes sobre a superfície, de 15 a 40 Cal/m²h°C [18].

2.1.3 Efeito do tempo de exposição

A continuação da hidratação do cimento leva a uma redução da porosidade do concreto. Assim, o envelhecimento do concreto, a depender do tipo de cimento, leva a uma queda significativa no coeficiente de difusão com o tempo e, portanto, desconsiderar esse mecanismo pode levar a previsões muito conservadoras do tempo de corrosão [13]. A dependência com o tempo é considerado através da Equação 31.

$$f_2(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \tag{31}$$

Onde t_{ref} é o tempo no qual foi determinado o coeficiente de difusão de referência (s), t é o tempo de exposição (s) e m é o fator de redução com a idade. Bamforth (1998) *apud* Martín-Pérez [19] propõe valores de m de 0,264 para concretos de cimentos Portland comum, 0,699 para concretos com cinzas volantes e 0,621 para concretos com escória granulada de alto-forno. Vale ressaltar que, para aumentar a confiabilidade das previsões, são necessários mais estudos abordando o fator de redução “m” para diversos tipos e teores de adições.

2.1.4 Efeito da umidade

O efeito da umidade no coeficiente de difusão tem grande importância, uma vez que o processo de difusão só ocorre na presença de água nos poros. Assim, Saetta *et al.* (1993) *apud* Martín-Pérez

Tabela 1
 Coeficiente de reflexão do entorno

Tipo de solo	ρ
Neve recente	80-90%
Neve não recente	60-70%
Terrenos de cultivo:	-
Sem vegetação	10-15%
Gramma seca	28-32%
Prado e florestas	15-30%
Terreno arenoso	15-25%
Cimento, concreto	55%
Areia clara	25-40%
Água:	-
Verão	5%
Inverno	18%

Fonte: Coronas *et al.* (1982) *apud* Agullo (1991)

[19] propõe que a redução na difusividade com a perda de umidade pode ser expressa pela Equação 32.

$$f_3(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1+h_c)^4} \right]^{-1} \quad (32)$$

Onde h é a umidade relativa nos poros do concreto e h_c é a umidade na qual o coeficiente de difusão cai para o valor intermediário entre seu valor máximo e mínimo, Bazant e Najjar *apud* Martín-Pérez [19] assumem este valor como 0,75 para o concreto em secagem.

Assim como no caso da temperatura, para modelar matematicamente a variação da umidade relativa nos poros do concreto ao longo do ano, o *software* desenvolvido utiliza uma função senoidal (Equação 33), definida a partir da umidade máxima anual, da umidade mínima anual e do dia em que ocorre a maior umidade.

$$h = \frac{h_{min} + h_{max}}{2} + \frac{h_{max} - h_{min}}{2} \times \sin\left(\frac{t}{365} \times 2\pi + \left(0,5 - \frac{2 \times dia_{máx}}{365}\right) \times \pi\right) \quad (33)$$

2.1.5 Efeito Pele

A “pele” de concreto é a zona mais próxima à superfície do cobrimento. Ela geralmente possui composição diferente daquela das camadas mais internas, devido a fenômenos como o contato com as formas, carbonatação, precipitação de brucita – o concreto exposto à água do mar pode ter sua resistividade aumentada pela formação de uma fina camada superficial de brucita ($Mg(OH)_2$) [20] –, segregação dos agregados e até mesmo quando o concreto apresenta algum revestimento ou pintura [21]. A existência de uma camada superficial com uma difusividade diferente irá causar uma alteração nos perfis de concentração de cloretos. Valores de difusividade da pele superiores podem ocorrer quando a pele está carbonatada e quando os cloretos penetram por sucção capilar. O caso oposto, com difusividade inferior, ocorre quando há algum efeito barreira na superfície, como precipitação de brucita ou utilização de pintura de revestimento [21,22].

Andrade *et al.* [21] modela o efeito pele considerando valores diferentes para a difusividade da camada superficial e do interior, abordagem empregada também neste trabalho. Sendo que a concentração de cloretos no limite entre a pele e o interior passa a ser a concentração superficial (condição de contorno) do interior de concreto (Figura 5).

2.2 Condições de contorno

Para resolver a equação de Fick é necessário definir as condições de contorno do problema. É comum a consideração de valor nulo para a concentração inicial de cloretos, entretanto, caso haja contaminação dos ingredientes da mistura, esse valor pode ser especificado.

A concentração superficial de cloretos é comumente considerada como um valor constante, entretanto, Costa e Appleton [12] salientam que ela é variável no tempo e esta aproximação

pode ocasionar grandes erros para previsões de longo prazo. De fato, Andrade *et al.* [23] demonstram a importância da concentração superficial comparando oito modelos de difusão. Os resultados indicam que a concentração superficial assume papel muito mais significativo do que o coeficiente de difusão, tema que costuma atrair um número muito maior de estudos, o que está em consonância com análises paramétricas realizadas por outros autores [24,25]. Os autores concluem afirmando que um fator crucial é ter uma lei de evolução da concentração superficial consistente. Assim, o *software* desenvolvido possibilita cinco abordagens diferentes, sendo uma delas a adoção de um valor constante. Também é possível selecionar quais superfícies da peça estão sujeitas a penetração de cloretos. A abordagem apresentada por Uji *et al.* [26] propõe uma expressão para a condição de contorno em que a concentração superficial tende a aumentar com o tempo de serviço da estrutura, de acordo com uma função linear da raiz da idade do concreto (Equação 34).

$$C_s = S\sqrt{t} \quad [\% \text{ peso de concreto}] \quad (34)$$

Onde S é um coeficiente dependente do tipo de estrutura e zona de exposição [$1/\sqrt{s}$] e t é o tempo de exposição [s]. Os intervalos de valores encontrados pelos autores para S foram de (5,31–16,6 x 10^{-6} $1/\sqrt{s}$) para a zona de respingos, (18,2–23,5 x 10^{-6} $1/\sqrt{s}$) para a zona de maré e (1,56–5,57 x 10^{-6} $1/\sqrt{s}$) para a zona atmosférica. Em outra abordagem, proposta por Collins e Grace [27], após um

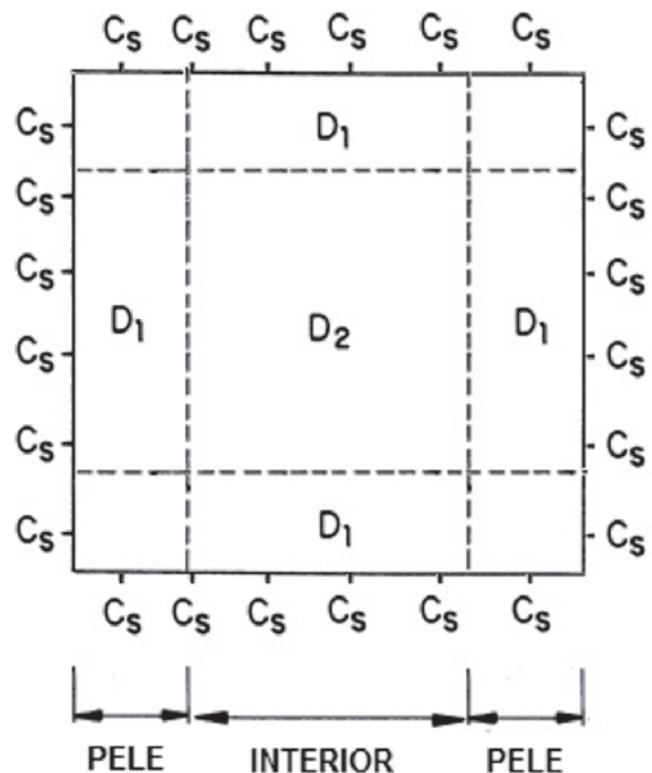


Figura 5
Efeito pele

Fonte: adaptado de Andrade *et al.* [20]

Tabela 2

Resumo dos modelos de concentração superficial de cloretos

Autores	Equação	Descrição
-	$C_s = cte$	Constante durante toda a vida útil da estrutura
Uji <i>et al.</i> (1990)	$C_s = S\sqrt{t}$	Aumenta com o tempo de exposição
Collins e Grace (1997)	$C_s = C_{s,ult} \cdot \frac{t}{t + T_{CS}}$	Após um aumento inicial nos primeiros anos, torna-se constante
Ann <i>et al.</i> (2009)	$C_s = C_0 + k\sqrt{t}$	Apresenta um acúmulo inicial e aumenta com o tempo de exposição
Song <i>et al.</i> (2008)	$C_s = C_0 + \alpha \ln t$	Apresenta um acúmulo inicial e aumenta com o tempo de exposição

aumento inicial, a concentração superficial atinge um valor limite, tornando-se constante (Equação 35). Segundo os autores, a magnitude deste limite está relacionada com o sistema cimentício e com a porosidade da camada superficial.

$$C_s = C_{s,ult} \cdot \frac{t}{t + T_{CS}} \quad [\% \text{ peso de concreto}] \quad (35)$$

Onde $C_{s,ult}$ é a concentração superficial final, constatada pelos autores como 0,6% para um concreto de cimento Portland comum com uma relação água cimento de 0,4 e teor de cimento de 450 kg/m³, t é o tempo de exposição (dias) e T_{CS} é um parâmetro que regula a taxa de acúmulo de cloretos na superfície do concreto (dias).

Como a concentração superficial de cloretos utilizada pelos trabalhos acima é dada em % de peso de concreto, seu equivalente em peso de cimento pode ser obtido a partir do teor de cimento no concreto (kg/m³), segundo a Equação 36.

$$C_s \text{ [% de peso de cimento]} = C_s \text{ [% de peso de concreto]} \cdot \left(\frac{2300}{\text{teor de cimento [kg/m}^3\text{]}} \right) \quad (36)$$

Ann *et al.* [28] e Song *et al.* [29] apresentam modelos que consideram um acúmulo inicial de cloretos na superfície que, em seguida, aumenta com o tempo de exposição, a partir das Equações 37 e 38, respectivamente.

$$C_s = C_0 + k\sqrt{t} \quad [\% \text{ peso de cimento}] \quad (37)$$

Onde k é a constante sob uma condição de acúmulo linear, t o tempo de exposição e C_0 é o acúmulo inicial de cloretos na superfície.

$$C_s = C_{s0} + \alpha \ln t \quad [\% \text{ peso de cimento}] \quad (38)$$

Onde C_{s0} é a concentração superficial em um tempo padrão (e.g. 28 dias) e α um parâmetro constante a ser determinado para os dados utilizados.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos modelos de concentração superficial de cloretos implementados no *software* desenvolvido.

3. Análises paramétricas

O fenômeno de transporte de cloretos, de acordo com o modelo proposto, envolve diversos parâmetros que caracterizam a geometria, o material e as condições ambientais. Este trabalho se propõe a avaliar a influência na penetração de cloretos de: parâmetros climáticos, tempo de exposição, de acordo com a adição utilizada no concreto, e diferentes abordagens de concentração superficial de cloretos (condições de contorno). A Tabela 3 expõe as variáveis de controle referentes à geometria e

Tabela 3

Análise paramétrica: variáveis de controle (geometria e tempo)

Variáveis de controle		Valor
Geometria	Dimensões	8 cm x 8 cm
	Cobrimento de concreto	3 cm
Malha	Tipo de elementos	Triangular linear
	Tamanho do elemento	0.002
	Número de nós	2141
	Número de elementos	4088
Parâmetros de tempo	Tempo final (T)	50 anos
	Passo de tempo (dt)	5 dias

Tabela 4

Análise paramétrica: variáveis de controle

Variáveis de controle		Valor
Condições de contorno	Concentração inicial (C_0)	0 %
	Concentração superficial de cloretos (C_s)	2 % peso de cimento
Coeficiente de difusão	Coef. de difusão de referência ($D_{c,ref}$)	1×10^{-12} m ² /s
	Temperatura de referência (T_{ref})	23 °C
	Energia de ativação (U)	41,8 kJ/mol
	Parâmetro de umidade h_c	0,75

aos parâmetros de tempo, comuns a todos os estudos realizados. As demais variáveis estão apresentadas em cada análise. É importante salientar que este estudo não visa encontrar valores exatos para a concentração de cloretos. Em vez disso, os resultados obtidos devem ser contemplados em um contexto relativo, demonstrando o nível de influência de cada parâmetro no período de iniciação da estrutura.

3.1 Influência de parâmetros climáticos na penetração de cloretos

i. Temperatura e umidade

Por serem duas cidades do litoral brasileiro e apresentarem valores de temperatura e umidade ambiente bastante distintos, as cidades de Florianópolis (SC, Brasil) e João Pessoa (PB, Brasil) foram escolhidas para esta análise. Além destas cidades, Vancouver (BC, Canadá) foi selecionada por ser uma cidade litorânea de clima consideravelmente mais frio e seco.

Os efeitos da temperatura e da umidade são modelados a partir das funções $f_1(T)$ e $f_3(h)$, presentes na Equação 2. Como referência foi utilizado um caso com coeficiente de difusão constante no tempo, ou seja, desconsiderando-se a influência dos parâmetros climáticos.

Para esta análise, a concentração superficial de cloretos foi man-

tida constante no tempo e os efeitos do grau de hidratação e do efeito pele não foram considerados, de modo a facilitar a interpretação dos resultados quanto aos parâmetros que se objetiva estudar. Encontram-se, na Tabela 4, as variáveis de controle que compõem este estudo e seus respectivos valores. A concentração superficial de cloretos (C_s) e o coeficiente de difusão de referência ($D_{c,ref}$) foram escolhidos dentro dos intervalos encontrados na literatura [10,12,26,28,29].

Devido à falta de dados mais precisos, a temperatura e umidade relativa dos poros do concreto foram consideradas em equilíbrio com a atmosfera. Como já relatado por Andrade *et al.* [30], a temperatura no interior do concreto é bastante similar à temperatura externa. Os dados climáticos das cidades de Florianópolis (SC, Brasil) e João Pessoa (PB, Brasil) foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET²), para o intervalo de 1961 a 1990, e os dados da cidade de Vancouver (BC, Canadá), do Departamento de Meio Ambiente e Mudança Climática do Canadá (ECCC³), de 1981 a 2010. Os valores utilizados como dados de entrada no *software* estão expostos na Tabela 5.

ii. Radiação solar

Este estudo foi efetuado para as cidades de João Pessoa (PB) e Florianópolis (SC) com os mesmos parâmetros do item anterior, acrescentando-se aqueles referentes à radiação solar.

Tabela 5

Análise paramétrica: parâmetros climáticos anuais

Parâmetros climáticos		Florianópolis (SC)	João Pessoa (PB)	Vancouver (BC)
Temperatura	Máxima (°C)	24,6	27,2	18
	Mínima (°C)	16,5	24,2	3,6
	Dia de máxima anual	45	45	210
Umidade relativa	Máxima (%)	84	87	81,2
	Mínima (%)	80	73	61,4
	Dia de máxima anual	195	195	15

² <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?=&clima/normaisclimatologicas>

³ http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_e.html?stnID=889&autofwd=1

Tabela 6

Análise paramétrica: parâmetros de radiação solar – João Pessoa (PB) e Florianópolis (SC)

JAN		FEV		MAR		ABR	
João Pessoa	Florianópolis	João Pessoa	Florianópolis	João Pessoa	Florianópolis	João Pessoa	Florianópolis
22	18	20	16	20	14	18	12
MAI		JUN		JUL		AGO	
João Pessoa	Florianópolis	João Pessoa	Florianópolis	João Pessoa	Florianópolis	João Pessoa	Florianópolis
16	10	14	8	14	8	18	10
SET		OUT		NOV		DEZ	
João Pessoa	Florianópolis	João Pessoa	Florianópolis	João Pessoa	Florianópolis	João Pessoa	Florianópolis
20	12	22	16	20	18	20	18

Parâmetros para cálculo do acréscimo de temperatura		
Cidade	João Pessoa	Florianópolis
Latitude	27,5°	7,0°
Inclinação da superfície	90°	90°
Azimute da superfície	30°	30°
Coef. de reflexão do entorno	0,5	0,5
Fator de absorção	60 %	60 %
Coef. de transferência de calor	25 Kcal/m ² h °C	25 Kcal/m ² h °C

A radiação solar é considerada na função $f_1(T)$ (Equação 3) a partir de um acréscimo na temperatura exterior (Equação 30). Os dados de radiação solar global diária em média mensal em uma superfície horizontal para cada mês do ano foram obtidos do Atlas Solarimétrico do Brasil [15]. Os demais parâmetros foram selecionados para representar uma estrutura situada na área urbana. A Tabela 6 apresenta os dados de entrada no programa referentes à modelagem da radiação solar para João Pessoa e Florianópolis.

3.1.1 Resultados e discussões

i. Temperatura e umidade

A Figura 6 apresenta a variação da concentração de cloretos para o caso de coeficiente de difusão constante e para as cidades de

Florianópolis, João Pessoa e Vancouver. A Tabela 7 expõe os valores de concentração de cloretos para as idades de 5, 10, 20 e 50 anos para os casos estudados.

Pode-se observar que a taxa de aumento da concentração de cloretos em determinado ponto varia ao longo do ano sazonalmente, apresentando redução da inclinação da curva em períodos mais frios e secos.

Para todas as idades o caso em que o coeficiente de difusão foi mantido constante apresentou concentrações mais elevadas. Florianópolis exibe, em relação ao caso de coeficiente constante, reduções de 53,90%, 36,70%, 22,60% e 14,00% para as idades de 5, 10, 20 e 50 anos, respectivamente. Já João Pessoa apresenta reduções de 35,81%, 22,41%, 12,96% e 7,93% para estas idades. Ainda em relação ao mesmo caso, Vancouver, devido aos baixos valores de $f_1(T)$ e $f_3(h)$, é a que mostra maiores reduções, sendo

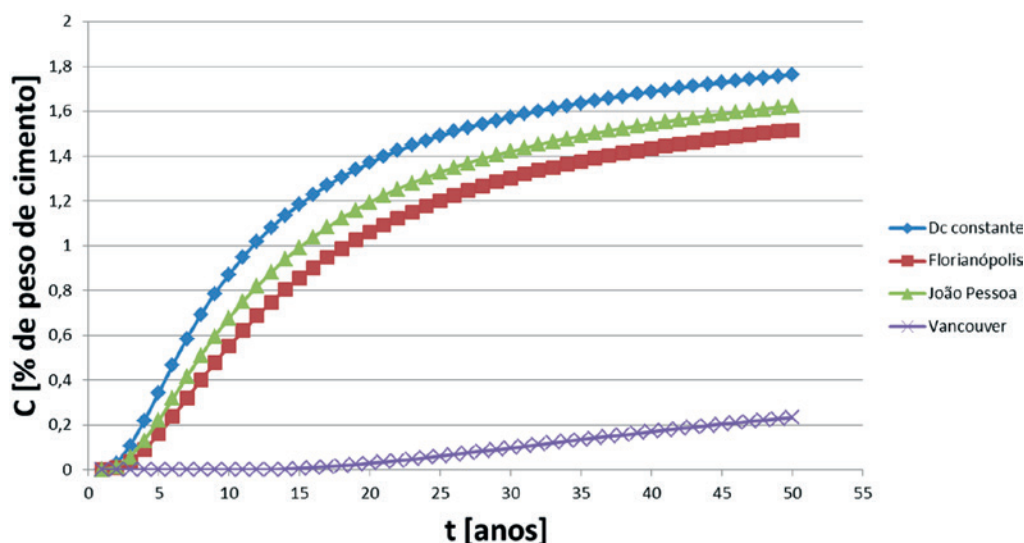


Figura 6
Variação da concentração de cloretos – parâmetros climáticos

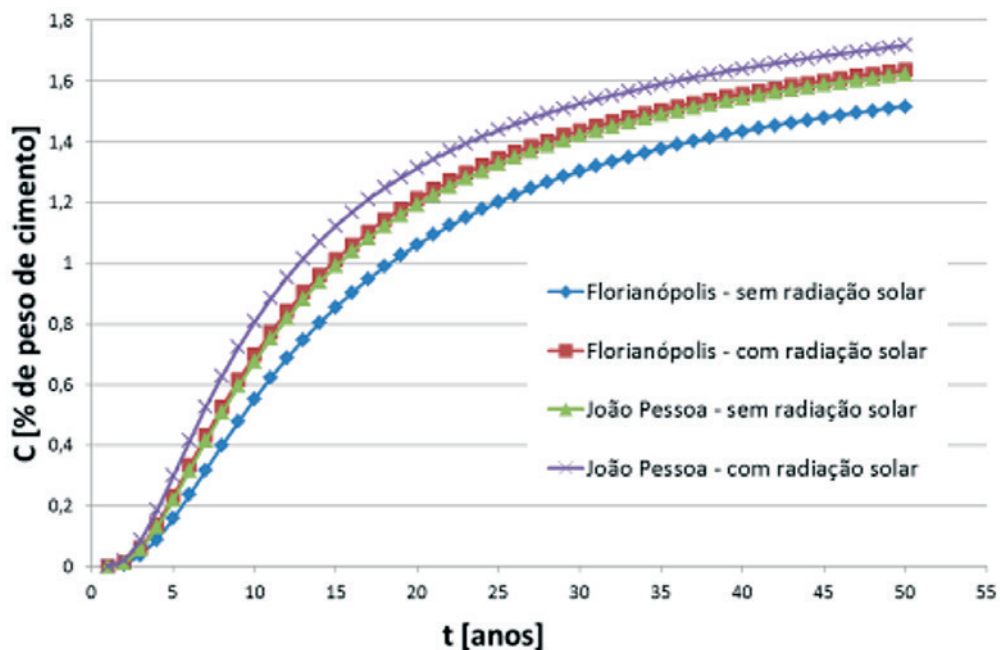
Tabela 7

Valores das concentrações de cloretos para 5, 10, 20 e 50 anos – parâmetros climáticos

Caso	Concentração de cloretos [% de peso de cimento]			
	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos
Constant Dc	0,3432	0,8725	1,3710	1,7635
Florianópolis	0,1582	0,5523	1,0612	1,5166
João Pessoa	0,2203	0,6770	1,1933	1,6237
Vancouver	0,0000	0,0000	0,0283	0,2332

**Figura 7**

Mapas de isoconcentrações – parâmetros climáticos

**Figura 8**

Variação da concentração de cloretos – radiação solar

Tabela 8

Valores das concentrações de cloretos para 5, 10, 20 e 50 anos – radiação solar

Caso	Concentração de cloretos [% de peso de cimento]			
	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos
Florianópolis – sem radiação solar	0,1582	0,5523	1,0612	1,5166
Florianópolis – com radiação solar	0,2326	0,6979	1,2124	1,6365
João Pessoa – sem radiação solar	0,2203	0,6770	1,1933	1,6237
João Pessoa – com radiação solar	0,2999	0,8079	1,3144	1,7179

100%, 100%, 97,94% e 86,78%. Em relação à cidade de João Pessoa, que resultou nas maiores concentrações entre as três cidades, Vancouver possui redução da concentração de 85,64% para a idade de 50 anos. A Figura 7 exibe os mapas de isoconcentrações gerados pelo *software* para os casos analisados.

ii. Radiação solar

Nesta análise consideraram-se os parâmetros de temperatura e umidade das cidades de Florianópolis e João Pessoa, com o acréscimo na temperatura gerado pela radiação solar nessas cidades (Equação 30). A Figura 8 apresenta a variação da concentração de cloretos para as cidades de Florianópolis e João Pessoa, demonstrando o efeito de se considerar a influência da radiação solar. A Tabela 8 expõe os valores de concentração de cloretos para as idades de 5, 10, 20 e 50 anos para os casos estudados.

Através dos resultados apresentados, observa-se a capacidade da radiação solar de aumentar a difusividade do concreto. Com esta consideração, a cidade de Florianópolis apresentou concentrações 47,03%, 26,36%, 14,25% e 7,91% maiores para as idades de 5, 10, 20 e 50 anos, respectivamente. Em consonância, para a cidade de João Pessoa, as concentrações resultaram 36,13%, 19,34%, 10,15% e 5,8% mais elevadas para as mesmas idades.

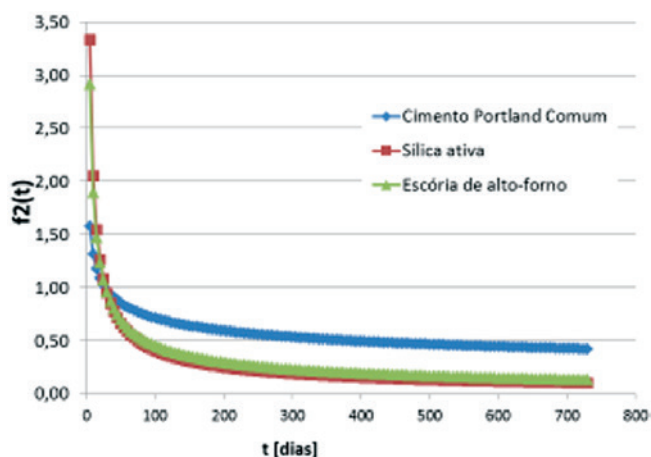


Figura 9
Variação da função multiplicativa $f_2(t)$ ao longo de dois anos

3.2 Influência do tempo de exposição na penetração de cloretos

Com o aumento do tempo de exposição, tem-se um aumento contínuo do grau de hidratação que, reduzindo a permeabilidade do concreto, reduz também sua difusividade, de um valor a depender do tipo de cimento e adições utilizadas.

Para esta análise, considerou-se apenas o grau de hidratação como fator interveniente no coeficiente de difusão, ou seja, os efeitos da temperatura, da umidade relativa e da radiação solar não foram considerados, de modo a facilitar a interpretação dos resultados quanto aos parâmetros que se objetiva estudar. A concentração superficial de cloretos (C_s) utilizada foi de 2% em relação à massa de cimento, mantida constante ao longo do tempo. Os valores utilizados para o fator de redução com a idade (m), que controla a evolução da hidratação do cimento, foram de 0,264 (cimento Portland comum), 0,621 (cimento com escória de alto-forno) e 0,699 (cimento com cinza volante).

3.2.1 Resultados e discussões

A variação da função $f_2(t)$ (Equação 7) ao longo de dois anos para

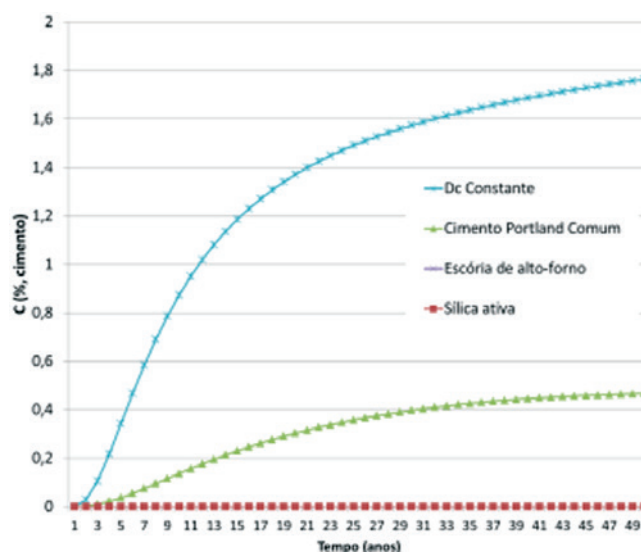


Figura 10
Variação da concentração de cloretos – tempo de exposição

Tabela 9

Valores das concentrações de cloretos para 5, 10, 20 e 50 anos – tempo de exposição

Caso	Concentração de cloretos [% de peso de cimento]			
	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos
Dc constante	0,3432	0,8725	1,3710	1,7635
Cimento Portland comum – m = 0,264	0,0370	0,1367	0,3033	0,4674
Escória de alto-forno – m = 0,621	0	0	0	0
Sílica ativa – m = 0,699	0	0	0	0

Tabela 10

Análise paramétrica: variáveis de controle

Variáveis de controle		Valor
Condições de contorno	Concentração inicial (C_0)	0 %
Coeficiente de difusão	Coef. de difusão de referência ($D_{c,ref}$)	1×10^{-12} m ² /s

os casos estudados é exibida na Figura 9. A Figura 10 apresenta a variação da concentração de cloretos para os casos de: coeficiente de difusão constante, concreto de cimento Portland comum ($m = 0,264$), concreto com escória de alto-forno ($m = 0,621$) e concreto com sílica ativa ($m = 0,699$). A Tabela 9 expõe os valores de concentração de cloretos para as idades de 5, 10, 20 e 50 anos. Através dos resultados apresentados, pode-se observar uma grande influência do tipo de cimento, das adições utilizadas e do grau de hidratação na difusividade do concreto. A consideração do grau de hidratação levou a uma redução da concentração de cloretos, após 50 anos de exposição, de 73,50% para o caso de cimento Portland comum e de 100% para cimentos com escória de alto-forno e sílica ativa. Verifica-se que o efeito da hidratação ocorre majoritariamente nas primeiras idades, afetando decisivamente a difusão de cloretos (Figura 9).

Ao considerar-se o valor de 0,4% como a concentração limite para despassivação da armadura, valor comum no meio técnico, tem-se que a armadura estaria despassivada em pouco mais de 5 anos para o caso em que o efeito do grau de hidratação é desconsiderado. Já o caso de cimento Portland comum, a despassivação

ocorreria aos 30 anos. Considerando-se a utilização da escória de alto-forno e da sílica ativa, a despassivação dar-se-ia em idades superiores a 50 anos.

3.3 Influência dos diferentes modelos de concentração superficial na penetração de cloretos

Para esta análise, o coeficiente de difusão de cloretos foi mantido constante no tempo, ou seja, os efeitos da temperatura, da umidade relativa, do grau de hidratação e da radiação solar no coeficiente de difusão não foram considerados, de modo a facilitar a interpretação dos resultados quanto aos parâmetros que se objetiva estudar. Encontram-se, na Tabela 10, as variáveis de controle que compõe este estudo e seus respectivos valores.

Foram utilizados os dados de concentração superficial apresentados por Bentz *et al.* (1996) *apud* Song [29], empregados por Song [29] na proposição de seu modelo. A partir dos parâmetros apresentados pelo autor, realizou-se regressão não linear para ajuste das curvas dos demais modelos. Para os valores de concentração de cloretos

Tabela 11

Parâmetros dos modelos de concentração superficial, obtidos por regressão não linear

Modelo	Equação	Parâmetros
-	$C_s = cte$	$C_s = 5,1541$
Uji <i>et al.</i> (1990)	$C_s = S\sqrt{t}$	$S = 2,51 \times 10^{-5}$
Collins e Grace (1997)	$C_s = C_{s,ult} \cdot \frac{t}{t + T_{CS}}$	$C_{s,ult} = 0,8651$; $T_{CS} = 533,5267$
Ann <i>et al.</i> (2009)	$C_s = C_0 + k\sqrt{t}$	$C_0 = 3,3593$; $k = 0,3488$
Song <i>et al.</i> (2008)	$C_s = C_0 + \alpha \ln t$	$C_0 = 3,0431$; $\alpha = 0,6856$

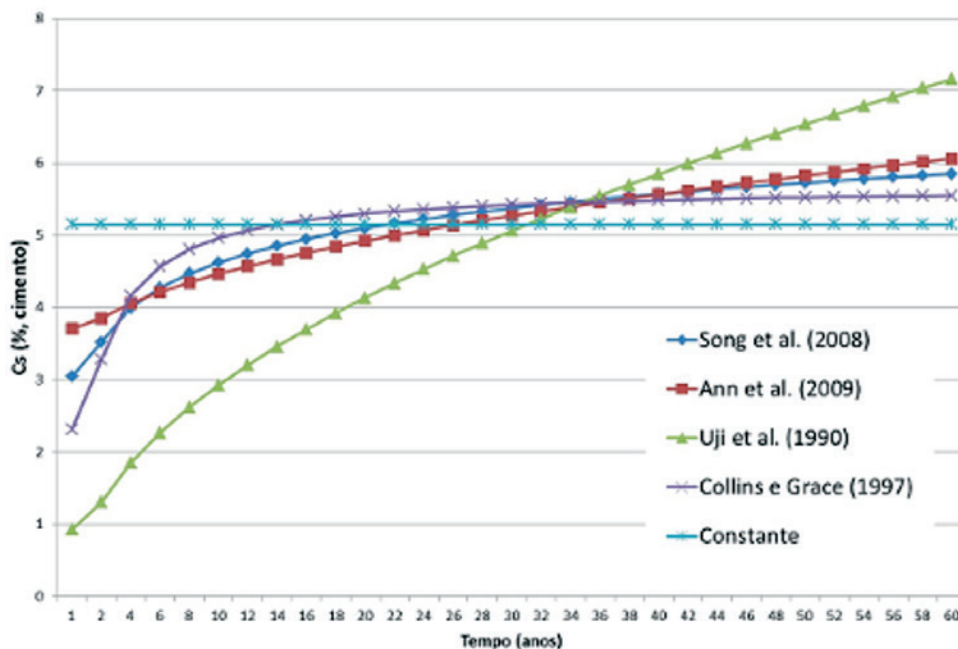


Figura 11
Curvas de variação da concentração superficial utilizadas na análise paramétrica

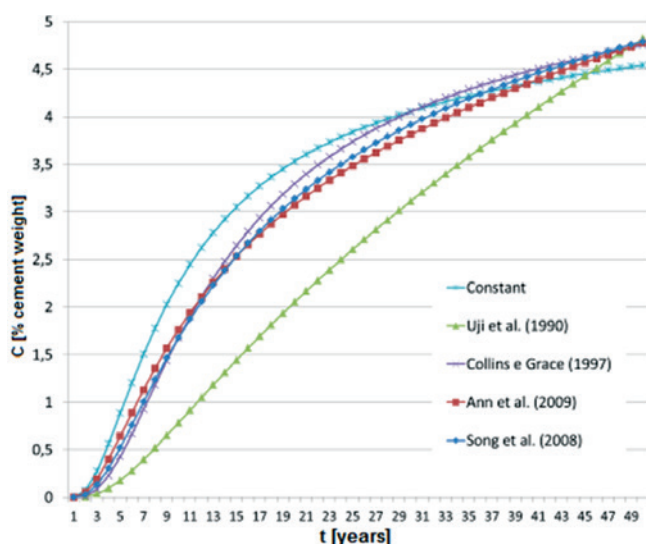


Figura 12
Variação da concentração de cloretos – concentração superficial

em % de peso de concreto, considerou-se, na obtenção da concentração em relação à % de peso de cimento, um peso específico do concreto de 2300 kg/m³ e um teor de cimento no concreto de 350 kg/m³. Os parâmetros encontrados para cada modelo são apresentados na Tabela 11. A Figura 11 exibe as curvas obtidas com estes parâmetros. Os valores obtidos são equivalentes, de acordo com a literatura técnica, a uma zona de variação de maré [31].

3.3.1 Resultados e discussões

A Figura 12 apresenta a variação da concentração de cloretos para as cinco abordagens de concentração superficial utilizadas neste estudo. A Tabela 12 expõe os valores de concentração de cloretos para as idades de 5, 10, 20 e 50 anos para os casos estudados. A abordagem de concentração superficial constante produziu os valores de concentração de cloretos mais altos para os primeiros 30 anos. Isso porque, de acordo com a Figura 11, a concentração superficial era a mais elevada nas primeiras idades. Para idades elevadas, essa abordagem tende a apresentar valores mais baixos que os outros modelos. Já o modelo de Uji *et al.* [26], apresentou as menores concentrações de cloretos durante praticamente todo o tempo estimado. Entretanto, nas idades próxima a 50 anos, já mostrava concentrações mais elevadas, com tendência de aumento no distanciamento para futuras idades.

Tabela 12
Valores das concentrações de cloretos para 5, 10, 20 e 50 anos – concentração superficial

Abordagem	Concentração de cloretos [% de peso de cimento]			
	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos
Cs constante	0,8845	2,2484	3,5331	4,5446
Uji <i>et al.</i> (1990)	0,1761	0,7829	2,0521	4,8225
Collins e Grace (1997)	0,4270	1,6747	3,2969	4,7543
Ann <i>et al.</i> (2009)	0,6431	1,7610	3,0757	4,7780
Song <i>et al.</i> (2008)	0,5220	1,6745	3,1381	4,7933

Os demais modelos [27-29] resultaram em valores de concentração de cloretos bem próximos ao longo de todo o período estudado. Entretanto, a curva referente à abordagem de Ann *et al.* [28] tende a se distanciar das outras duas, pois a concentração superficial deste modelo tende a crescer indefinidamente com o tempo. Já os modelos de Collins e Grace [27] e Song *et al.* [29], tendem a continuar apresentando valores próximos, uma vez que suas curvas de concentração superficial tem alguns aspectos em comum, iniciando em valores intermediários e se aproximando de um valor constante nos últimos anos.

4. Análises de diferentes espessuras de cobrimento para as cidades de Vitória (ES) e Florianópolis (SC)

A espessura e qualidade do concreto de cobrimento são dois dos principais fatores que determinam a durabilidade das estruturas. Assim, a NBR 6118 [7] estabelece a qualidade do concreto e os cobrimentos mínimos que devem ser atendidos para cada classe de agressividade ambiental. Para garantir o cobrimento mínimo (c_{min}), a norma prescreve que o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (c_{nom}), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução ($\Delta c = 10$ mm, nas obras correntes). Segundo a norma, vigas e pilares em concreto armado, situados em regiões de classe de agressividade marinha, devem possuir um cobrimento nominal de 40 mm, ou seja, um cobrimento mínimo de 30 mm ($c_{min} = c_{nom} - \Delta c = 30$ mm).

Assim, analisam-se espessuras de cobrimento de 20 mm, 30 mm e 40 mm para as cidades de Vitória (ES) e Florianópolis (SC), demonstrando os efeitos na vida útil da peça. Para isso, considera-se uma viga de fachada de 20 cm de largura e 40 cm de altura em concreto aparente situada em zona de atmosfera marinha.

Devido a falta de dados mais precisos, específicos de cada região, adotou-se como concentração superficial o modelo de Uji *et al.* [26] com parâmetro "S" igual a $5,57 \times 10^{-6} 1/\sqrt{s}$, indicado pelo autor como típico de zona de atmosfera marinha. Foi considerada exposta apenas uma das faces da viga (Figura 13). A evolução da concentração superficial utilizada para as duas cidades é exibida na Figura 14.

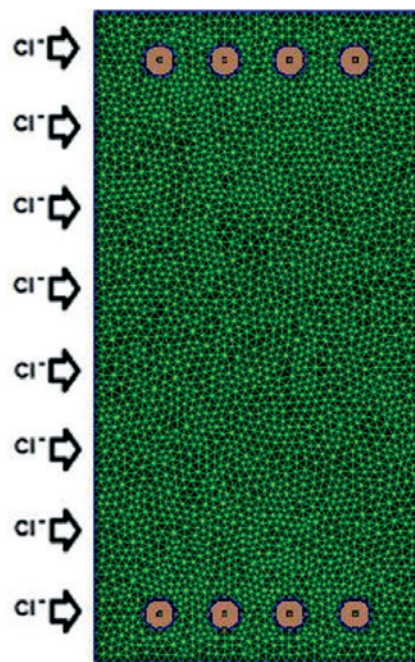


Figura 13
Geometria e face exposta

Devido à falta de dados reais, o coeficiente de difusão de referência foi adotado como $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, medido aos 120 dias a 23° C , valor condizente com os encontrados na literatura. Foram utilizados dados climáticos da cidade de Vitória (ES) e Florianópolis (SC), obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Devido à falta de dados mais precisos, a temperatura e umidade relativa dos poros do concreto foram consideradas em equilíbrio com a atmosfera. Como já relatado anteriormente por Andrade *et al.* [30], a temperatura no interior do concreto é bastante similar à temperatura externa. A energia de ativação foi adotada como $44,6 \text{ kJ/K.mol}$, referente a um concreto com relação água/cimento igual a 0,5.

Para a consideração do grau de hidratação deve-se determinar o tipo de cimento utilizado. O cimento mais empregado em Vitória é

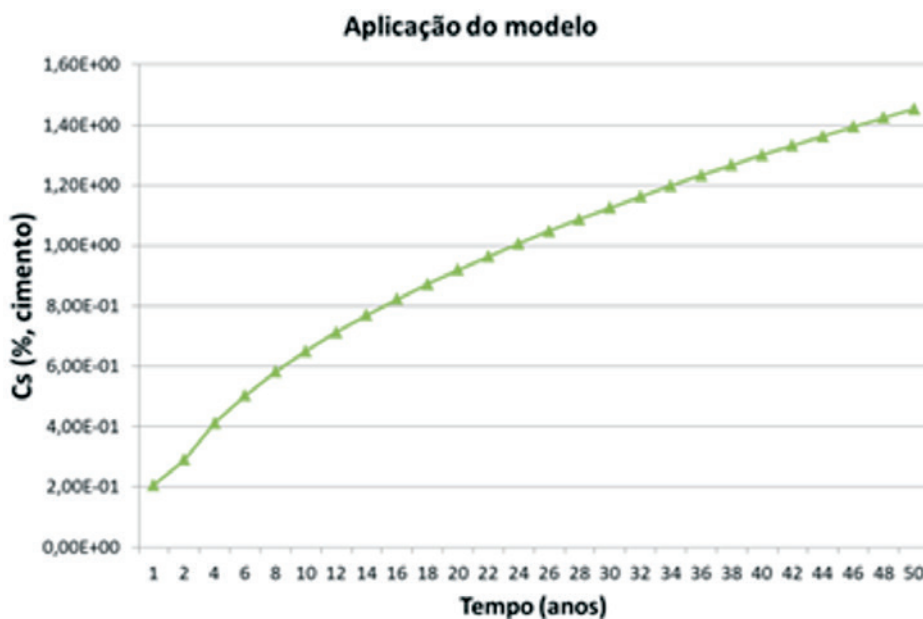


Figura 14
Concentração superficial adotada (zona de atmosfera marinha)

Tabela 13

Aplicação do modelo: parâmetros de entrada

Parâmetros		Valor		
Geometria	Dimensões	20 cm x 40 cm		
	Cobrimento de concreto	20 mm	30 mm	40 mm
Malha	Tipo de elementos	Triangular linear		
	Tamanho do elemento	0,006		
	Número de nós	3256	3253	3234
	Número de elementos	6211	6205	6167
Parâmetros de tempo	Tempo final (T)	50 anos		
	Passo de tempo (Δt)	5 dias		
Condições de contorno	Concentração inicial (C_0)	0 %		
	Concentração superficial de cloretos (C_s)	Uji <i>et al.</i> (1990) $S = 5,57 \cdot e^{-6} \cdot 1/\sqrt{s}$		
	Teor de cimento	350 kg/m ³		
Coeficiente de difusão	Coef. de difusão de referência ($D_{c,ref}$)	1x10-12 m ² /s		
	Temperatura de referência (T_{ref})	23 °C		
	Idade de referência (t_{ref})	120 dias		
	Energia de ativação (U)	44,6 kJ/mol		
	Fator de redução (m)	0,264		
	Parâmetro de umidade hc	0,75		
Temperatura	Cidade	Vitória	Florianópolis	
	Máxima (°C)	26,9	24,6	
	Mínima (°C)	21,7	16,5	
	Dia de máxima anual	45	45	
Umidade relativa	Máxima (%)	80	84	
	Mínima (%)	77	80	
	Dia de máxima anual	285	195	

Tabela 14

Aplicação do modelo: parâmetros de radiação solar - Vitória (ES)

Radiação solar global diária em média mensal recebida por uma superfície horizontal para cada mês do ano [MJ/m ² .dia]			
JAN	FEV	MAR	ABR
18	18	18	14
MAI	JUN	JUL	AGO
14	12	12	14
SET	OUT	NOV	DEZ
14	16	16	16

Parâmetros para cálculo do acréscimo de temperatura	
Latitude	20,3 °
Inclinação da Superfície	90 °
Azimute da Superfície	30 °
Coef. de reflexão do entorno	0,5
Fator de absorção	60 %
Coef. de transferência de calor	25 Kcal/m ² h°C

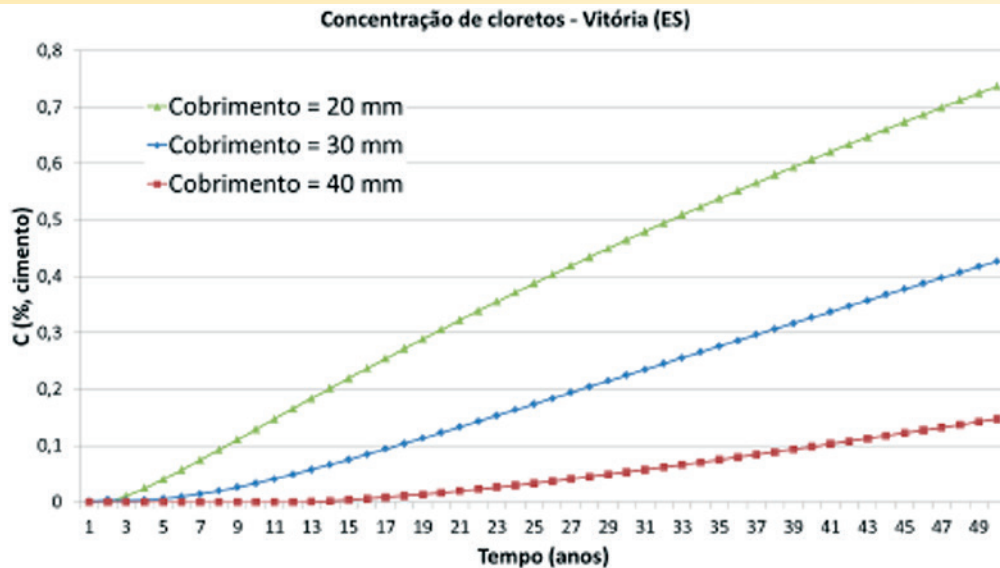


Figura 15
Variação da concentração de cloretos em Vitória – ES

o CP – III, já em Florianópolis, o CP-II e o CP-IV são preponderantes. Entretanto, devido a grande sensibilidade do coeficiente de difusão em relação ao fator de redução com a idade (m), à grande variabilidade deste parâmetro e a falta de dados precisos para cada tipo de cimento, considerou-se uma situação menos favorável, com um concreto de cimento CP-I, de fator “m” igual a 0,264. Os dados de radiação solar global diária em média mensal recebida por uma superfície horizontal para cada mês do ano nas cidades de Vitória e Florianópolis foram obtidos do Atlas Solarimétrico do Brasil [15]. Os demais parâmetros para o cálculo do acréscimo de temperatura devido à radiação solar foram selecionados para representar uma estrutura na área urbana. Os parâmetros utilizados como dados de entrada no *software* estão expostos nas Tabelas 6, 13 e 14.

4.1 Resultados e discussões

A Figura 15 e a Figura 16 apresentam a variação da concentração de cloretos para os cobrimentos estudados para as cidades

de Vitória e Florianópolis, respectivamente. A Tabela 15 expõe os valores de concentração de cloretos para as idades de 5, 10, 20 e 50 anos para os casos estudados. Na Figura 17 são apresentados os mapas de isoconcentrações gerados pelo *software* para os casos analisados.

Pode-se observar que as concentrações atingidas nas duas cidades não foram muito distintas, sendo que, após 50 anos, Vitória apresenta valores 1,11%, 1,99% e 6,51% maiores em comparação a Florianópolis, para espessuras de cobertura de 20 mm, 30 mm e 40 mm, respectivamente. É importante salientar que, por se tratar de um caso hipotético e devido à falta de dados, neste trabalho adotou-se a mesma concentração superficial nas duas cidades, caracterizando uma zona de atmosfera marinha. Entretanto, este valor tende a sofrer alterações com a localização e distância do mar, influenciando a concentração de cloretos.

Os resultados demonstram também a grande importância da espessura de cobertura. Para a cidade de Vitória, o caso com

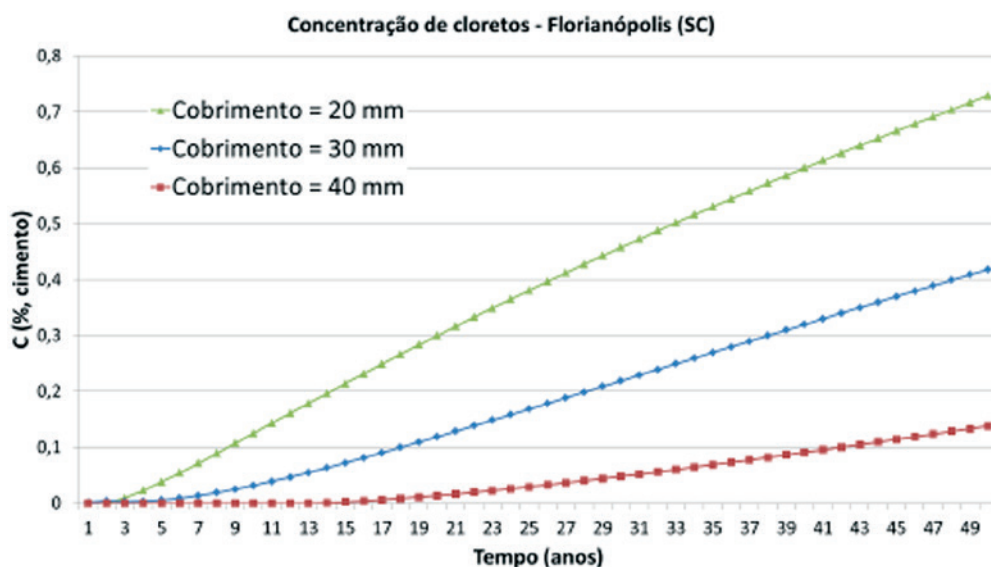


Figura 16
Variação da concentração de cloretos em Florianópolis – SC

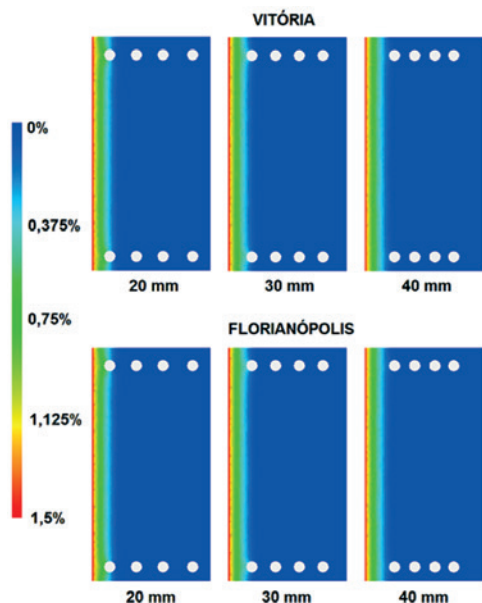


Figura 17
Mapas de isoconcentrações – cobrimentos de 20 mm, 30 mm e 40 mm

cobrimento de 30 mm exibe concentrações 85,06%, 74,01%, 59,71% e 42,08% menores que o caso com 20 mm de espessura para as idades de 5, 10, 20 e 50 anos, respectivamente. Já a viga com cobrimento de 40 mm obteve valores de concentração 100%, 100%, 94,54% e 80,01% menores para as mesmas idades quando comparada ao mesmo caso. Resultados similares são obtidos para Florianópolis.

Ao considerar-se o valor de 0,4% como a concentração limite para despassivação da armadura, valor comum no meio técnico, tem-se que a vida útil obtida para a viga com 20 mm de cobrimento é em torno de 26 anos para as duas cidades. Já para a espessura de 30 mm, a despassivação ocorre aos 48 anos, também nas duas cidades. Ou seja, o aumento de 10 mm na espessura de cobrimento levou a um aumento de 84,62 % na vida útil da peça. O cobrimento de 40 mm, que proporciona a maior vida útil entre os três, apresenta, após 50 anos, concentração de 0,1474 % para a cidade de Vitória e 0,1384 % para Florianópolis, possuindo ainda uma vida útil residual elevada.

Tabela 15

Valores das concentrações de cloretos para 5, 10, 20 e 50 anos

Abordagem	Concentração de cloretos [% de peso de cimento]			
	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos
Vitória – cobrimento 20 mm	0,0404	0,1291	0,3060	0,7373
Vitória – cobrimento 30 mm	0,0060	0,0336	0,1233	0,4270
Vitória – cobrimento 40 mm	0	0	0,0167	0,1474
Florianópolis – cobrimento 20 mm	0,0384	0,1252	0,3001	0,7292
Florianópolis – cobrimento 30 mm	0,0057	0,0319	0,1191	0,4187
Florianópolis – cobrimento 40 mm	0	0	0,0139	0,1384

5. Conclusões

Apesar de a corrosão de armaduras por ação de cloretos ser um tema muito estudado desde a década de 70, existem muitas lacunas no conhecimento de seus processos. Uma quantidade considerável de modelos de previsão de vida útil já foi desenvolvida, entretanto, ainda não há uma abordagem amplamente aceita, que tenha conseguido alcançar efetivamente o mercado.

Este trabalho apresenta um modelo de penetração de cloretos por difusão em estruturas de concreto armado. Este modelo prevê a evolução da concentração de cloretos com o tempo, assim como o tempo necessário, em determinada situação, para que o limite de cloretos para a despassivação da armadura seja atingido. O *software* desenvolvido possui interface amigável (Figura 2) e janelas de entrada de dados que permitem a manipulação de todos os parâmetros considerados, facilitando análises da influência de cada variável.

5.1 Análises paramétricas

Com o intuito de colaborar com o entendimento sobre os modelos físicos que abrangem os diversos fatores intervenientes na penetração de cloretos, foi realizada análise paramétrica contemplando a influência de parâmetros climáticos (temperatura, umidade e radiação solar), a influência do tempo de exposição (grau de hidratação) e a influência de diferentes abordagens de concentração superficial de cloretos. Destas análises, conclui-se:

- Quanto menor a temperatura e a umidade, menor a penetração de cloretos. Assim, o aumento da concentração de cloretos em determinado ponto varia ao longo do ano, de acordo com os parâmetros climáticos.
- Cidades com diferentes climas apresentaram valores de coeficiente de difusão e de concentração de cloretos muito distintos, sugerindo tempos de reparo completamente diferentes. A maior tendência de penetração de cloretos ocorrerá em verões úmidos e a menor em invernos secos. Além disso, para temperaturas próximas de zero este fenômeno fica bastante reduzido e, para umidades abaixo de 50%, ele é praticamente inexistente.
- A radiação solar tem capacidade de aumentar a difusividade do concreto de maneira significativa, mesmo para cidades onde a radiação não é tão intensa. Assim, a não consideração da radiação solar pode levar a valores de vida útil superestimados.

- Pode-se observar uma grande influência do tipo de cimento utilizado e do grau de hidratação na difusividade do concreto. Esta consideração levou a uma notável redução da concentração de cloretos nos casos analisados, aumentando o período de iniciação de 5 anos para 30 anos no caso de cimento Portland comum e bem acima de 50 anos para os casos de cimentos com escória de alto-forno e sílica ativa, onde, mesmo após 50 anos, a frente de cloretos ainda não havia atingido a armadura.
- Há grande sensibilidade do coeficiente de difusão e da concentração de cloretos em relação ao fator de redução com a idade (m). Entretanto, não há grande variedade de estudos abordando este fator para diversos tipos e teores de adições, condição importante para aumentar a confiabilidade das previsões de vida útil.
- A consideração de uma concentração superficial constante produz valores de concentração de cloretos mais altos em idades menores, sendo eventualmente ultrapassados pelos demais modelos. Para idades mais elevadas, as curvas referentes às abordagens de Uji *et al.* [26] e Ann *et al.* [28] tendem a apresentar valores mais elevados. Já os modelos de Collins e Grace [27] e Song *et al.* [29], tendem a apresentar valores intermediários, se aproximando de um valor constante.
- Ressalta-se que um dos fatores que dificultam a utilização de modelos como o aqui apresentado é a falta de dados disponíveis de concentração de cloretos na literatura para, por exemplo, definir-se a concentração superficial de cloretos em determinadas regiões ou zonas de agressividade.
- Considerar ou não considerar cada fator interveniente no fenômeno da difusão pode levar a grandes alterações na definição do período de iniciação, a depender da condição da estrutura - localização, parâmetros climáticos, concentração superficial, tipo de cimento utilizado, condição da camada de pele, etc. Ou seja, a importância de cada parâmetro não é constante, mas irá depender do caso específico e a adoção de modelos inadequados pode levar a grandes erros na previsão do tempo para corrosão.

5.2 Análises de diferentes espessuras de cobertura para as cidades de Vitória (ES) e Florianópolis (SC)

- A utilização dos microclimas de cada cidade não gerou grandes alterações na vida útil estimada, uma vez que a concentração superficial utilizada foi a mesma.
- Os resultados obtidos corroboram as espessuras de cobertura apresentadas na NBR 6118 [7]. Para os casos estudados, obteve-se vida útil de 26 anos para cobertura de 20 mm e 48 anos para cobertura de 30 mm, espessura mínima para vigas e pilares situados em regiões de classe de agressividade marinha. O cobertura nominal especificado pela norma para este caso, de 40 mm, resultou em baixos valores de concentração de cloretos após 50 anos.
- A NBR 6118 [7] ainda adota como principal ferramenta a definição de cobrimentos mínimos e qualidades mínimas do concreto de cobertura. A utilização de modelos determinísticos permite a avaliação quantitativa da vida útil para casos reais

específicos, expressa em número de anos. Salienta-se a importância da obtenção de dados de concentração superficial e coeficiente de difusão para utilização em obras reais.

6. Agradecimentos

Expressamos nossos agradecimentos à FAPES – Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo pelo fomento da pesquisa. Igualmente agradecemos a importante colaboração da Dra. Carmen Andrade e Dr. Fabiano Tavares do Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – Madrid – España.

7. Referências bibliográficas

- [1] HELENE, P. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Universidade de São Paulo - USP, Tese de Livre Docência, 248 p, 1993.
- [2] DAL MOLIN, D. C. C. Fissuras em estruturas de concreto armado – análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Dissertação de Mestrado, 220 p, 1988.
- [3] RIBEIRO, D. V. *et al.* Corrosão em estruturas de concreto armado - Teoria, Controle e Métodos de análise. Elsevier, 272 p, 2014.
- [4] MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. CONCRETO – Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.
- [5] ANDRADE, C. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras. São Paulo: Ed. PINI, 104 p, 1992.
- [6] TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 469 p, 1982.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento, NBR 6118, ABNT, Rio de Janeiro, 238 p, 2014.
- [8] HELENE, P. A Nova NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: II Seminário de Patologia das Construções, Porto Alegre, 2004. Novos Materiais e Tecnologias Emergentes. Porto Alegre: LEME/UFRGS, v.1. p.1-30, 2004.
- [9] ANDRADE, C. Reinforcement corrosion: Research needs. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander *et al* (eds). 8 p. 2009.
- [10] TAVARES, F. Coupled model of initiation and propagation of corrosion in reinforced concrete. Universidad Politécnica de Madrid, Tesis, 166 p, 2013.
- [11] CRANK, J. The Mathematics of Diffusion. London: Oxford University Press, p. 414, 1975.
- [12] COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration. Materials and Structures, 32, pp. 252-259, 1999.
- [13] ANDRADE, C. *et al.* Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices. Journal of Nuclear Materials, 412, pp. 209-216, 2011.
- [14] PAGE, C. L. *et al.* Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. Cement and Concrete Research, 11, pp. 395-406, 1981.

- [15] TIBA, C. *et al.* Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.
- [16] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal processes. Fourth edition. New Jersey: Wiley, 2013.
- [17] AGULLO, L. Estudio termico en presas de hormigon frente a la accion termica ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Tesis, 278 p, 1991.
- [18] STUCKY, A; DERRON, M. Problèmes thermiques posés par la construction des barrages-réservoirs. École Polytechnique de l'université de Lausanne, 1957.
- [19] MARTÍN-PÉREZ, B. Service life modelling of r.c. highway structures exposed to chlorides. University of Toronto, Thesis, 168 p, 1999.
- [20] BUENFELD, N. R.; NEWMAN, J. B; PAGE, C. L. The resistivity of mortars immersed in sea-water. Cement and Concrete Research, 16, pp. 511-524, 1986.
- [21] ANDRADE, C. *et al.* Mathematical Modeling of a Concrete Surface "Skin Effect" on Diffusion in Chloride Contaminated Media. Advanced Cement Based Materials, 6, pp. 39-44, 1997.
- [22] MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. Construction and Building Materials, 23, pp. 1476-1484, 2009.
- [23] ANDRADE, C. *et al.* Comparison of chloride models: the importance of surface concentration. 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, 16 p, 2006.
- [24] HASSAN, J.E. *et al.* Reliability-based assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress. Engineering Structures, 32, pp. 3279-3287, 2010.
- [25] STEWART, M.G.; MULLARD, J.A. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures. Engineering Structures, 29, pp. 1457-1464, 2007.
- [26] UJI, K., MATSUOKA, Y., and MARUYA, T. Formulation of an equation for surface chloride content of concrete due to permeation of chloride. In C. Page, K. Treadaway, and P. Bamforth (Eds.), Corrosion of Reinforcement in Concrete, pp. 258-267. Essex, England: Elsevier Applied Science, 1990.
- [27] COLLINS, F.; GRACE, W. Specifications and testing for corrosion durability of marine concrete: the Australian perspective. In ACI International Conference on Durability of concrete, pp. 757-776, 1997.
- [28] ANN, K.Y. *et al.* The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. Construction and Building Materials, 23, pp. 239-245, 2009.
- [29] SONG, H. *et al.* Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. Cement & Concrete Composites, 30, pp. 113-121, 2008.
- [30] ANDRADE, C. *et al.* Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. Cement and Concrete Research, 29, pp. 1249-1259, 1999.
- [31] BRANCO, F.; PAULO, P.; GARRIDO, M. Vida Útil na Construção Civil. Boletim Técnico ALCONPAT, n. 4, p. 20, 2013.