Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

MODELO DE PREVISÃO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS CLIMÁTICOS

W. K. DOMINICINI
Engenheiro Civil
Universidade Federal do Espírito Santo
ES; Brasil
wagner.kd@gmail.com

J. L. CALMON
Professor Titular
Universidade Federal do Espírito Santo
ES; Brasil
calmonbarcelona@gmail.com

A. B. SUZANO
Engenheira Civil
Universidade Federal do Espírito Santo
ES; Brasil
beatrizsuzano@hotmail.com

RESUMO

As estruturas de concreto se degradam por vários mecanismos, tendo sua vida útil reduzida caso não sejam adotadas medidas de manutenção corretivas e preventivas. O estudo da vida útil de estruturas é de extrema importância, uma vez que gera conhecimento sobre os fenômenos envolvidos, concilia o tempo de vida e o desenvolvimento sustentável, causa grande impacto nas etapas de projeto e manutenção e colabora com o desenvolvimento de tecnologias em prol da durabilidade. Um dos mais frequentes fenômenos de degradação das estruturas de concreto armado e que geram custos mais elevados de reparo é a corrosão das armaduras, particularmente a induzida pela ação de cloretos. Assim, este trabalho apresenta um modelo de penetração de cloretos por difusão em estruturas de concreto armado baseado na solução da equação diferencial 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. Utilizam-se diversas abordagens para a concentração superfícial 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. Além do mais, as cidades de Florianópolis (SC, Brasil), João Pessoa (PB, Brasil) e Vancouver (BC, Canadá) foram escolhidas para análise da influencia de parâmetros climáticos na penetração de cloretos por difusão.
Palavras-chave: método dos elementos finitos, cloretos, difusão, corrosão, modelo.

ABSTRACT

Concrete structures degrade by multiple mechanisms, reducing its service life if corrective and preventive maintenance measures are not adopted. The study of structures service life assumes utmost importance, reconciling lifetime and sustainable development, generating knowledge about the involved phenomena, causing great impact on the design and maintenance steps and contributing to the development of building, maintenance and repair technologies. One of the most frequent phenomena of degradation of reinforced concrete structures and that generate higher costs of repair is the reinforcement corrosion, particularly that induced by chlorides action. This work presents a model of penetration of chloride by diffusion in reinforced concrete structures based on the solution of the differential equation 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. Several approaches for the chloride surface concentration and for the diffusion coefficient are used, a parameter which must be corrected due to the effects of temperature, exposure time, and relative humidity, in order to estimate the service life. Moreover, the cities of Florianópolis (SC, Brazil), João Pessoa (PB, Brazil) and Vancouver (BC, Canada) were selected for the analysis of the influence of climatic parameters on the penetration of chlorides by diffusion.
Keywords: finite element method, chlorides, diffusion, corrosion, modeling.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

Dentre os fenômenos de degradação das estruturas de concreto armado, um dos mais frequentes e que geram custos mais elevados de reparo é a corrosão de armaduras. 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 [1].

A despassivação da armadura acontece principalmente devido a dois mecanismos: carbonatação e ação de cloretos. Embora a corrosão por carbonatação ocorra de forma generalizada, o mecanismo de corrosão mais estudado e que causa maiores prejuízos é a corrosão por ação de cloretos. A contaminação por cloretos pode acontecer devido a uma contaminação prévia dos materiais de fabricação do concreto ou pela penetração de cloretos, presentes em 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. Ocorre, então, um acúmulo de cloretos na região da armadura até que, ao se atingir uma quantidade crítica de íons cloreto na solução dos poros, decorre uma quebra localizada da camada passivadora [1].

Um modelo simplificado, puramente qualitativo, para vida útil associada à corrosão foi proposto por Tuutti [2] 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, quando tem ínicio o processo de corrosão propriamente dito, é considerado como o tempo entre a despassivação da barra de aço 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.

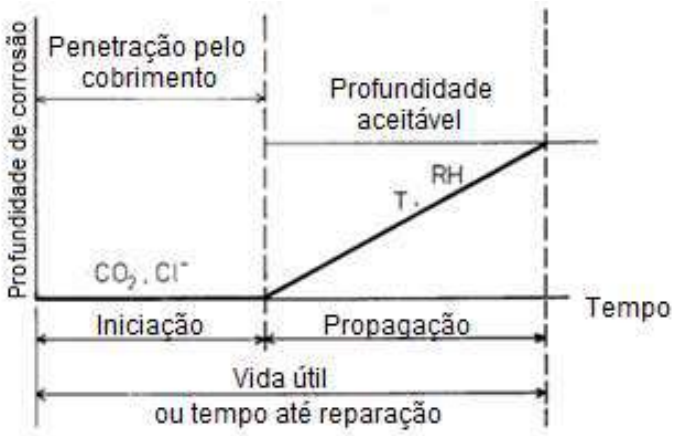

Figura 1: Modelo simplificado para vida útil associada à corrosão.
Fonte: Adaptado de Tuutti [2]

Os principais mecanismos de transporte de cloretos são a difusão e a convecção. Frequentemente, modelos de penetração de cloretos consideram apenas a difusão, entretanto, esta abordagem pode subestimar o fluxo de cloretos para meios parcialmente saturados, sujeitos a ciclos de molhagem e secagem [3].

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. Além do mais, as cidades de Florianópolis (SC, Brasil), João Pessoa (PB, Brasil) e Vancouver (BC, Canadá) foram escolhidas para análise da influencia de parâmetros climáticos na penetração de cloretos por difusão.

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 (GMSH[1]) para a geração de malhas. Entretanto, todo o restante dos procedimentos é efetuado pelo próprio programa, através de interface amigável e janelas de entrada de dados que permitem a manipulação de todos os parâmetros considerados. Este programa foi desenvolvido baseado em Tavares [4], com a inserção de diferentes modelos para concentração superficial e a implementação da influência da radiação solar. Entretanto, a influência da radiação solar não foi connsiderada neste trabalho.

A difusão ocorre devido à existência de um gradiente de concentração de cloretos entre a superfície exposta e a solução nos poros da matriz cimentícia. Este trabalho apresenta um modelo de penetração de cloretos em estruturas de concreto armado por difusão baseado na solução da equação diferencial da 2ª Lei de Fick (Equação 1).

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

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 superfícial 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 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, diversos trabalhos apontam que ela é variável no tempo [5-10] e esta aproximação pode ocasionar grandes erros para previsões de longo prazo. Assim, ter uma lei de evolução da concentração superficial consistente é um fator crucial e o *software* desenvolvido possibilita cinco abordagens diferentes [7-10], 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*. [7] 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 2).

$$C_s = S\sqrt{t} \quad [\%\ peso\ de\ concreto] \quad (2)$$

Onde S é um coeficiente dependente do tipo de estrutura e zona de exposição (1/√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/√s) para a zona de respingos, (18,2–23,5 x 10^{-6} 1/√s) para a zona de maré e (1,56–5,57 x 10^{-6} 1/√s) para a zona atmosférica.

Em outra abordagem, proposta por Collins e Grace [8], após um aumento inicial, a concentração superficial atinge um valor limite, tornando-se constante (Equação 3). Segundo os autores, a magnitude deste limite está relacionada com o sistema cimentício e com a porosidade da camada superficial.

$$C_s = C_{s,ult} \cdot \frac{t}{t + T_{cs}} \quad [\%\ peso\ de\ concreto] \quad (3)$$

[1] http://gmsh.info/

Onde Cs,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 Tcs é um parâmetro que regula a taxa de acúmulo de cloretos na superfície do concreto (dias).

Como a concentração superfícial de cloretos utilizada pelos trabalhos acima [7, 8] 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 4.

$$C_s\,(\%\ de\ peso\ de\ cimento) = C_s\,(\%\ de\ peso\ de\ concreto).(2300\ /\ teor\ de\ cimento\ (kg/m^3)) \quad (4)$$

Ann *et al*. [9] e Song *et al*. [10] apresentam modelos que consideram um acúmulo inicial de cloretos na superfície que, em seguida, aumenta com o tempo de exposição, a partir das Equações 5 e 6, respectivamente.

$$C_s = C_0 + k\sqrt{t}\ [\%\ peso\ de\ cimento] \quad (5)$$

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.

$$C_s = C_0 + \alpha \ln t\ [\%\ peso\ de\ cimento] \quad (6)$$

Onde C_0 é a concentração superficial em um tempo padrão (e.g. 28 dias) e α um valor constante determinado pelos autores como 0.977%/exp(ano).

A Tabela 1 apresenta um resumo dos modelos de concentração superficial de cloretos implementados no *software* desenvolvido.

Tabela 1 – Resumo dos modelos de concentração superficial de cloretos

Autores	Equação	Descrição
-	$C_s = cte$	Constante durante toda a vida útil da estrutura.
Uji *et al*. [7]	$C_s = S\sqrt{t}$	Aumenta com o tempo de exposição.
Collins e Grace [8]	$C_s = C_{s,ult} \cdot \frac{t}{t + T_{cs}}$	Após um aumento inicial nos primeiros anos, torna-se constante.
Ann *et al*. [9]	$C_s = C_0 + k\sqrt{t}$	Apresenta um acumulo inicial e aumenta com o tempo de exposição.
Song *et al*. [10]	$C_s = C_0 + \alpha \ln t$	Apresenta um acumulo inicial e aumenta com o tempo de exposição.

2.2 Coeficiente de difusão

Diversos estudos mostram que a suposição sugerida por Crank [11], na qual o coeficiente de difusão é constante, não está correta. Esta variação do coeficiente de difusão 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 [5]. Desta forma, o *software* desenvolvido neste trabalho possibilita, além da escolha de um coeficiente de difusão constante, a consideração do efeito da temperatura, da umidade relativa, do tempo de exposição (grau de hidratação) 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 - dosagem, cura, composição química do aço e concreto [12] -, multiplicado por uma série de funções multiplicativas, utilizadas para modelar a influência da hidratação do cimento e do ambiente onde o concreto está localizado (Equação 7).

$$D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T).f_2(t_e).f_3(h) \quad (7)$$

Onde Dc,ref é o coeficiente de difusão de referência, medido à temperatura e tempo especificados, f1(T) considera a influência da temperatura, f2(te) do grau de hidratação e f3(h) da umidade relativa dos poros.

2.2.1 Efeito da temperatura

O efeito da temperatura no coeficiente de difusão é estimado através da equação de Arrhenius (Equação 8), que expressa a variação de uma reação química com a temperatura.

$$f_1(T) = \exp\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (8)$$

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 referencia na qual o coeficiente de difusão foi medido (K) e T é a temperatura no concreto (K). Page *et al*. [13] sugere valores para a energia de ativação do processo de 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 ao longo do ano, o *software* desenvolvido, assim como abordagem de Tavares [4], utiliza uma função senoidal. A função utilizada neste trabalho (Equação 9), definida a partir da temperatura máxima anual (T_{max}), da temperatura mínima anual (T_{min}) e do dia em que ocorre a maior temperatura (dia_{max}), determina a temperatura (T) para um determinado dia do ano (t).

$$T = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \times \sin\left(\frac{t}{365} \times 2\pi + \left(0{,}5 - \frac{2 \times dia_{máx}}{365}\right) \times \pi\right) \quad (9)$$

2.2.2 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 [14]. A dependência com o tempo é considerado através da Equação 10.

$$f_2(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad (10)$$

Onde t_{ref} é o tempo no qual foi determinado o coeficiente de difusão de referencia (s), t é o tempo de exposição (s) e m é o fator de redução com a idade. Bamforth (1998) apud Martín-Pérez [15] 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.

2.2.3 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 [15] propõe que a redução na difusidade com a perda de umidade pode ser expressa pela Equação 11.

$$f_3(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1+h_c)^4}\right]^{-1} \quad (11)$$

Onde h é a umidade relativa nos poros do concreto e hc é a umidade na qual o coeficiente de difusão cai para o valor intermediário entre seu valor máximo e mínimo, Bazant e Najjar [16] 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, da forma da Equação 9, definida a partir da umidade máxima anual, da umidade mínima anual e do dia em que ocorre a maior umidade.

2.2.4 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 à fenomenos como o contato com as formas, carbonatação, precipitação de brucita, segregação dos agregados e até mesmo quando o concreto apresenta algum revestimento ou pintura [17].

A existencia 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 maior no interior, ocorre quando há algum efeito barreira na superfície, como precipitação de brucita ou utilização de pintura de revestimento [17].

Andrade *et al*. [17] modela o efeito pele considerando valores diferentes para a difusidade da camada superficial e do interior. Sendo que a concentração de cloretos no limite entre a pele e o interior passa a ser a concentração superfícial (condição de contorno) do interior de concreto. Desta forma, o *software* descrito neste trabalho permite a definição de uma difusividade diferente para a camada de pele, devendo ser definida também sua espessura (Figura 2).

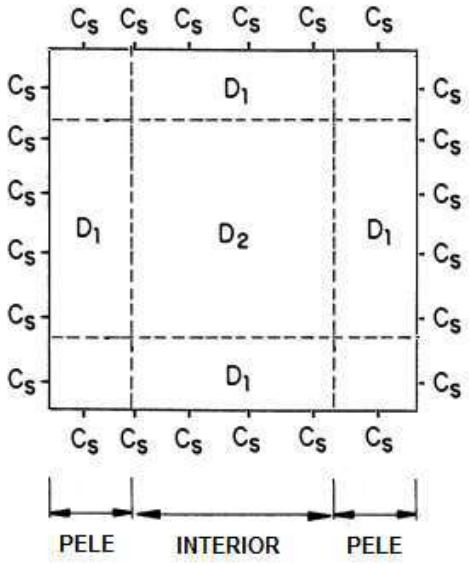

Figura 2: Efeito pele
Fonte: Adaptado de Andrade *et al*. [17]

3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS CLIMÁTICOS NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Nesta seção, o modelo descrito no item anterior é utilizado para analisar a influência de parâmetros climáticos na penetração de cloretos. 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 litoranea de clima consideravelmente mais frio e seco. Os efeitos da temperatura e da umidade são modelados a partir das funções multiplicativas f1(T) e f3(h), presentes na Equação 7. Ou seja, afetam diretamente o coeficiente de difusão de cloretos e, consequentemente, a concentração final de cloretos. Como referencia foi utilizado um exemplo onde o coeficiente de difusão foi mantido constante ao longo de todo o período, ou seja, desconsiderando-se a influencia dos parâmetros climáticos.

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. Para o estudo da influência de cada um dos parâmetros estudados na concentração de cloretos, adota-se um conjunto de valores de referencia e, então, realiza-se a análise individual de cada variável. Para esta análise, a concentração superficial de cloretos foi mantida constante no tempo e os efeitos do grau de hidratação e do “efeito pele” 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 2, as variáveis de controle que compõe este estudo e seus respectivos valores. A concentração superficial de cloretos (Cs) e o coeficiente de difusão de referência (Dc,ref) foram escolhidos dentro dos intervalos encontrados na literatura [4, 5, 7, 9, 10].

Tabela 2 – Análise paramétrica: variáveis de controle

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
Condições de contorno	Concentração inicial (C_0)	0 %
	Concentração superficial de cloretos (Cs)	2 % peso de cimento
Coeficiente de difusão	Coef. de difusão de referência (Dc,ref)	$1x10^{-12}$ m²/s
	Temperatura de referência (T_{ref})	23 ºC
	Energia de ativação (U)	41,8 kJ/mol
	Parâmetro de umidade hc	0,75

Para esta análise, 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*. [18], 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 Insituto Nacional de Meteorologia (INMET[2]), 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 (ECCC[3]), de 1981 a 2010. Os valores utilizados como dados de entrada no *software* estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise paramétrica: parâmetros climáticos anuais

Parâmetros Climáticos		Florianópolis (SC)	João Pessoa (PB)	Vancouver (BC)
Temperatura	Máxima (ºC)	24,6	27,2	18
	Mínima (ºC)	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

3.1 Resultados e discussões

3.1.1 Coeficiente de difusão

A Figura 3 apresenta a variação da função multiplicativa f1(T) ao longo de um ano para as cidades estudadas.

[2] http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas
[3] http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_e.html?stnID=889&autofwd=1

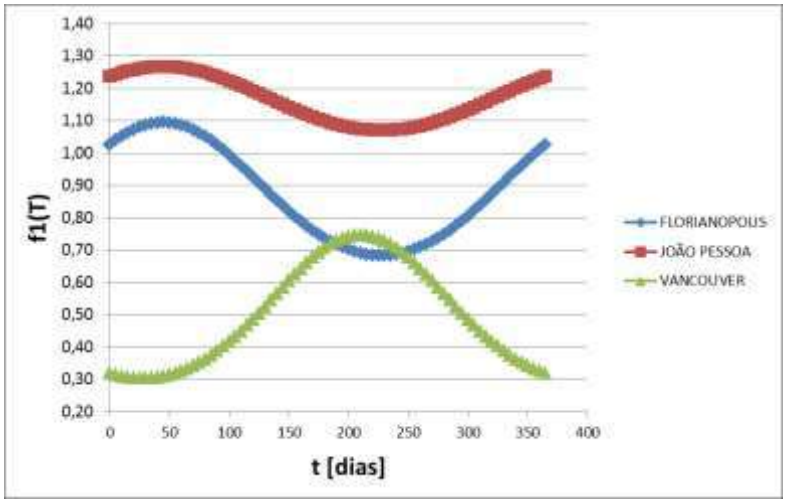

Figura 3: Variação da função multiplicativa f1(T) ao longo de um ano

Um resumo dos valores máximos e mínimos da função multiplicativa f1(T) está exposto na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados: valores máximos e mínimos de f1(T)

Variável		Florianópolis (SC)	João Pessoa (PB)	Vancouver (BC)
f1(T)	Máx.	1,0955	1,2679	0,7471
	Mín.	0,6833	1,0710	0,3043

Pode-se perceber que, quanto menor for a temperatura no concreto, menor será o valor de f1(T) e, consequentemente, menor será o coeficiente de difusão. Ou seja, quanto menor a temperatura, menor a penetração de cloretos. Além disso, observa-se que f1(T) ora é maior que um, aumentando a tendencia de penetração de cloretos, ora é menor, atuando como fator redutor do coeficiente de difusão. Vancouver, por apresentar as temperaturas mais baixas, é a cidade onde ocorre maior redução do coeficiente de difusão devido a influencia da temperatura, chegando a uma redução de até 69,57% nos períodos mais frios e de 25,29% nos períodos mais quentes. Levando-se em conta apenas o efeito da temperatura, a cidade de João Pessoa apresentará coeficiente de difusão mais elevado que a medida de referência ao longo de todo o ano, uma vez que apresenta temperatura mínima anual acima da temperatura de referência na qual foi medido o coeficiente de difusão. Ocorre um aumento deste coeficiente em até 26,79% para os períodos mais quentes e de 7,10% para períodos mais frios, demonstrando uma tendência a uma maior penetração de cloretos. A cidade de Florianópolis apresenta valores intermediários de f1(T). Ainda desconsiderando o efeito da umidade do concreto, o coeficiente de difusão sofre um aumento de 9,55% no verão e uma redução de 31,67% no inverno.

A Figura 4 apresenta a variação da função multiplicativa f3(T) ao longo de um ano para as cidades estudadas.

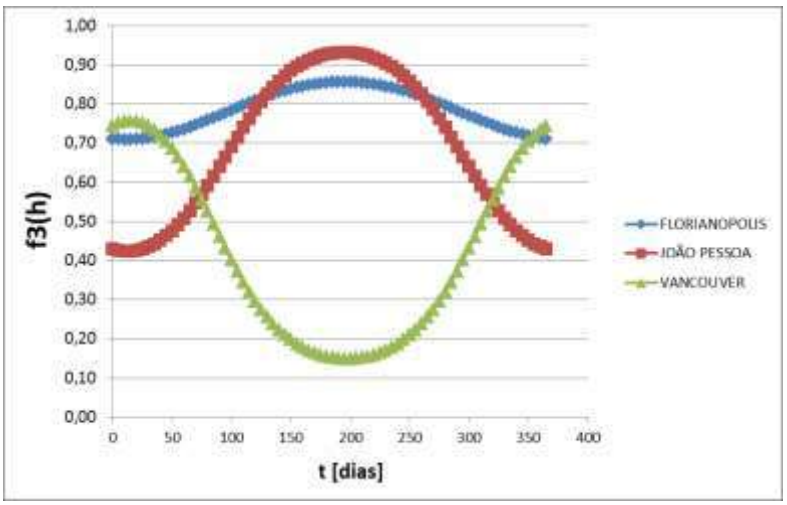

Figura 4: Variação da função multiplicativa f3(h) ao longo de um ano

Um resumo dos valores máximos e mínimos da função multiplicativa f3(h) está exposto na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados: valores máximos e mínimos de f3(h)

Variável		Florianópolis (SC)	João Pessoa (PB)	Vancouver (BC)
f3(h)	Máx.	0,8563	0,9319	0,7577
	Mín.	0,7094	0,4239	0,1498

Quanto a influencia da umidade, percebe-se que, quanto menor o valor da mesma, menor será f3(h), resultando em um valor do coeficiente de difusão reduzido. Ou seja, quanto menor a umidade, menor a penetração de cloretos. Sendo que, para valores de umidade abaixo de 50% o processo de difusão é praticamente interrompido. Além disso, observa-se que f3(h) funciona sempre como fator redutor do coeficiente, uma vez que seu valor máximo é um e ocorre para uma umidade no concreto de 100%. Por apresentar verões bastante secos, a cidade de Vancouver é a que sofre maior influencia da umidade, com reduções no coeficiente de difusão de 24,23% no inverno e 85,02% no verão, desconsiderando-se a ação da temperatura. Na cidade de João Pessoa, o coeficiente de difusão sofre uma redução de 6,81% a 57,61% ao longo do ano. Já para Florianópolis, este coeficiente é reduzido de 14,37% a 29,06%, devido à ação da umidade.

O efeito conjunto da temperatura e umidade no coeficiente de difusão das cidades estudadas é apresentado na Figura 5.

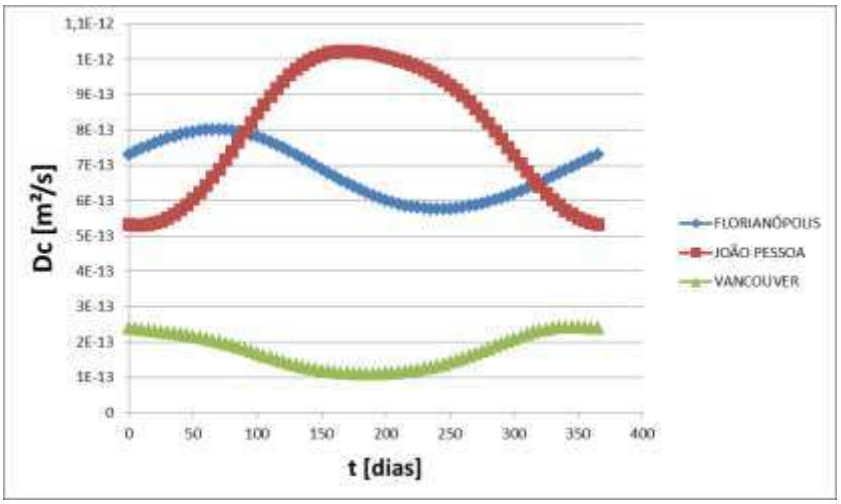

Figura 5: Variação do coeficiente de difusão (Dc) ao longo de um ano

A Tabela 6 apresenta um resumo dos valores máximos e mínimos dos coeficientes de difusão encontrados.

Tabela 6 – Resultados: valores máximos e mínimos de Dc

Variável		Florianópolis (SC)	João Pessoa (PB)	Vancouver (BC)
Dc	Máx.	0,8003	1,0222	0,2423
[10^{-12} m²/s]	Mín.	0,5758	0,5293	0,1096

Observa-se que a cidade de Vancouver, por apresentar temperaturas e umidades mais baixas, obteve os menores valores de coeficiente de difusão e, assim, menor tendência de penetração de cloretos. As reduções para esta cidade são de 75,77% a 89,04% ao longo do ano. Vale ressaltar que o intervalo de variação do coeficiente de difusão não depende apenas dos valores máximos e mínimos de temperatura e umidade, mas também do dia em que estes valores ocorrem (diferença de fase entre as senoides). A cidade de João Pessoa, apesar de exibir todos os valores de f1(T) acima da unidade, obteve valores de coeficiente de difusão acima do valor de referencia apenas para treze dias do ano. Isto devido à influência da umidade (f3(h)), menor que a unidade durante todo o período. Nesta cidade, este coeficiente varia de 52,93% a 102,22% do seu valor de referencia. Já Florianópolis, assim como Vancouver, apresenta redução no coeficiente de referencia ao longo de todo o ano. Redução esta de 19,97% a 42,42%.

3.1.1 Concentração final de cloretos

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.

Todos os valores de concentração de cloretos aqui apresentados se referem a um ponto localizado a 3 cm da superfície esquerda e 4 cm da superfície inferior (Figura 6). Superfícies estas onde foi permitida a penetração de cloretos.

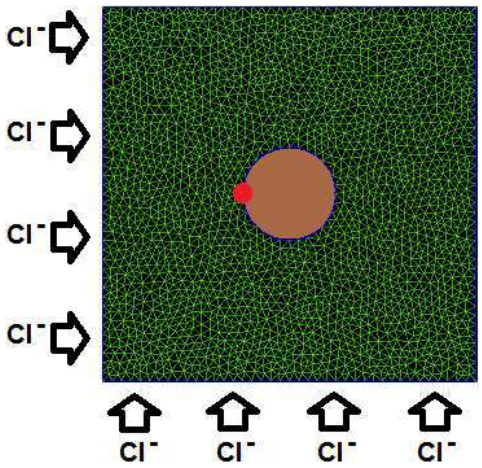

Figura 6 - Resultados: Geometria e ponto para cálculo das concentrações

A Figura 7 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.

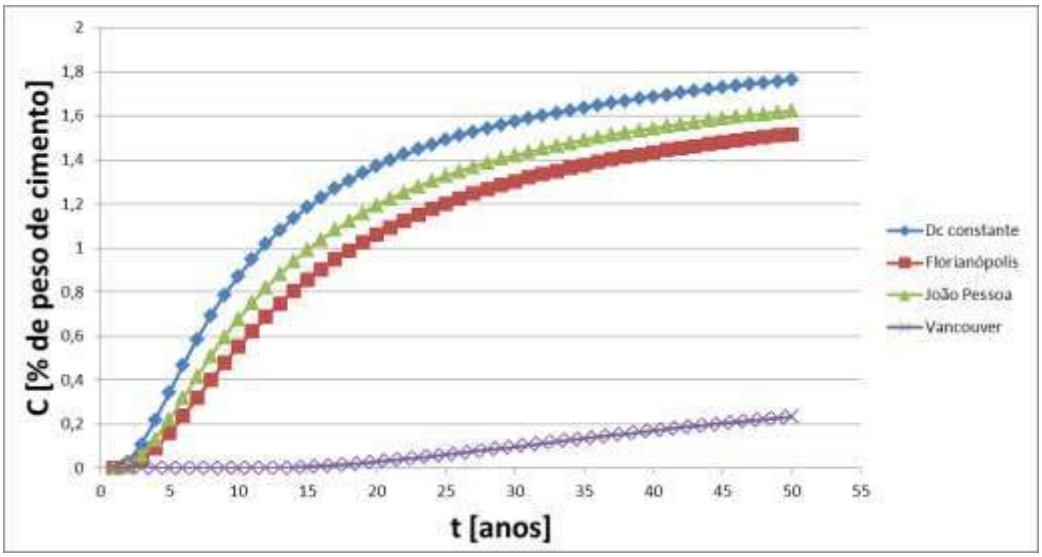

Figura 7 - Resultados: Variação da concentração de cloretos

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

Tabela 7 – Resultados: valores das concentrações de cloretos para 5, 10, 20 e 50 anos

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
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

Pode-se observar que o 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 f1(T) e f3(h), é a que mostra maiores reduções, sendo 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 8 exibe os mapas de isoconcentrações gerados pelo *software* para os casos analizados.

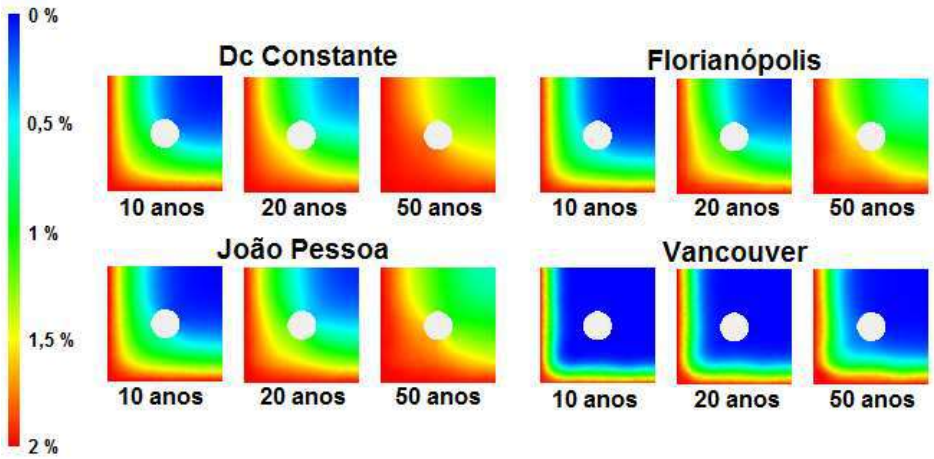

Figura 8 - Resultados: Mapas de isoconcentrações

4. CONCLUSÕES

Este artigo 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 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. Deve ser ressaltado que o *software* possui interface amigável e janelas de entrada de dados que permitem a manipulação de todos os parâmetros considerados.

As cidades de Florianópolis (SC, Brasil), João Pessoa (PB, Brasil) e Vancouver (BC, Canadá) foram escolhidas para análise da influencia de parâmetros climáticos na penetração de cloretos por difusão. Os efeitos da temperatura e da umidade afetam diretamente o coeficiente de difusão de cloretos e, consequentemente, a concentração final de cloretos.

Conclui-se que, quanto menor a temperatura, menor a penetração de cloretos e, quanto menor a umidade, também menor será a penetração de cloretos. Assim, o aumento da concentração de cloretos em determinado ponto varia ao longo do ano de acordo com os parametros climáticos. A maior tendencia de penetração de cloretos ocorrerá em verões úmidos e a menor em invernos secos. Além disso, para temperaturas próximas de zero este fenomeno fica bastante reduzido e, para umidades abaixo de 50%, ele é praticamente inexistente.

Cidades com diferentes climas apresentaram valores de coeficiente de difusão e de concentração de cloretos muito destoantes. Vancouver, por exemplo, apresentou, após 50 anos, uma concentração de cloretos em um ponto a 3 cm da superfície 85,64% menor que o mesmo ponto para a cidade de João Pessoa e 86,78% menor que para o caso de coeficiente de difusão constante, sugerindo tempos de reparo completamente diferentes. Também foi possivel observar que a redução da concentração de cloretos é maior para idades mais baixas.

Dessa forma, fica demonstrada a importancia da consideração dos parametros climáticos na previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, principalmente para idades mais baixas.

É importante salientar que os dados obtidos não foram validados e esta tarefa não faz parte dos objetivos deste artigo. 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 de estruturas de concreto armado.

5. 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.

6. REFERÊNCIAS

[1] Ribeiro, D. et al – *Corrosão em estruturas de concreto armado - Teoria, Controle e Métodos de análise*. Elsevier, 272 p, 2014.
[2] Tuutti, K. - *Corrosion of steel in concrete*, Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 469 p, 1982.
[3] Costa, A. et al., "Modelling of chloride penetration into non-saturated concrete: Case study application for real marine offshore structures". *Construction and Building Materials*, 43, pp. 217-224, 2013.
[4] Tavares, F. - *Coupled model of initiation and propagation of corrosion in reinforced concrete*. Universidad Politécnica de Madrid, Tesis, 166 p, 2013.
[5] 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.
[6] 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.
[7] Uji, K., Matsuoka, Y., and Maruya, T. (1990)., "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.
[8] 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.
[9] 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.
[10] Song, H. *et al*., "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments". *Cement & Concrete Composites*, 30, pp. 113-121, 2008.
[11] Crank, J. - *The Mathematics of Diffusion*. London: Oxford University Press, p. 414, 1975.
[12] Shafei, B. *et al*., "Prediction of corrosion initiation in reinforced concrete members subjected to environmental stressors: A finite element framework". *Cement and Concrete Research*, 42, pp. 365-376, 2012.
[13] Page, C. L. *et al*., "Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes". *Cement and Concret Research*, 11, pp. 395-406, 1981.
[14] Andrade, C. *et al*., "Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices". *Journal of Nuclear Materials*, 412, pp. 209-216, 2011.
[15] Martín-Pérez, B. - *Service life modelling of r.c. highway structures exposed to chlorides*. University of Toronto, Thesis, 168 p, 1999.
[16] Bazant, Z., and Najjar, L., "Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem". *Cement and Concrete Research*, 1, 461–473. 1971.
[17] 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.
[18] 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.