

Considerações Quanto aos Modelos Empregados para a Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado: Despassivação por Íons Cloreto

Jairo José de Oliveira Andrade^{1,¥}

Curso de Engenharia Civil, Universidade Luterana do Brasil, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. R. Duque de Caxias, 1727/502, Centro, Porto Alegre, RS – Brasil. CEP 90010-283.

Denise Carpena Coitinho Dal Molin²

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

RESUMO

Atualmente observa-se que existe uma grande preocupação por parte dos pesquisadores com a previsão da vida útil das estruturas de concreto armado, principalmente nas estruturas localizadas em zonas marinhas, onde a ação dos íons cloreto pode iniciar o processo corrosivo. A forma mais difundida de prever a penetração de cloretos para o interior do concreto é através da solução da equação de difusão representada pela 2ª Lei de Fick que, dependendo das condições de contorno, pode assumir várias configurações. Desta forma, este trabalho tem como objetivo principal apresentar as três formas de solução para a 2ª Lei de Fick propostas por alguns pesquisadores, onde serão feitas considerações a respeito da aplicabilidade das formulações para prever a vida útil das estruturas de concreto inseridas em ambientes com cloretos, além de realizar uma análise crítica sobre o atual estágio de pesquisa dentro dessa área do conhecimento.

1. MODELOS DE PREVISÃO DA VIDA ÚTIL

Através da realização de trabalhos de levantamento de danos e estudos de caso relatados amplamente na literatura, verifica-se que a corrosão de armaduras é o fenômeno mais incidente nas estruturas de concreto armado. Esse processo é geralmente iniciado quando um agente agressivo penetra através da estrutura de poros do concreto até atingir a armadura, ocasionando o fenômeno da despassivação. Basicamente existem dois agentes que podem despassivar a armadura no interior do material. O primeiro deles é o dióxido de carbono (CO₂) presente principalmente na atmosfera circundante das grandes cidades. O mecanismo

¹ Prof. Dr. Curso de Engenharia Civil. Universidade Luterana do Brasil – ULBRA; Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUC/RS

[¥] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (jjoandrade@aol.com; jairo@cpgec.ufrgs.br)

² Prof^a. Dr^a. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

de despassivação pela ação do CO_2 é conhecido como carbonatação do concreto, onde tal processo leva geralmente a uma corrosão do tipo uniforme ao longo da barra.

O segundo agente que pode despassivar uma armadura é o íon cloreto (Cl^-), presente principalmente nas áreas industriais e nas zonas salinas. A corrosão induzida por cloretos ocorre em pontos específicos da armadura, podendo levar a uma redução significativa da seção transversal das barras.

Uma área de pesquisa em crescente desenvolvimento dentro da Engenharia Civil está relacionada à previsão da vida útil das estruturas de concreto em relação à corrosão, induzida tanto pela carbonatação quanto pelos íons cloreto, através da aplicação de modelos matemáticos. Contudo, no desenvolvimento dessas pesquisas estão sendo diagnosticadas algumas dificuldades, como a quantidade e a variabilidade (principalmente temporal) relacionada aos fatores intervenientes nos processos de penetração (ambientais e relacionados ao concreto), a falta de um banco de dados a respeito das características ambientais e do concreto de uma dada obra para validação dos modelos e o tempo necessário para a obtenção de resultados (Andrade, 2001).

Um procedimento prático realizado em obra para se determinar a vida útil de uma dada estrutura consiste na medição dos teores de íons cloreto a profundidades especificadas no elemento estrutural, em um determinado tempo t . A partir daí é montado um perfil de penetração de cloretos onde, a partir de ajustes, são determinados os parâmetros para a previsão da vida útil. Vale salientar que no presente trabalho o termo vida útil está relacionado com o tempo necessário para que os íons cloreto atinjam a armadura, onde desconsidera-se o período de propagação da corrosão. Os parâmetros coletados, bem como algumas formulações empregadas para as previsões, serão objeto de avaliação nos próximos itens.

1.1 Equação de Difusão

Fourier, em 1822, formulou uma equação para prever a condução de calor nos materiais. Contudo, a formulação apresentada só foi empregada pela primeira vez para modelar a difusão em materiais porosos por Fick, em 1855, onde o autor apresentou a sua Segunda Lei de difusão, sendo representada pela Equação 1 (Mejlbro, 1996).

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

Contudo, o emprego da Segunda Lei de Fick para modelar a difusão de cloretos para o concreto só foi apresentada por Collepardi et al. (1972). Com o passar do tempo, muitas pesquisas vêm sendo feitas para avaliar a aplicabilidade das diversas soluções da Equação 1 a fim de prever a penetração de cloretos no concreto, dependendo das condições de contorno adotadas para a solução da mesma. Considerações sobre tal aspecto serão apresentadas e discutidas nos próximos itens.

1.2 Solução da Função de Erro

Empregando-se a transformada de Laplace, pode-se deduzir a solução da Equação 1, sendo representada pela Equação 2.

$$C(x, t) = C_s \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4tD}} \right) \right] \quad (2)$$

onde:

$C(x, t)$ = concentração de cloretos na profundidade x a partir da superfície do concreto em um dado tempo t (%);

C_s = concentração superficial de cloretos (admitida como sendo constante) (%);

x = profundidade (cm);

D = coeficiente de difusão de cloretos (cm^2/ano);

t = tempo (anos); e

erfc = função complementar de erro de Gauss.

Com o perfil de penetração de cloretos são determinados os valores da concentração superficial (C_s) e do coeficiente de difusão de cloretos (D), onde os dados são ajustados empregando-se o Método dos Mínimos Quadrados na solução da Equação 2. Tal método é bastante utilizado na Matemática e na Estatística para a realização de estimativas de tendência de dados, sendo que o fundamento básico do mesmo é a minimização da soma dos desvios quadrados entre os valores de uma variável e os valores que são previstos pelo modelo (Ang e Tang, 1975).

Algumas condições de contorno foram estabelecidas para uma adequada aplicação da Equação 2, tais como (Crank, 1975):

- Admite-se que o concreto é um material homogêneo e isotrópico;
- considera-se que o único mecanismo de transporte atuante é a difusão;
- admite-se que não ocorrem interações entre os cloretos e os componentes do concreto no momento da penetração;
- o meio considerado é infinito; e
- tanto o coeficiente de difusão quanto a concentração superficial de cloretos são constantes ao longo do tempo, isto é, o coeficiente de difusão é completamente independente da concentração superficial.

Contudo, alguns pesquisadores (Swamy et al., 1994; Maage et al., 1996; Andrade, 1999) têm mostrado que algumas dessas premissas não refletem adequadamente o comportamento da penetração de íons no concreto. Alguns autores (Andrade et al., 1996; Borges et al., 1998) citam que os fenômenos de transporte relativos à absorção e à difusão podem estar atuando simultaneamente, principalmente em estruturas inseridas em meio ambiente marinho.

Um exemplo de um perfil genérico de penetração de cloretos ajustado através da Equação 2 encontra-se apresentado na Figura 1.

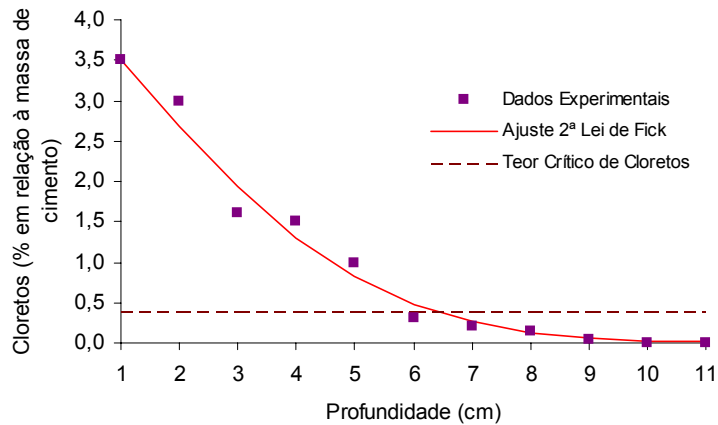


Figura 1-Perfil típico de cloretos em uma estrutura em um tempo t

Verifica-se que o ajuste dos perfis de cloretos através da solução da função de erro apresenta-se satisfatório quando se deseja avaliar a vida útil de uma estrutura em um determinado tempo t . Essa forma de análise é comumente empregada, em função da sua extrema simplicidade na determinação dos parâmetros C_s e D através de ajustes. Contudo, a aplicabilidade da modelagem fica restrita aos casos onde considera-se que tanto a C_s e o D não variam no tempo. Tal condição não corresponde ao comportamento efetivamente observado nas estruturas reais, onde existe um acúmulo de cloretos na superfície dos elementos estruturais (Uji et al. 1990; Swamy et al., 1994). Aliado a tal fato, tem-se que o valor de D tende a diminuir com o tempo, devido à contínua mudança existente na microestrutura do concreto (Mejlbro, 1996).

Ao se medir os perfis de cloreto em um determinado elemento estrutural e em momentos distintos no tempo ($t_3 > t_2 > t_1$), provavelmente obter-se-á uma seqüência de perfis genéricos com uma configuração semelhante à apresentada na Figura 2.

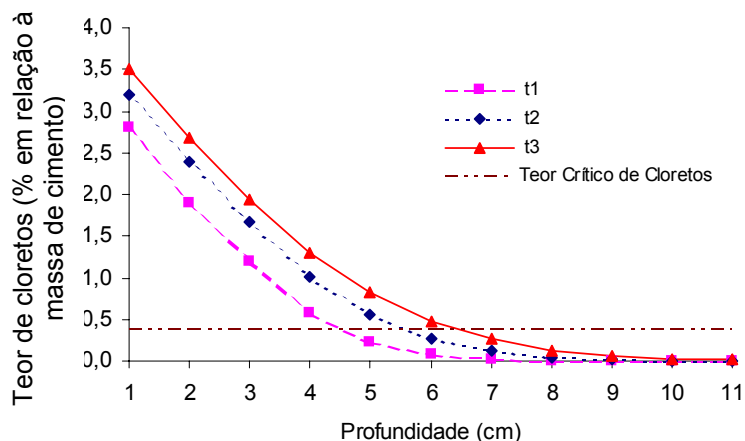


Figura 2-Perfis de cloreto medidos em diferentes momentos durante a vida útil de uma estrutura

Assim verifica-se que, ao se realizar uma inspeção na estrutura nos diferentes tempos, tanto os valores do coeficiente de difusão quanto da concentração superficial serão distintos, apresentando aproximadamente as seguintes relações:

$$C_{s-t_3} > C_{s-t_2} > C_{s-t_1}$$

$$D_{t_3} < D_{t_2} < D_{t_1}$$

Antes de generalizar das colocações apresentadas acima, cabe realizar algumas considerações. Primeiramente tem-se que o crescimento da concentração superficial de cloretos no tempo tende a apresentar um comportamento assintótico crescente, enquanto que a difusão de cloretos tem uma tendência também assintótica, contudo a sua forma é decrescente (Andrade, 2001). Por conseguinte, pode-se considerar que, para valores de tempo elevados ($t \rightarrow \infty$), existe uma *tendência* de constância para tais parâmetros.

Ainda assim, caso tal linha de inferência seja seguida, deve-se considerar que, ao se realizar uma inspeção em um tempo t ($t \gg 0$) em uma estrutura, teria-se um valor de coeficiente de difusão D_t que poderia ser admitido como sendo à favor da segurança, pois qualquer valor obtido em uma inspeção realizada em um tempo $t_1 > t$ apresentaria uma difusão de cloretos menor ($D_{t_1} < D_t$). Contudo, o valor da concentração superficial calculado em t seria menor que aquele obtido no tempo t_1 ($C_{st_1} > C_{st}$), e uma avaliação inadequada de tal fator pode acarretar problemas na previsão da vida útil da estrutura.

De acordo com as considerações apresentadas, observa-se que esta solução da 2ª Lei de Fick apresenta-se adequada para estimar os valores dos parâmetros (C_s e D) em um instante durante a vida útil da estrutura, principalmente em função da sua fácil aplicação. Além disso, na dedução da formulação considera-se de forma genérica a influência de certos fenômenos físicos, relacionados às propriedades de transporte em materiais porosos. Desta forma, o modelo resultante não é oriundo de uma série de experimentos executados em laboratório, tornando assim a aplicabilidade do mesmo bastante significativa. Entretanto, a extrapolação dos valores numéricos encontrados para outros intervalos de tempo deve ser analisada com bastante cautela, a fim de que não ocorram diferenças significativas na previsão do tempo para despassivação de um elemento de concreto armado (Castro et al., 1999).

1.3 Solução proposta por Uji et al. (1990)

A fim de considerar o efeito das condições ambientais na penetração de cloretos no concreto, Uji et. al. (1990) apresentaram um modelo que considera a variação da concentração superficial de cloretos no tempo. Segundo os autores, tal parâmetro varia linearmente ou proporcionalmente à raiz quadrada do tempo. Assim, as condições de contorno para a solução da função de erro (Equação 2) ficam sendo iguais às Equações 3 e 4.

$$C(x, 0) = 0 \rightarrow t = 0 \tag{3}$$

$$C(0, t) = \phi(t) \rightarrow x = 0 \tag{4}$$

Para o caso onde admite-se que a função de crescimento da concentração superficial de cloretos no tempo é da forma $\phi(t) = kt^{1/2}$, a solução da Equação 2 é dada pela Equação 5.

$$C(x, t) = k \sqrt{t} \cdot \left\{ e^{-\frac{x^2}{4Dt}} - \left[\frac{x \sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

onde:

$C(x, t)$ = concentração de cloretos na profundidade x a partir da superfície do concreto em um dado tempo t (%);

k = concentração superficial inicial de cloretos (%);

x = profundidade (cm);

D = coeficiente de difusão de cloretos (constante) (cm^2/ano);

t = tempo (anos); e

erfc = função complementar de erro de Gauss.

Na Equação 5 o valor de k corresponde ao teor de cloretos na superfície do elemento estrutural no final do primeiro ano de exposição do mesmo ao meio ambiente. Os perfis típicos de penetração de cloretos simulados segundo a Equação 5 estão apresentados na Figura 3.

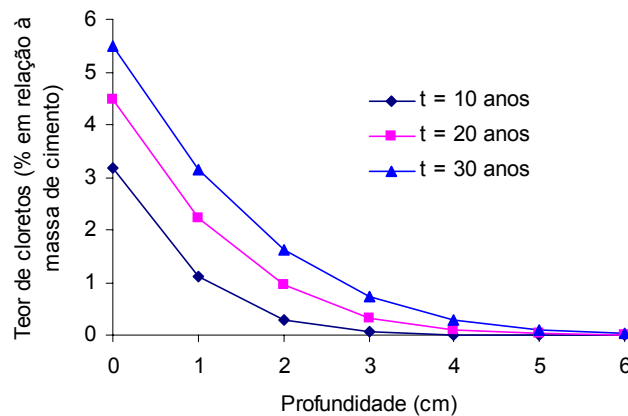


Figura 3-Perfil de cloretos típico segundo a solução proposta por UJI et al. (1990)

Observa-se que a adoção da hipótese de crescimento da concentração superficial de cloretos no tempo corresponde ao fenômeno que se observa efetivamente nas estruturas. Contudo, análises mais detalhadas devem ser realizadas a fim de verificar se as leis de comportamento admitidas para tal fator efetivamente correspondem à realidade.

1.4 Solução proposta por Mejlbro (1996)

Um passo importante na evolução da modelagem do processo de difusão de íons ao concreto foi dado por Mejlbro (1996), que fez a resolução completa da Segunda Lei de Fick, considerando tanto o coeficiente de difusão quanto a concentração superficial de cloretos como sendo variáveis no tempo. O pesquisador verificou, através da aplicação de uma série de condições iniciais e desenvolvimentos matemáticos, que a solução completa da Segunda Lei de Fick pode ser dada pela Equação 6.

$$C_{cr} = C(x, t) = C_i + [C_s(t) - C_i] \cdot \Psi_p \left(\frac{x}{2\sqrt{(t - t_{ex})D_a}} \right) \quad (6)$$

A função Ψ_p (chamada de função de Mejlbro) foi tabulada pelo autor em Mejlbro (1996). Poulsen (1996) empregou a equação proposta por Mejlbro (1996) para predição da vida útil de estruturas contaminadas por cloretos, encontrando resultados satisfatórios para um estudo de caso realizado em uma estrutura localizada na área salina na Dinamarca.

Mejlbro (1996) considerou que a concentração superficial de cloretos nos elementos estruturais é dependente do tempo, e propôs que esta relação deve obedecer a uma família de função do tipo (Equação 7):

$$C_s(t) = C_i + S [(t - t_{ex})D_a]^p \quad (7)$$

onde:

$C_s(t)$ = concentração de cloretos na superfície do concreto (%);
 C_i = concentração inicial de cloretos no interior do concreto (%);
 t = tempo de exposição (anos);
 t_{ex} = tempo desde a primeira exposição da estrutura aos cloretos (anos);
 D_a = coeficiente de difusão (cm^2/ano); e
 S e p = constantes que dependem de ajustes experimentais.

Considerando que não foram incorporados cloretos no processo de mistura do concreto, admite-se que o valor de C_i é igual a zero. Desta forma, a Equação 7 terá a forma da Equação 8.

$$C_s(t) = S [(t - t_{ex})D_a]^p \quad (8)$$

MEJLBRO (1996) ainda admitiu a variação do coeficiente de difusão no tempo. Segundo o autor, o valor de D_a pode ser expresso através da Equação 9.

$$D_a = D_{aex} \left(\frac{t_{ex}}{t} \right)^\alpha \quad (9)$$

onde:

D_{aex} = coeficiente de difusão de cloretos no tempo t_{ex} (cm^2/ano);
 α = parâmetro que depende das características do concreto.

O valor de D_{aex} corresponde ao coeficiente de difusão que pode ser obtido através de investigações experimentais antes de se construir a estrutura. Contudo, caso tal parâmetro não tenha sido medido, o autor recomenda empregar a Equação 10.

$$D_{aex} = 50000 \sqrt[10]{a/c} \quad (10)$$

A variação do coeficiente de difusão em relação aos diferentes tipos de concreto está incorporada à formulação através do valor de α , que é representado através da Equação 11.

$$\alpha = 3,0 \cdot (0,55 - a / c) \quad (11)$$

Retornando a uma análise da Equação 8, observa-se que atualmente não se dispõe de muitos dados a respeito do comportamento das variáveis S e p . Swamy et. al. (1994) realizaram medidas da concentração superficial de cloretos em estruturas localizadas no Japão, onde os autores compilaram uma grande quantidade de dados referentes à concentração superficial de cloretos em várias estruturas de concreto localizadas em diferentes condições de exposição (submersa, zona de variação de marés, zona de respingo de marés e área sob a ação da névoa salina). A variação da concentração superficial de cloretos no tempo, calculado a partir desses dados, está apresentada na Figura 4 (Swamy et. al., 1994).

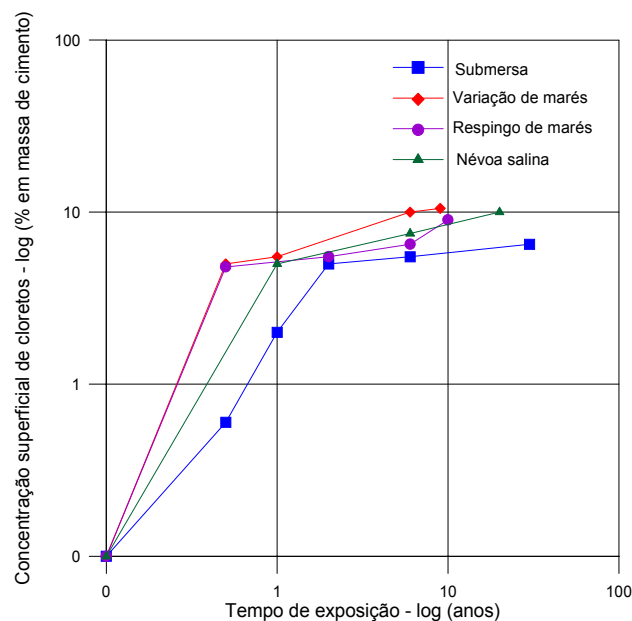


Figura 4-Concentração superficial de cloretos em função do tempo de exposição para diferentes ambientes (Swamy et al., 1994)

2. COMPARAÇÕES ENTRE AS SOLUÇÕES DA 2ª LEI DE FICK PARA A PREDIÇÃO DA VIDA ÚTIL

Foram realizadas análises para verificar o comportamento do perfil de penetração de cloretos no concreto, considerando as formulações apresentadas anteriormente. Para tanto, foram empregados os dados experimentais apresentados por Thomas e Bamforth (1999), onde os autores realizaram ensaios de exposição prolongada de blocos de concreto contendo cinza volante, onde as características do material estão apresentadas na Tabela 1. Após 28 dias de cura, os mesmos foram expostos em atmosfera marinha durante 8 anos, onde foram realizadas medidas periódicas dos teores de cloretos totais no material.

Tabela 1-Quantidade de material empregado para a moldagem dos blocos de concreto
(Thomas e Bamforth, 1999)

| Parâmetros | Valores |
|--------------------------|------------------------|
| Cimento Portland | 227 kg/m ³ |
| Cinza volante | 98 kg/m ³ |
| Água | 170 kg/m ³ |
| Relação água/aglomerante | 0,54 |
| Areia | 585 kg/m ³ |
| Brita | 1305 kg/m ³ |
| Resistência (28 dias) | 49,6 MPa |

A fim de possibilitar a realização de comparações entre os modelos avaliados, realizou-se inicialmente uma uniformização das variáveis para cada formulação. Os parâmetros iniciais adotados em tal procedimento para $t = 1$ ano, obtidos através de ajustes das Equações 2, 5 e 6 aos pontos experimentais determinados por Thomas e Bamforth (1999), estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2-Parâmetros determinados através do trabalho experimental realizado por Thomas e Bamforth (1999) para $t = 1$ ano

| Variável | Símbolo | Unidade | Função de erro | Solução avaliada | |
|--|----------|----------------------|----------------|-------------------|----------------|
| | | | | UJI et al. (1990) | MEJLBRO (1996) |
| Concentração superficial de cloretos | C_s | % | 5,047 | – | 5,047 |
| Coeficiente de difusão de cloretos | D | cm ² /ano | 0,523 | 0,753 | – |
| Teor de cloretos absorvidos no 1º ano de exposição | k | % | – | 5,519 | – |
| Parâmetros ambientais | S | % | – | – | 2,955 |
| | p | – | – | – | 0,325 |
| Concentração crítica de cloretos | C_{cr} | % | 0,4 | | |
| Espessura de cobrimento | x | cm | Variável | | |
| Tempo | t | ano | 1 | | |
| Tempo da primeira exposição aos cloretos | t_{ex} | dias | 28 | | |
| Relação a/c | a/c | – | 0,54 | | |

Obs.: as células marcadas com o símbolo “–” indicam que tal parâmetro não é necessário para a determinação dos perfis de penetração de cloretos para a solução avaliada

Desta forma, com os dados apresentados na Tabela 2, foram ajustados os dados experimentais para as três soluções da 2ª Lei de Fick, conforme pode ser observado na Figura 5, na Figura 6 e na Figura 7.

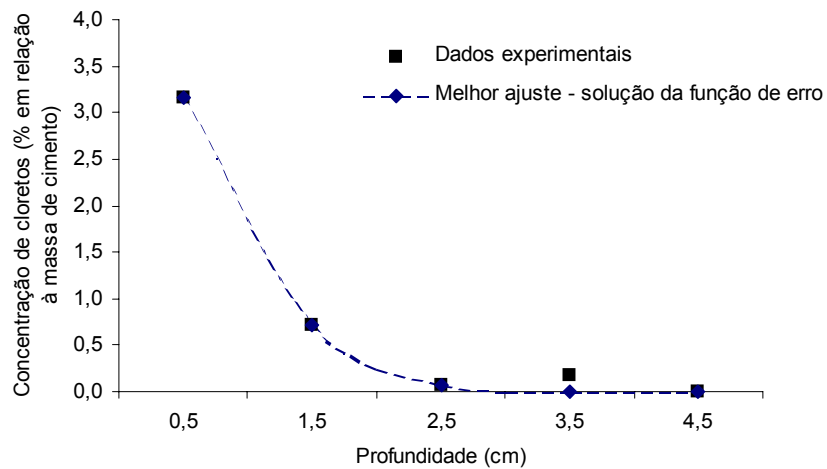


Figura 5-Melhor ajuste dos perfis de penetração de cloretos considerando a solução da função de erro, utilizando as variáveis apresentadas na Tabela 2 ($t = 1$ ano)

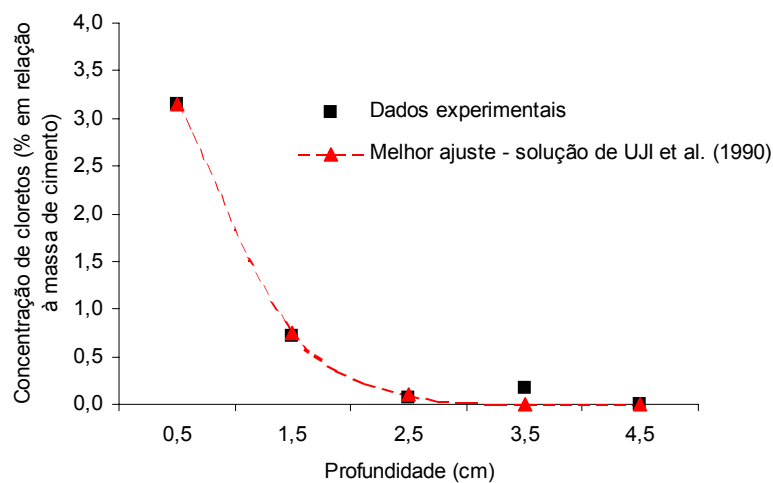


Figura 6-Melhor ajuste dos perfis de penetração de cloretos considerando a solução da 2ª Lei de Fick proposta por Uji et al. (1990), utilizando as variáveis apresentadas na Tabela 2 ($t = 1$ ano)

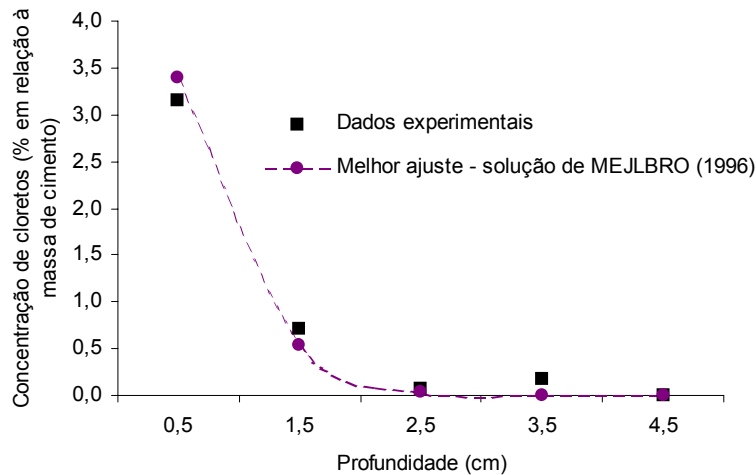


Figura 7-Melhor ajuste dos perfis de penetração de cloretos considerando a solução da 2ª Lei de Fick proposta por Mejlbro (1996), utilizando as variáveis apresentadas na Tabela 2 (t = 1 ano)

Desta forma, pode-se observar que, com os dados apresentados na Tabela 2, as 3 diferentes soluções propostas na literatura para a 2ª Lei de Fick ajustam-se bem aos dados experimentais apresentados por Thomas e Bamforth (1999), considerando um período de um ano de exposição. Sendo assim, com base nos dados da Tabela 2, foi realizada uma previsão da evolução do perfil de concentração de cloretos considerando as três soluções da 2ª Lei de Fick. Para tanto, foram considerados os dados experimentais dos teores de cloretos obtidos por Thomas e Bamforth (1999) para o mesmo concreto inserido na mesma condição de exposição (atmosfera marinha) em um tempo de exposição de 8 anos, onde os resultados experimentais obtidos pelos autores e os melhores ajustes para as funções estão apresentados na Figura 8.

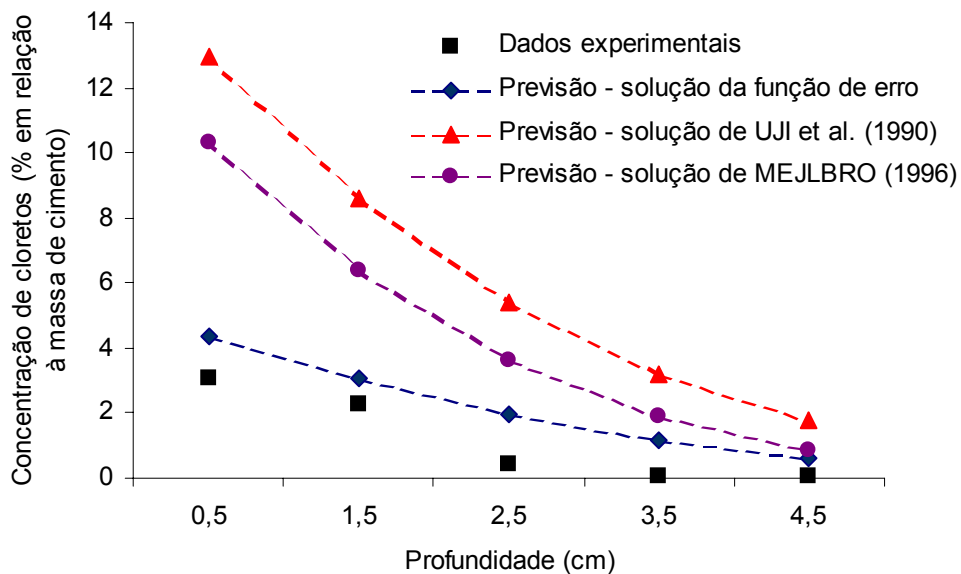


Figura 8-Perfis de penetração de cloretos considerando as 3 diferentes soluções da 2ª Lei de Fick utilizando as variáveis apresentadas na Tabela 2 (t = 8 anos)

Observa-se que a solução da função de erro é a que mais se aproxima do perfil real de penetração para a idade considerada. Já as soluções de Uji et al. (1990) e de Mejlbro (1996) para a 2ª Lei de Fick apresentaram valores de concentração maiores que o perfil real de penetração determinado. Para o caso a solução de Uji et al. (1990), tal fato pode estar ligado ao aumento da concentração de cloretos na superfície do concreto, fazendo com que aumente bastante a penetração de cloretos para o interior do material, além de desconsiderar o fato do decréscimo do coeficiente de difusão de cloretos ao longo do tempo.

Já a solução apresentada por Mejlbro (1996) apresentou um perfil de penetração de cloretos intermediário entre os outros dois modelos. Tal fato pode ser explicado pela redução do coeficiente de difusão de cloretos que ocorre com o passar do tempo, aumentando a capacidade de proteção do concreto à penetração de agentes agressivos.

Com base nos dados apresentados na Tabela 2, verificou-se a evolução do teor de cloretos no decorrer do tempo considerando uma profundidade constante igual a 4,5 cm, conforme pode-se observar na Figura 9.

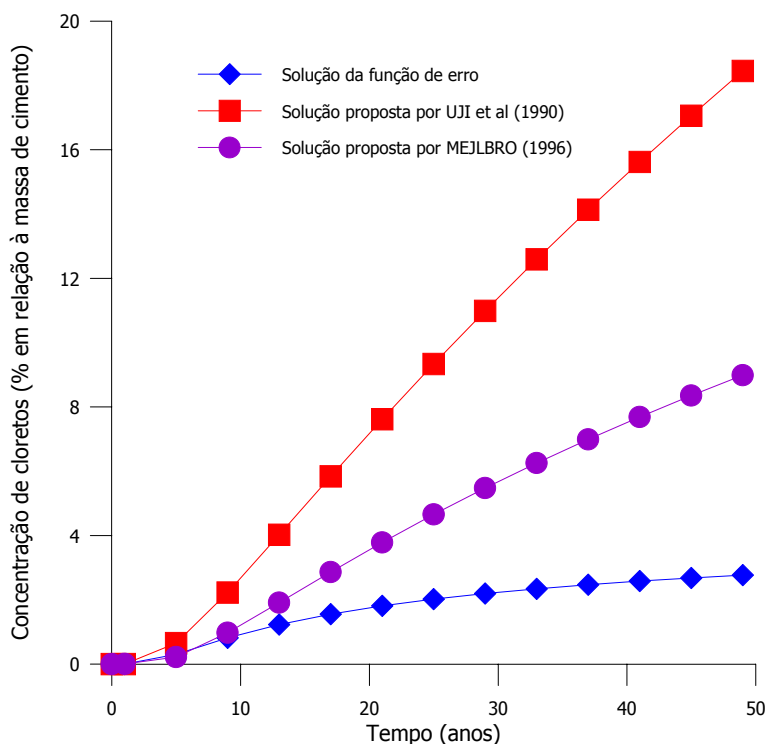


Figura 9-Evolução do teor de cloretos no tempo para $x = 4,5$ cm segundo as formulações apresentadas

Com a evolução do tempo (Figura 9), o crescimento da concentração de cloretos a uma profundidade de 4,5 cm no interior do concreto é muito maior para a solução proposta por Uji et al. (1990). Como nesta solução a concentração de cloretos apresenta uma taxa elevada de crescimento na superfície do elemento estrutural, a tendência de maiores concentrações internas de cloretos a uma dada profundidade também é maior, onde se desconsidera a minimização do coeficiente de difusão de cloretos no tempo. Já para o caso da solução apresentada por Mejlbro (1996), o efeito da diminuição do coeficiente de difusão de cloretos no tempo tende a minimizar o crescimento da concentração superficial de cloretos no interior do elemento estrutural. Por isso, como na solução da função de erro é assumido que não existem variações da concentração superficial e do coeficiente de difusão de cloretos, a

taxa de crescimento da concentração no interior do concreto tende a ser menor no decorrer do tempo.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados das análises realizadas mostram a importância da adequada escolha do modelo de predição para se calcular a vida útil para uma estrutura de concreto armado inserida em um ambiente com cloretos. Muitos relatos têm sido publicados evidenciando a precocidade verificada na degradação das estruturas de concreto quando atacadas pelo fenômeno corrosivo. Nesse sentido, percebe-se a importância de se estabelecer procedimentos construtivos adequados às condições de exposição da estrutura, a fim de maximizar a vida útil das mesmas. Simultaneamente, pesquisas devem ser realizadas no sentido de desenvolver e validar modelos de predição, que contemplem o mais realisticamente o fenômeno estudado.

Sendo assim, no presente trabalho observou-se que as 3 soluções da 2ª Lei de Fick que podem ser empregadas para a previsão do tempo de despassivação de uma estrutura de concreto armado ajustam-se muito bem a um dado perfil de cloretos, considerando uma certa idade. Contudo, observou-se que as mesmas apresentam resultados diversos no momento de prever a evolução do perfil de concentração de cloretos para períodos maiores de tempo, considerando os mesmos parâmetros adotados no ajuste inicial, onde as principais diferenças constatadas podem ser explicadas através das seguintes colocações:

- O modelo que representa a solução da função de erro (Equação 2) mostrou-se mais próximo ao perfil experimental obtido. Tal fato pode estar ligado à condição de exposição da estrutura, pois em atmosferas marinhas há o fenômeno de molhagem e secagem que ocorre na superfície dos elementos estruturais. Esse efeito pode vir a remover uma parte da concentração superficial de cloretos no concreto, minimizando conseqüentemente a penetração deste material no interior do mesmo. Além disso há a diminuição do coeficiente de difusão, que vai densificando mais a matriz cimentante com o passar do tempo. Contudo, outras verificações devem ser realizadas, a fim de ratificar a hipótese mencionada;
- já a solução proposta por Uji et al. (1990), que considera o crescimento da concentração superficial de cloretos no concreto, apresentou valores entre 3 e 5 vezes maiores que os dados experimentais. Tal fato é de se esperar, visto que se considerou um aumento da concentração superficial proporcional à raiz quadrada do tempo, sem que o coeficiente de difusão de cloretos diminuísse no mesmo período em função das modificações microestruturais que ocorrem no concreto; e
- o perfil de concentração de cloretos obtido através da solução proposta por Mejlbro (1996) não apresentou valores próximos aos dados experimentais obtidos por Thomas e Bamforth (1999), apesar da presente solução da 2ª Lei de Fick estar mais próxima de uma condição real – onde teoricamente se considera que há um decréscimo do coeficiente de difusão e um aumento da concentração superficial de cloretos no tempo. Tal fato pode estar ligado a uma inadequada estimativa das leis de comportamento referentes tanto ao crescimento da concentração superficial de cloretos (Equação 8) quanto da diminuição do coeficiente de difusão (Equação 9) apresentadas na solução proposta.

Desta forma, em função das considerações apresentadas, observa-se a premente necessidade da realização de maiores investigações no sentido de validar a aplicabilidade das formulações para a adequada previsão do tempo para despassivação de uma estrutura de concreto armado inserida em ambientes com cloretos.

REFERÊNCIAS

Andrade, C., Chloride Penetration Modelling. In: Workshop Design of Durability of Concrete. *Proceedings*. Berlin, 1999. 5p.

Andrade, J. J. O., Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos. *Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 2001. 277p.

Ang, A.; Tang, W., Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles. v. 1, 1ª Ed., Ed. *John Wiley and Sons*, 1975. 409p.

Borges, P. C. et al., *Corrosión en Estructuras de Concreto Armado: Teoría, Inspección, Diagnóstico, Vida Útil y Reparaciones*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, *IMCYC*. 1ª Ed., 1998. 128p.

Castro, P. et al., Chloride Penetration Profiles in Marine Environments. In: II International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. *Proceedings*. Malhotra, Prudêncio, Helene e Dal Molin (Eds.) SP186-22. Gramado, 1999. p. 371-389.

Colleparidi, M. et. al., Penetration of Chloride Ions Into Cement Paste and Concrete. *American Ceramic Society*, v. 55, USA, 1972.

Crank, J., *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, 2ª Ed. 1975. 414p.

Maage, M. et. al., Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment. *ACI Materials Journal*, v. 93, nº 6, 1996. p. 602-608.

Mejlbro, L., The Complete Solution of Fick's Second Law of Diffusion with Time-Dependent Diffusion Coefficient and Surface Concentration. In: Durability of Concrete in Saline Environment. *Proceedings*. P. Sandberg (Ed.) Lund, May 1996. p. 127-158.

Poulsen, E., Estimation of Chloride Ingress into Concrete and Prediction of Service Lifetime with Reference to Marine RC Structures In: Durability of Concrete in Saline Environment. *Proceedings*. P. Sandberg (Ed.) Lund, May 1996. p. 113-126.

Poulsen, E.; Karlsson, M.; Østerdal, A., Design of Rebar Covers in Marine RC Structures. In: Odd E. Gjorv Symposiun on Concrete for Marine Structures. P. K. Mehta (Ed.). *Proceedings*. New Brunswick, 1996. p. 191-206.

Swamy, R. N. et al., A Critical Evaluation of Chloride Penetration into Concrete in Marine Environment. In: Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. R. N. Swamy (Ed.). *Proceedings*. Sheffield Academic Press, 1994. p. 404-419.

Uji, K. et al., Formulation of an Equation for Surface Chloride Content of Concrete due to Permeation of Chloride. In: Corrosion of Reinforcement in Concrete. Ed. C. L. Page. *Proceedings*. London, 1990. p. 285-297.

Thomas, M. D. A.; Bamforth, P. B., Modeling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 29, 1999. p. 487-495.