

## CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DA DETERMINAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM AMBIENTES COM ÍONS CLORETO

Felype Rayan da Silva Sousa (Engenheiro Civil). E-mail: felype.rayan.ss@gmail.com  
Dr. Raydel Lorenzo Reinaldo (Professor na Universidade Federal do Tocantins). E-mail: rlorenzo@uft.edu.br

**Resumo:** Existem muitos modelos para calcular o perfil de penetração de cloretos no concreto com o tempo, para a previsão da vida útil, quanto a corrosão iniciada pela difusão de cloretos. Entretanto, existem grandes diferenças nos resultados obtidos pelos modelos propostos tornando difícil a escolha do mais adequado. Portanto, o presente trabalho objetiva uma comparação das diversas modelagens de penetração de cloretos e o cálculo da vida útil. Para isso, um estudo experimental foi realizado para a obtenção dos parâmetros de cálculos necessários para conseguir aplicar a um suposto elemento com as características do concreto elaborado. Ao fim do estudo foi possível avaliar que os modelos considerando apenas a variação da concentração superficial de cloretos no tempo, tendem a fornecer perfis de penetração de íons cloretos com elevada concentração deste elemento, quando comparado com modelos que consideram a concentração superficial constante no tempo. A modelagem de Mejlbro (1996), por sua vez, apresenta perfis de penetração intermediários quando comparado com os demais modelos estudados. Destaca-se que mesmo com as informações supracitadas, é errôneo adotar um único modelo, entre os demais existentes, como sendo o capaz de fornecer menor ou maior valor de vida útil, pois nos períodos de pouca idade é possível constatar que o coeficiente de difusão influencia de forma significativa os perfis de penetração de cloretos.

**Palavras-Chaves:** Corrosão, Íons cloreto, Difusão de Cloreto, Vida útil, Concreto armado.

## CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE DETERMINATION OF THE SERVICE LIFE OF CONCRETE STRUCTURES UNDER A CHLORIDE ION ENVIRONMENT

**Abstract:** There are many models to calculate the penetration profile of chlorides in the concrete over time, for the prediction of the useful life, as for the corrosion initiated by the chlorides diffusion. However, there are large differences in the results obtained by the proposed models, making it difficult to choose the most appropriate one. Therefore, the present work aims at a comparison of the different chloride penetration modeling and the calculation of the useful life. For this, an experimental study was carried out to obtain the necessary calculation parameters to be able to apply to a supposed element with the characteristics of the elaborated concrete. At the end of the study it was possible to evaluate that the models considering only the variation of the surface concentration of chlorides in the time, tends to provide profiles of penetration of chloride ions, in the time, with high concentration of this element, when compared with models that consider the superficial concentration constant in time. The modeling of Mejlbro (1996), in turn, presents intermediate penetration profiles when compared with the other models studied, this is due to considering both the surface concentration and the diffusion coefficient of chlorides varying over time. It should be noted that even with the above information, it is erroneous to adopt a single model, among other existing ones, as being able to provide a lower or higher value of useful life, since in the small age it is possible to verify that the diffusion coefficient significantly influence the penetration profiles of chlorides.

**Keywords:** Corrosion, Chloride ions, Chloride diffusion, Service life, Reinforced concrete.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de minimizar, ou até mesmo, eliminar gastos com manutenção, reparos estruturais e possíveis impactos ambientais, econômicos e de níveis sociais, a previsão da vida útil de estruturas de concreto armado (principalmente na etapa de projeto) se faz necessária, pois determinará o período de tempo em que o elemento estrutural manterá suas características e seu desempenho para qual foi projetado. Devido à importância de sua determinação, vários pesquisadores se esforçam para apresentar uma modelagem matemática da vida útil dos elementos estruturais.

A durabilidade do concreto armado, tem chamando a atenção de estudiosos também pelo fato das manifestações patológicas gerarem altos custos com recuperação e manutenção, além do temor da falta de segurança destes elementos (HOFFMANN, 2001). Entre as manifestações patológicas que podem atingir o concreto armado, a corrosão das armaduras é a principal, por ser a mais incidente, além de se enquadrar como a mais onerosa para o processo de recuperação (CARMONA, 2005).

Por muito tempo, estudos sobre a vida útil de estruturas de concreto armado quanto a corrosão eram poucos difundidos, pois o dimensionamento do elemento estrutural estava voltado a satisfazer a resistência do material a um determinado esforço. Esse modo de pensar errôneo foi estimulado principalmente pelo aço se apresentar imerso a uma matriz de concreto, gerando a chamada zona passivadora, além de estar coberto fisicamente por uma camada de concreto, promovendo, assim, uma falsa sensação de proteção da armadura contra corrosão (TESSARI, 2001).

Alguns agentes agressivos, podem ainda, acelerar a etapa de início da corrosão. Entre os agentes indutores da corrosão, destaca-se o íon cloreto como sendo um dos principais causadores de deterioração, por ser considerado um dos agentes mais agressivos ao concreto armado, podendo penetrar nas estruturas de concreto principalmente por absorção e difusão (ANDRADE, 2001; CASCUDO, 1997).

Portanto, pelos danos provenientes da corrosão e devido à difusão dos íons cloreto ser um dos principais responsáveis pelo processo de sua iniciação, grupos de pesquisas direcionam seus estudos a fim de determinar a vida útil de estruturas de concreto armado quanto à corrosão iniciada por íons cloreto, por meio da difusão destes agentes.

Os estudos da vida útil de estruturas de concreto armado podem ser baseados em modelos determinísticos, cujas equações levam em consideração o movimento dos fluidos nos poros, de modo a determinar o tempo necessário para que os agentes degradantes deteriorem a estruturas. Nos casos de corrosão por ação da difusão de cloretos, a segunda lei de Fick é a ferramenta mais utilizada para o cálculo do período de iniciação da corrosão. Essa lei é apresentada como uma equação diferencial que pode ser resolvida por modelos que interagem diretamente com a equação ou por métodos numéricos, como o método de elementos finitos (LORENZO e OSSORIO, 2014). Porém, algumas de suas soluções deixam de considerar parâmetros relacionados ao meio ambiente e modificações da microestrutura do concreto ao longo do tempo, como, por exemplo, a concentração superficial de cloretos e a variação do coeficiente de difusão (ANDRADE e RIZZON, 2007).

Desta forma, neste artigo se realiza um estudo sobre a influência da variação da concentração superficial e do coeficiente de difusão de cloretos no tempo, na formulação matemática para determinação da vida útil.

## **2. MODELOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS**

### **2.1 Modelagem com concentração superficial e coeficiente de difusão invariáveis no tempo**

A segunda lei de Fick é o modelo mais difundido para o cálculo da concentração de cloretos no concreto, devido principalmente à sua fácil aplicabilidade gerada pelas simplificações existentes como: admissão do concreto ser um material homogêneo, o transporte dos íons cloreto são feitos apenas por difusão, tanto a concentração superficial quanto a difusão de cloretos são constantes no tempo e os componentes do concreto não reagem com os cloretos (ANDRADE, 2001). A Eq. (1) representa matematicamente a solução clássica desta lei.

$$C_{(x,t)} = C_s \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4 \cdot t \cdot D_{ref}}} \right) \right] \quad (1)$$

Onde:

$C_{(x,t)}$  = concentração de cloretos na profundidade  $x$  em um dado tempo  $t$  (%);

$x$  = profundidade a partir da superfície do concreto (cm);

$C_s$  = concentração superficial de cloretos (%);

$\operatorname{erfc}$  = função erro complementar de Gauss;

$t$  = tempo de exposição do agente aos íons cloreto (anos);

$D_{ref}$  = coeficiente de difusão (cm<sup>2</sup>/ano);

Andrade e Rizzon (2007) estudaram a penetração de cloretos em diferentes tipos de cimento e concluíram que o tempo de vida útil, determinado por este modelo não representa o tempo de vida real, limitando assim a utilização desse modelo apenas para se determinar valores de concentração superficial e coeficiente de difusão. Essa conclusão é embasada pelo fato de que a segunda lei de Fick desconsidera parâmetros indispensáveis como tipo de cimento, a variação da concentração superficial e coeficiente de difusão, além de presumir que o concreto está completamente hidratado, tonando esse material inerte a qualquer ação do ambiente ao seu redor.

## 2.2 Modelos em que somente a concentração superficial varia no tempo

Uji et al. (1990) aprofundaram seus estudos e sugerem que a concentração de cloretos na superfície do elemento pode variar linear ou proporcionalmente à raiz quadrada do tempo, e adaptam tal conceito à segunda lei de Fick. As equações para cada uma das situações citadas são:

– Eq. (2), para a concentração superficial variando linearmente

$$C_{(x,t)} = k \cdot \sqrt{t} \cdot \left\{ \left( 1 + \frac{x^2}{2 \cdot D_{ref} \cdot t} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ref} \cdot t}} \right) - \frac{x}{\sqrt{\pi \cdot D_{ref} \cdot t}} \cdot e^{\frac{-x^2}{4 \cdot D_{ref} \cdot t}} \right\} \quad (2)$$

– Eq. (3), para a concentração superficial variando proporcional à raiz quadrada do tempo

$$C_{(x,t)} = k \cdot \sqrt{t} \cdot \left\{ e^{\frac{-x^2}{4 \cdot D_{ref} \cdot t}} - \left[ \frac{x \cdot \sqrt{\pi}}{2\sqrt{D_{ref} \cdot t}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ref} \cdot t}} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

Onde:

$k$  = concentração superficial de cloretos (%);

$a/c$  = relação água/cimento do concreto em massa;

Por meio da Figura 1, pode se observa que, de fato, ao se considerar a variação da concentração superficial no tempo, se obtém maiores valores de concentração de cloretos em uma certa profundidade e conseqüentemente uma menor vida útil da estrutura. No entanto, Andrade (2011) alerta quanto a necessidade de estudos mais detalhados para se confirmar a veracidade de tais modelos.

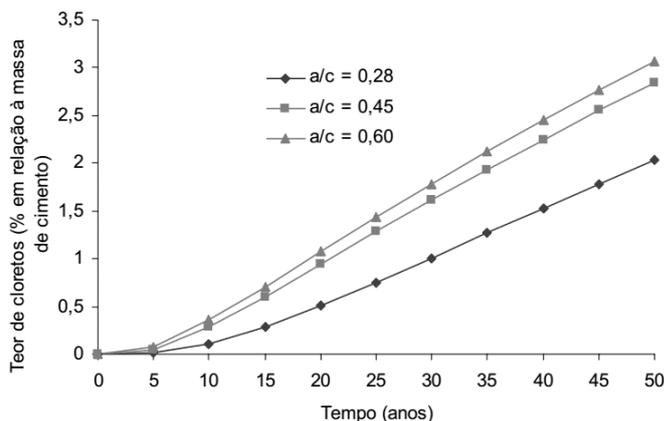


Figura 1: Perfil de penetração de cloretos pelo modelo de Uji *et al.* (1990)  
 Fonte: Andrade (2001)

### 2.3 Modelos em que somente o coeficiente de difusão varia no tempo

Para que fosse considerada a variação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto ao longo do tempo, Mangat e Molloy (1994) adaptaram a segunda lei de Fick conforme a Eq. (4).

$$C_{(x,t)} = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{\frac{D_{ref}}{1-\alpha} \cdot t^{1-\alpha}}} \right) \right] \quad (4)$$

Onde:

**erf** = função erro de Gauss;

**α** = fator de dependência do coeficiente de difusão no tempo;

Com auxílio da Figura 2, Andrade (2011) concluiu que para até 15 anos de exposição aos cloretos, o modelo de Mangat e Molloy (1994) apresenta um comportamento aceitável, porém ao passar dessa idade, ocorre uma mudança de tendência até que se chega em uma completa inversão das curvas. Segundo este pesquisador, esse fenômeno ocorre principalmente, pela forma que se considera o coeficiente empírico **α**.

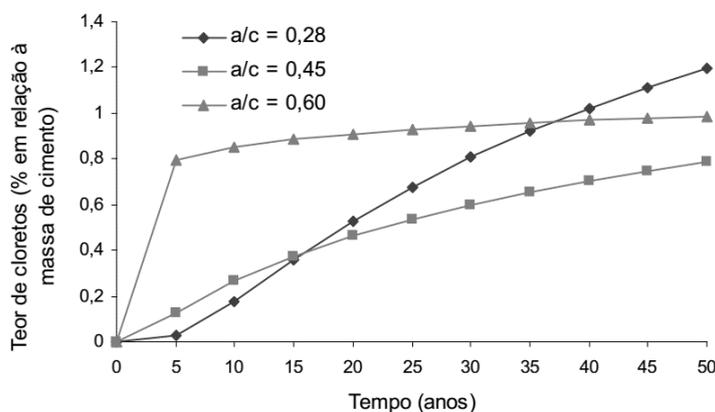


Figura 2: Perfil de penetração de cloretos pelo modelo de Mangat e Molloy (1994)  
 Fonte: Andrade (2001)

Nilsson e Carcasses (2004), propuseram outra modelo para incluir a variação do coeficiente de difusão e que resulta na Eq. (5).

$$D_{(t)} = \frac{D_{ref}}{1 - \alpha} \left[ \left( 1 + \frac{t'}{t} \right)^{1-\alpha} - \left( \frac{t'}{t} \right)^{1-\alpha} \right] \cdot \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^\alpha \cdot t \quad (5)$$

Onde:

$D_{(t)}$  = coeficiente de difusão de cloretos em um dado tempo  $t$  (cm<sup>2</sup>/ano);

$t_{ref}$  = idade do concreto ao se determinar o  $D_{ref}$  (ano);

$t'$  = idade concreto no momento da exposição aos íons cloreto (ano);

Stanish e Thomas (2003), por sua vez, consideram que para incluir a variação do coeficiente de difusão de cloretos na segunda lei de Fick, se deve utilizar as Equações (6) e (7).

$$D_{(t)} = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t_{eff}} \right)^\alpha \quad (6)$$

$$t_{eff} = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{(\alpha - 1) \cdot (t_2 - t_1)}{t_2^{\alpha-1} - t_1^{\alpha-1}} \right] \text{ para } \alpha \neq 1 \\ \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \text{ para } \alpha = 1 \end{array} \right\} \quad (7)$$

Onde:

$t_{eff}$  = tempo efetivo para um período de tempo qualquer (ano);

$t_1$  e  $t_2$  = tempo de exposição do agente aos ions cloreto, sendo  $t_1 < t_2$  (anos);

#### 2.4 Modelo em que a concentração superficial e o coeficiente de difusão variam no tempo

Apesar da complexidade que envolve a introdução do coeficiente de difusão e da concentração superficial de cloretos variando ao decorrer do tempo, Mejlbro (1996) sugere um método para modelar a penetração de cloretos no concreto considerando os parâmetros citados anteriormente conforme as Eq. (8), (9).

$$C(x,t) = C_i + [C_s(t) - C_i] \cdot \Psi_p \left( \frac{x}{2 \sqrt{(t - t') \cdot D_{(t)}}} \right) \quad (8)$$

$$C_s(t) = C_i + S[(t - t') \cdot D_{(t)}]^p \quad (9)$$

Onde:

$C_i$  = concentração inicial de cloretos no interior do concreto (%);

$C_s(t)$  = concentração superficial de cloretos em um dado tempo  $t$  (%);

$\Psi_p$  = função de Mejlbro;

$S$  e  $p$  = constantes que depende de ajustes experimentais;

Para a consideração da variação do coeficiente de difusão no tempo, o autor sugere que seja utilizado uma equação similar a descrita por Stanish e Thomas (2003), juntamente

com suas mesmas considerações. Andrade (2001), entretanto, relata que se pode utilizar a Eq. (10), para a fácil, porém aproximada obtenção do valor de  $\alpha$ .

$$\alpha = 3,0. (0,55 - a/c) \quad (10)$$

Contudo, pode-se verificar que por este método de simplificação, os valores de coeficiente de difusão iriam depender exclusivamente da relação água/cimento usada durante a produção do concreto, o que leva a valores aproximados de coeficiente de difusão de cloretos.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

A avaliação e estudo dos modelos de difusão foi realizada com a utilização de parâmetros reais do concreto obtidos nesta pesquisa.

A seguir serão descritos como foram realizadas as etapas de dosagem do concreto, caracterização do concreto no estado fresco e endurecido, e determinação dos valores de coeficiente de difusão.

#### 3.1 Dosagem do concreto

Para a dosagem dos concretos foi utilizado cimento CII-Z 32 com massa específica obtida dos dados fornecido pelo fabricante. Foram dosados dois concretos diferentes, objetivando analisar a penetração cloretos para elementos com diferentes níveis de porosidade. A primeira dosagem teve como objetivo a obtenção de um concreto convencional, com resistência de aproximadamente 30 MPa e com baixa relação a/c ( $a/c = 0,4$ ), tornando-o menos poroso. A segunda dosagem visou produzir um concreto com alta porosidade, e utilizou-se relação  $a/c = 0,6$ .

Quanto ao cálculo do traço, este foi realizado pelo método do volume unitário de acordo com a norma ACI 211.1: 1991, com tabelas adaptadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), devido à sua simplicidade e eficácia. Para a sua conclusão foi necessário caracterizar os agregados como listado a seguir:

- NBR NM 248 (ABNT, 2003): Auxiliou na determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concreto;
- NBR NM 52 (ABNT, 2009): Auxiliou na determinação de massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo;
- NBR NM 53 (ABNT, 2009): Auxiliou na determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo;
- NBR NM 45 (ABNT, 2006): Auxiliou na determinação da densidade a granel e do volume de vazios de agregados miúdos e graúdos em estado compactado ou solto.

Na Tabela 1 são apresentados valores de caracterização dos agregados miúdo e graúdo e do cimento, enquanto a Tabela 2 apresenta as proporções dos traços utilizados na pesquisa.

Tabela 1: Caracterização dos agregados e do cimento

<b>Agregado Miúdo</b>		
<b>Parâmetros</b>		
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	2688,25	
Modulo de Finura	3,26	
<b>Agregado Graúdo</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>Traço 0,4</b>	<b>Traço 0,6</b>
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	2582,46	2631,5
Diâmetro máximo (mm)	12,5	19
<b>Cimento</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>Traço 0,4</b>	<b>Traço 0,6</b>
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	3100	

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Tabela 2: Proporções de materiais em relação ao consumo de cimento

<b>Traço</b>	<b>Cimento</b>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>	<b>Água</b>	<b>Consumo de cimento (Kg/m<sup>3</sup> de concreto)</b>
<b>0,6</b>	1,00	1,55	3,95	0,60	333,33
<b>0,4</b>	1,00	1,42	1,49	0,40	542,76

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

### 3.2 Caracterização do concreto no estado fresco

O ensaio de consistência do concreto foi obtido segundo a ABNT NBR NM 67: 1998 que estabelece medidas para a determinação da consistência do concreto por meio do abatimento do tronco de cone. Quanto a obtenção da porcentagem de ar incorporado no concreto produzido, foi obtido segundo a ABNT NBR NM 47: 2002. Este ensaio pode ser realizado por dois tipos de equipamento, sendo que para esta pesquisa foi usado o equipamento classificado como “Tipo B”.

Por meio da Tabela 3 é possível notar que o traço 0,6, ao se comparar com o traço 0,4, possui maiores valores de ar incorporado e abatimento. Essa diferença se deve principalmente pela baixa quantidade de água existente no traço 0,4 de concreto, tornando este mais firme e com baixo teor de ar.

Tabela 3: Valores de ar incorporado e abatimento

<b>Traço</b>	<b>Ar incorporado (%)</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
<b>0,4</b>	2,17%	80
<b>0,6</b>	2,50%	150

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

### 3.3 Caracterização do concreto no estado endurecido

Primeiramente, afim de facilitar o entendimento dos ensaios de caracterização do concreto no estado endurecido, a Tabela 4 mostra um resumo dos ensaios e suas respectivas quantidades de corpos de provas cilíndricos utilizados.

Tabela 4: Quantidades de corpos de provas para os ensaios de caracterização do concreto endurecido

Ensaio	Traço 0,4	Traço 0,6	Normas
Absorção de água por capilaridade	3	3	NC 345: 2005
Massa específica do concreto	2	2	ABNT NBR NM 9778: 2005
Resistência a compressão axial	3	3	ABNT NBR 5739: 2007
Total	8	8	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

A Tabela 5 demonstra valores de massa específica obtido segundo a ABNT NBR NM 9778: 2005. Com esses dados pode-se verificar que o traço 0,4 possui maior massa específica quando comparado com o traço 0,6.

Tabela 5: Valores de massa específica

Água/cimento	Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )
0,4	2302,76
0,6	2266,07

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Com base nos valores da Tabela 6 é possível observar que a resistência do traço 0,4 é quase 2,5 vezes maior que a resistência do traço 0,6, isso deve-se principalmente pela influência da relação água/cimento que é inversamente proporcional à resistência a compressão do concreto. Esse fenômeno, está de acordo com o resultado de ar incorporado também, pois ao passo que se diminui a porcentagem de ar incorporado se aumenta a resistência do concreto.

Tabela 6: Valores de resistência a compressão axial

Traço	Tensão de Ruptura (MPa)	Média da Tensão de Ruptura (MPa)	C.V (%)
0,6	11,30	12,77	13
	12,50		
	14,50		
0,4	30,80	30,73	12
	27,10		
	34,30		

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Pelas Tabelas 7 e 8 são apresentados os valores de resistência a penetração de água (Ra), coeficiente de absorção (Ka) e porosidade efetiva (Pe). Verifica-se então, que o traço 0,4 possui menores valores de porosidade efetiva e coeficiente de absorção e consequentemente maior valor de resistência a penetração de água, quando comparado com o traço 0,6.

Tabela 7: Valores de resistência a penetração de água e coeficientes de absorção

Traço	Resistencia a Penetração de Água (Ra)			Coeficiente de Absorção (Ka)		
	Ra (s/m <sup>2</sup> )	Média (s/m <sup>2</sup> )	C.V (%)	Ka (Kg/m <sup>3</sup> .s <sup>0,5</sup> )	Média (Kg/m <sup>3</sup> .s <sup>0,5</sup> )	C.V (%)
0,4	20495,47	14591,59	37,50	0,023511	0,029409	17,41
	13395,92			0,032025		
	9883,38			0,032692		
0,6	12504,46	11907,41	35,85	0,064531	0,074718	12,33
	7371,70			0,077158		
	15846,07			0,082463		

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Tabela 8: Valores de porosidade efetiva

Traço	Porosidade efetiva (Pe)		
	Pe (%)	Média (%)	C.V (%)
0,4	3,365923	3,440859	7,90
	3,706542		
	3,250112		
0,6	7,216113	8,073792	25,01
	6,624704		
	10,38056		

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Com auxílio desses resultados já pode ser estimado que o traço 0,6 possuirá uma maior concentração de cloretos em suas camadas, acarretando em uma menor vida útil quanto a corrosão por difusão de íons cloreto.

### 3.4 Determinação dos valores de coeficiente de difusão

A princípio foi necessária a determinação da concentração de cloretos em várias profundidades do corpo de prova de forma a produzir o perfil de concentração de cloretos. Para isso seguiu-se a metodologia da norma ASTM C-1556: 2011. Para esses procedimentos foram usados três corpos de provas no total, com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, sendo que estes corpos de provas foram submetidos à exposição de cloretos por aproximadamente 42 dias, após os 28 dias de cura.

A sequência da execução do ensaio de determinação de concentração de cloretos será listada a seguir:

- Corte dos corpos de provas em duas partes, a primeira com 7,5 cm de altura e a segunda possuía 2 cm de altura. Esse último disco de amostra de 2 cm foi usado para determinar a quantidade de cloretos presentes na amostra antes do início do ensaio de ingresso acelerado de cloretos;
- Submersão dos corpos de prova restante em um tanque contendo hidróxido de cálcio com concentração igual a 3 g/l, até a massa dos corpos se manterem constantes;
- Impermeabilização por parafina dos corpos de modo a deixar apenas o seu topo sem parafinar, para que os íons cloreto ingresse apenas por este plano;
- Imersão os corpos de prova em uma bacia contendo cloreto de sódio comercial na concentração de 165 g de NaCl por litro de solução;
- Após atingir 42 dias, fez-se a remoção dos corpos de prova da solução de cloreto de sódio e em seguida esperou a secagem destes a temperatura ambiente;

- Recolhimento de 10 gramas de amostras, em pó, para cada intervalo de profundidades sugerida pela ASTM C-1556: 2011, com auxílio de uma cerra elétrica. A Tabela 9 informa os intervalos de profundidades em relação a superfície de exposição, nas quais foram retiradas as amostras e seus respectivos traços;

Tabela 9: Intervalos de profundidades para as coletas de amostras a serem tituladas

Traços	Intervalos de profundidades (mm)
0,4	0-1, 1- 3, 3-5, 5-7, 7-10, 10-13, 13-16 e 16-20
0,6	0-1, 1-3, 3-6, 6-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30

Fonte: ASTM C-1556 (2011)

- Titulação pelo procedimento químico baseado na RILEM 178 TMC (2002), proporcionando a obtenção dos dados de concentrações de cloretos nos intervalos de profundidades em que as amostras foram coletadas;

Após a obtenção das concentrações de cloretos nas diversas profundidades sugeridas pela ASTM C-1556: 2011 e com os valores de concentração superficial de cloretos, pôde-se então, calcular o coeficiente de difusão e a concentração superficial de cloretos no corpo de prova em análise por meio de um ajuste pelo método de mínimos quadrados da Eq. (11).

$$C_{(x,t)} = C_s - (C_s - C_i) \cdot \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4 \cdot t \cdot D}} \right) \right] \quad (11)$$

Onde:

$C_{(x,t)}$  = concentração de cloretos na profundidade  $x$  em um dado tempo  $t$  (%);

$x$  = profundidade a partir da superfície do concreto (cm);

$C_i$  = concentração inicial de cloretos no interior do concreto (%);

$C_s$  = concentração superficial de cloretos (%);

$\operatorname{erfc}$  = função erro complementar de Gauss;

$t$  = tempo de exposição do corpo de prova à solução de sais contendo íons cloreto (anos);

$D$  = coeficiente de difusão (cm<sup>2</sup>/ano);

A seguir a Figura 3 apresenta o perfil de penetração de cloretos nos traços 0,4 e 0,6, para um tempo de exposição igual a 42 dias. Estes valores foram obtidos, conforme a ASTM C-1556: 2011.

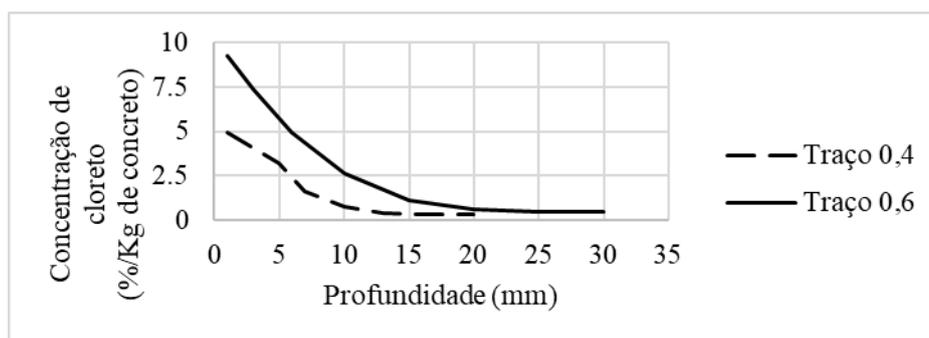


Figura 3: Perfil de penetração de cloretos para 42 dias de exposição  
Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Por meio da Figura 3 é notável que os corpos de prova de traço 0,6 obtiveram maior penetração de cloretos em suas diversas camadas. Tal valor, pode ser justificado ao se analisar os maiores valores dos parâmetros de porosidade efetiva e coeficiente de absorção do traço 0,6 quando comparado com o traço 0,4, propiciando assim a maior facilidade de entrada de íons cloretos no seu interior.

A Tabela 10 apresenta os valores de concentração superficial e coeficientes de difusão obtidos pelo ensaio de migração de cloretos, e seus respectivos valores de coeficientes de variação. Assim, ao se analisar os valores da tabela observa-se que o traço 0,6 possui maior coeficiente de difusão que o traço 0,4.

Tabela 10: Valores de concentração superficial e coeficiente de difusão de cloretos

Traço	Concentração Superficial de Cloretos (Cs)			Coeficiente de Difusão (Dref)		
	Cs (%)	Média (%)	C.V (%)	Dref (m <sup>2</sup> /s)	Média (m <sup>2</sup> /s)	C.V (%)
0,6	10,37	10,15	8,32	8,3E-12	9,84E-12	38,06
	10,86			7,1E-12		
	9,21			1,4E-11		
0,4	6,96	6,03	18,41	4,44E-12	5,98E-12	24,22
	4,80			7,32E-12		
	6,31			6,17E-12		

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Resultados equivalentes foram obtidos na pesquisa realizada por Andrade e Rizzon (2007), na qual estes autores utilizando solução de cloretos 5 vezes menor do que a utilizada nesta pesquisa, obtiveram valores de concentração superficial e coeficiente de difusão na ordem de 2,68 % em relação a massa de cimento e coeficiente de difusão na ordem de  $2,38 \times 10^{-11}$  (m<sup>2</sup>/s) respectivamente, para uma imersão de 2 meses em cloretos.

Com o objetivo de se determinar a vida útil de estruturas de concreto que estivessem em diferentes ambientes de exposição aos íons cloreto foram obtidos da literatura valores para a concentração superficial de duas condições reais de ambientes agressivos de íons cloretos

Foram utilizados valores de Cs que representam a condição de atmosfera litorânea e ambiente submerso em águas marítimas, isto é, o elemento fica por vezes submerso e outras vezes em contato com o ar atmosférico. A Tabela 11 mostra os valores de concentração superficial adotados para os cálculos determinísticos de vida útil.

Tabela 11: Valores de concentrações superficial

Referências	Cs (%/ Kg de cimento)	Ambientes
Bamforth (1996) <i>apud</i> Andrade (2001)	0,6	atmosfera litorânea
Gjørsv (1996)	1,50	submersa em águas marítimas

Fonte: adaptado de Andrade (2001) e Gjørsv (1996)

#### 4. CALCULO DETERMINÍSTICO DA VIDA ÚTIL

Para a análise determinística da vida útil, foram utilizados dois valores para os seguintes parâmetros, concentração superficial, coeficiente de difusão e recobrimento da armadura de aço no elemento de concreto. Considerando esses parâmetros foram verificadas as influenciáveis que as mudanças destes causam na vida útil do elemento estrutural de concreto armado

Com os valores de coeficiente de difusão e concentração superficial de cloretos, fica então possível determinar a vida útil da estrutura pelos diferentes modelos, pois as demais variáveis são determinadas por equações em que todos os parâmetros são conhecidos. Convém aqui, uma observação quanto a obtenção do fator de dependência do coeficiente de difusão no tempo. Este parâmetro foi determinado pela Eq. (10), pois a pesar de fornecer um valor aproximado, esta equação é de fácil aplicação e satisfaz o objetivo dessa pesquisa.

Os modelos utilizados neste trabalho, para efetuar a análise da penetração de cloretos nas estruturas de concreto são listados seguir.

- a) Modelo em que a concentração superficial e coeficiente de difusão não variam no tempo.
  - Resolução clássica da segunda lei de Fick;
- b) Modelos em que somente a concentração superficial varia no tempo.
  - Modelos de Uji *et al.* (1990);
- c) Modelos em que somente o coeficiente de difusão varia no tempo.
  - Modelo de Mangat e Molloy (1994);
  - Modelo de Stanish e Thomas (2003);
  - Modelo de Nilsson e Carcasses (2004);
- d) Modelo em que a concentração superficial e coeficiente de difusão variam no tempo.
  - Modelo de Mejlbro (1996);

Primeiramente foi realizado uma comparação entre os perfis de penetração de cloretos produzidos pelos modelos citados anteriormente, apontando assim suas principais diferenças. Em seguida foi realizado a determinação da vida útil pela modelagem de Mejlbro (1996), por ser apontada como a mais completa, devido as suas considerações.

A Tabela 12 expõe um resumo dos valores referentes aos parâmetros utilizados para a elaboração dos perfis de penetração de cloretos no tempo. Apresenta também a concentração limite para o início da despassivação da armadura “Cs lim”, parametro este que serve como marco do início da despassivação da armadura, chegando assim, ao fim da vida útil da estrutura de concreto armado.

Tabela 12: Resumo dos dados utilizados para os cálculos determinísticos

Parâmetros	Cs = 0,6%		Cs = 1,5%	
	Traço 0,4	Traço 0,6	Traço 0,4	Traço 0,6
<b>Dref (m<sup>2</sup>/s)</b>	5,98E-12	9,84E-12	5,98E-12	9,84E-12
<b>tref (dias)</b>	0,192	0,192	0,192	0,192
<b>t' (ano)</b>	0,077	0,077	0,077	0,077
<b>x (cm)</b>	2,0 e 4,0	2,0 e 4,0	2,0 e 4,0	2,0 e 4,0
<b>Cs (%/Kg de cimento)</b>	0,6	0,6	1,5	1,5
<b>Ci (%/Kg de cimento)</b>	0	0	0	0
<b>Cs lim (%/Kg de cimento)</b>	0,4	0,4	0,4	0,4
<b><math>\alpha</math></b>	0,45	-0,15	0,45	-0,15
<b>S</b>	1,889	0,669	1,889	0,669
<b>p</b>	0,15	0,10	0,15	0,10

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

## 5. RESULTADOS DETERMINÍSTICO DA VIDA ÚTIL

Antes de se determinar a vida útil, se fez necessário uma análise determinística para verificar como se comporta cada modelagem, portanto é primordial a interpretação das Figuras 4 a 7, pois nestas consta a modelagem determinística dos traços 0,4 e 0,6 considerando um cobrimento de 4,0 cm e concentrações superficiais iguais a 0,6% e 1,5%, que serviu de base para a análise dos modelos em estudo.

Ao se analisar as figuras é possível verificar que os modelos propostos por Uji *et al* (1990) no qual se considera a variação da concentração superficial de cloretos no decorrer do tempo, tendem a aumentar cada vez mais a concentração de cloretos no tempo, justamente devido ao aumento da concentração superficial com o passar dos anos.

Quando comparados os dois modelos sugeridos por Uji *et al* (1990), se observa que o modelo considerando a variação da concentração de forma linear, sempre irá apresentar maior concentração de cloretos em uma certa profundidade, para um determinado tempo de exposição, do que o modelo cuja a concentração superficial varia proporcional a raiz do tempo.

Quanto aos modelos cuja variação do coeficiente de difusão se fazem presentes, estes, são bastante peculiares, pois ao contrário do que ocorre nos modelos de Uji *et al* (1990), aqueles variam bastante ao se mudar o coeficiente de difusão, como por exemplo o traço 0,4 utilizado nessa pesquisa, o modelo sugerido por Mangat e Molloy (1994) apresenta maiores valores de concentração de cloretos com o passar do tempo. Já a respeito do traço 0,6, o modelo de Nilsson e Carcasses (2004) é o que apresenta maiores teores de cloretos no decorrer do tempo. Porém os comportamentos das curvas, para o mesmo traço, permanecem o mesmo para diferentes concentração superficial de cloretos.

Com relação a resolução clássica da segunda lei de Fick, essa está sujeita a mesma peculiaridade dos modelos nos quais o coeficiente de difusão varia no tempo, isto é, ao se mudar o traço de concreto, com conseqüente mudança no coeficiente de difusão, a resolução clássica da segunda lei de Fick poderá apresentar maiores ou menores valores de concentração cloretos com o transcorrer do tempo em uma certa camada de concreto, quando comparado com os demais modelos.

A modelagem sugerida por Mejlbro (1996), a princípio, pode ser apontada como a mais confiável para se produzir o perfil de penetração de cloretos com o tempo, não só por apresentar valores medianos, quando comparado aos demais modelos em estudo, mas por fazer a consideração de que tanto a concentração superficial quanto o coeficiente de difusão variam no tempo. No entanto é necessário fazer uma ressalva, pois nos períodos de pouca idade de exposição, o modelo de Mejlbro (1996), possui a mesma variação de comportamento quando comparado com a equações da resolução clássica da segunda lei de Fick e dos modelos em que somente a variação do coeficiente de difusão de cloretos, ou seja, possui uma grande variação na curvatura dos perfis de penetração de cloretos ao se utilizar diferentes coeficientes de difusão.

Por meio da análise dos modelos em estudo também é possível aferir que ocorre diminuição da concentração de cloretos ao se aumentar o cobrimento de concreto ou diminuir a concentração superficial de cloretos.

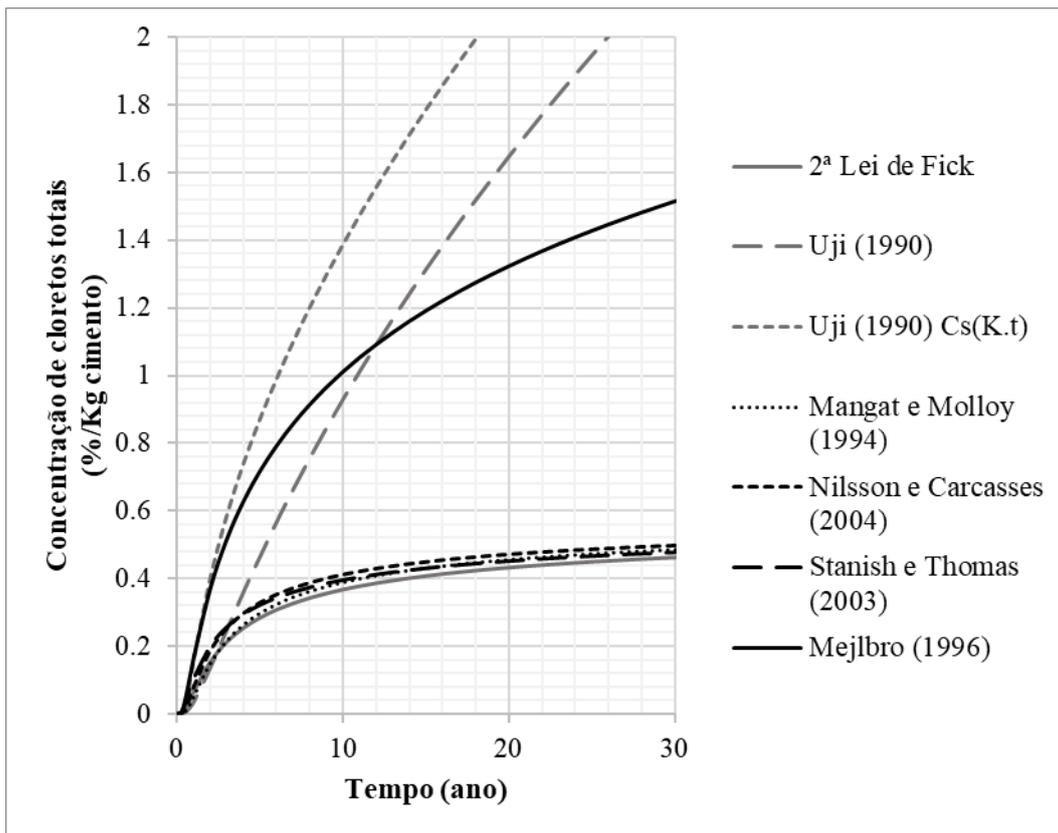


Figura 4: Perfis de penetração de cloretos utilizando diversos modelos para o traço 0,6 e Cs = 0,6 % e x = 4,0 cm  
 Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

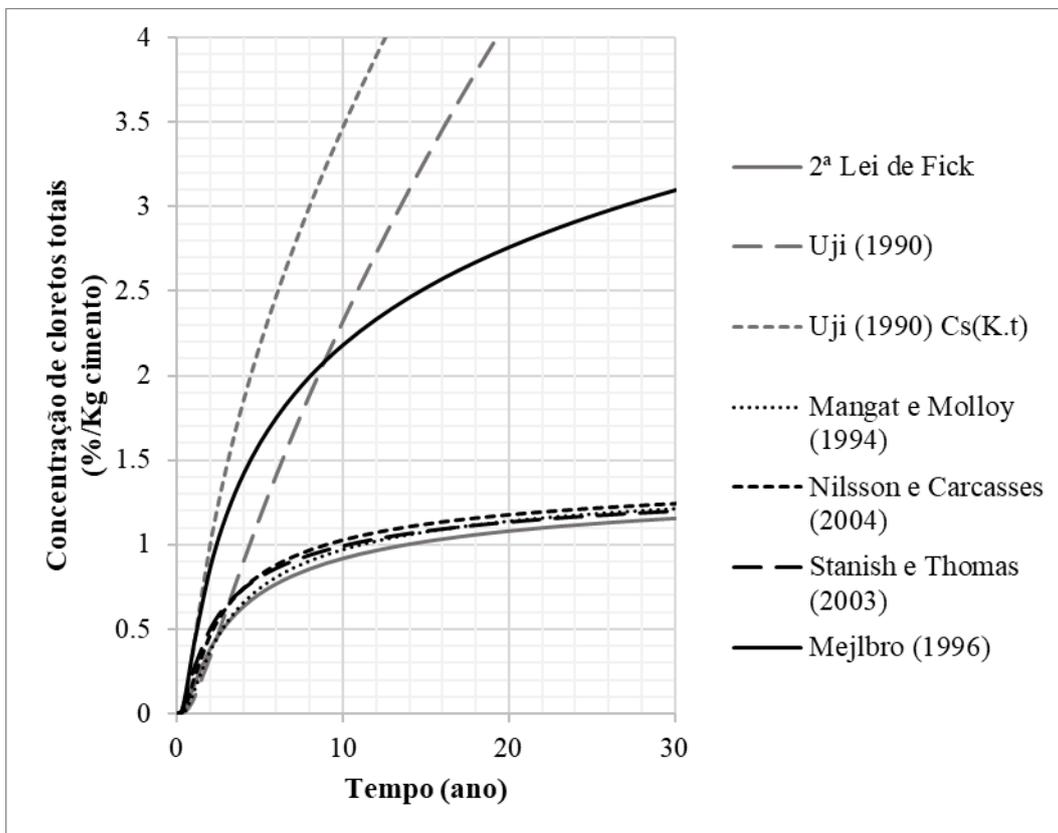


Figura 5: Perfis de penetração de cloretos utilizando diversos modelos para o traço 0,6 e Cs = 1,5 % e x = 4,0 cm  
 Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

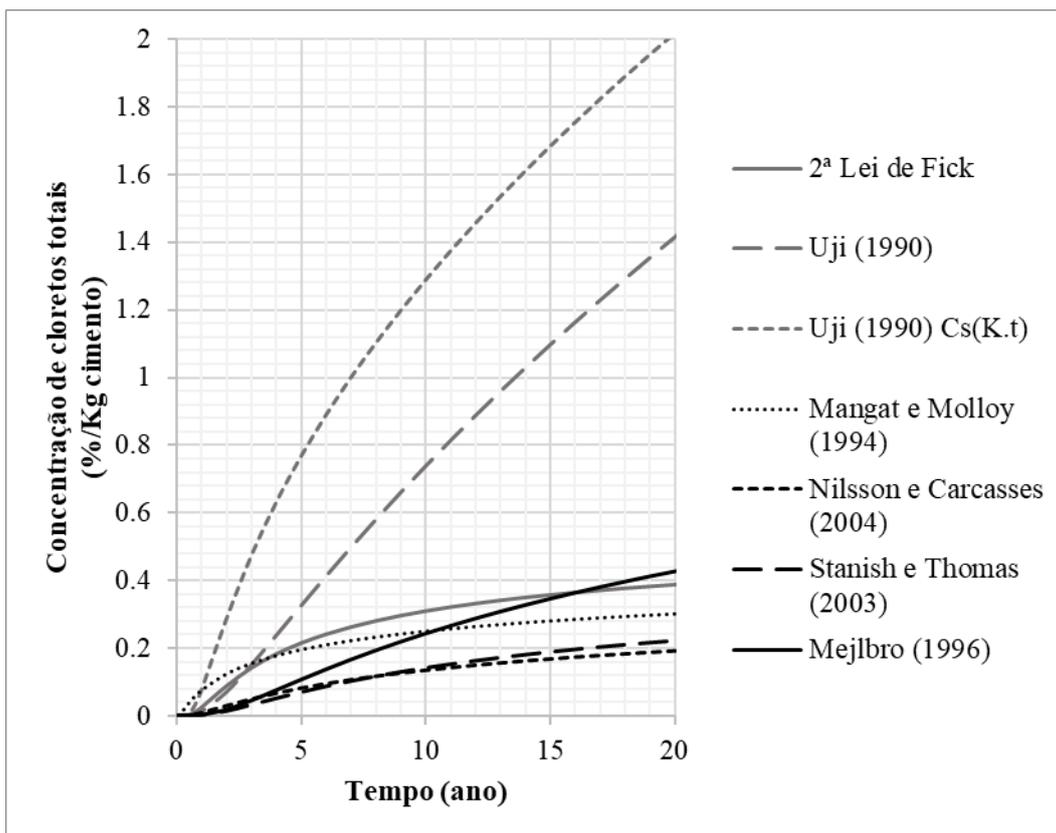


Figura 6: Perfis de penetração de cloretos utilizando diversos modelos para o traço 0,4 e  $C_s = 0,6\%$  e  $x = 4,0$  cm  
 Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

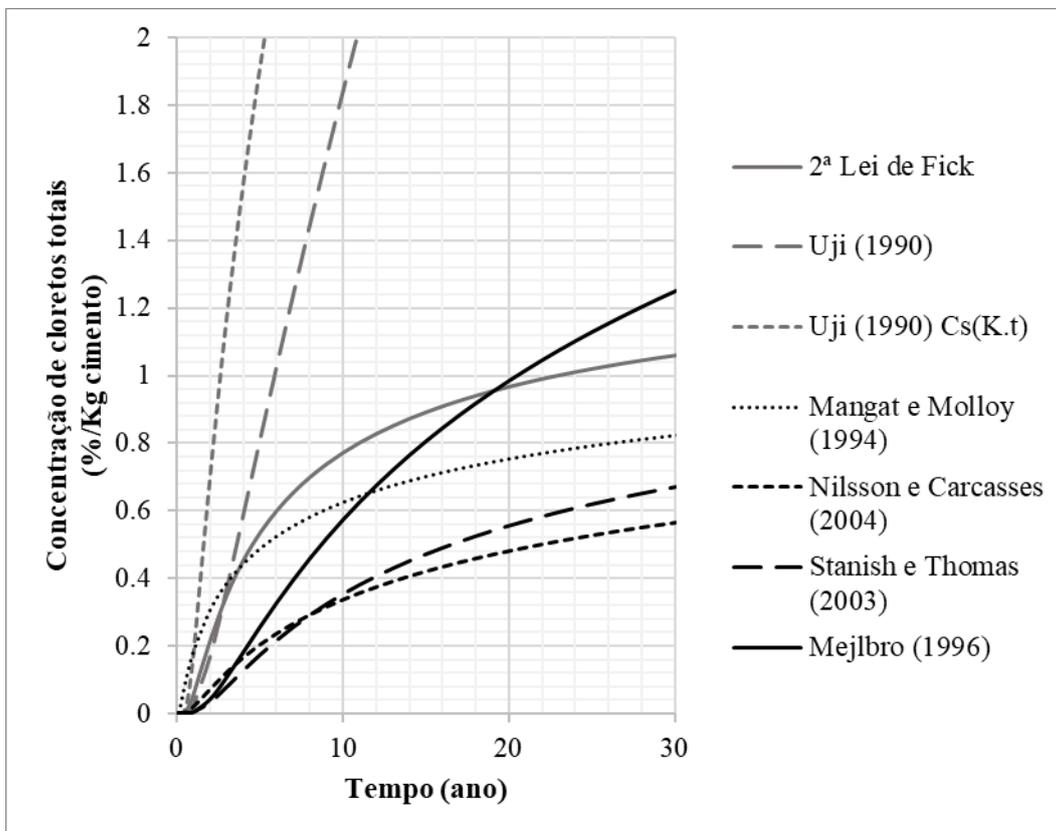


Figura 7: Perfis de penetração de cloretos utilizando diversos modelos para o traço 0,4 e  $C_s = 1,5\%$  e  $x = 4,0$  cm  
 Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Ao fim das análises das equações de modelagem da penetração de íons cloreto, se percebe que o modelo de Mejlbro (1996), é a equação mais confiável para modelar o perfil de penetração de cloretos, por tanto, este trabalho determina a vida útil, do concreto armado, utilizando esse modelo.

A seguir é apresentado com o auxílio das Figuras 8 e 9 os perfis de penetração de cloretos para os traços em estudo, levando em consideração cobrimentos de concreto igual 2,0 cm e 4,0 cm e concentrações superficiais iguais a 0,6% e 1,5%, porcentagem esta, em relação a massa do cimento.

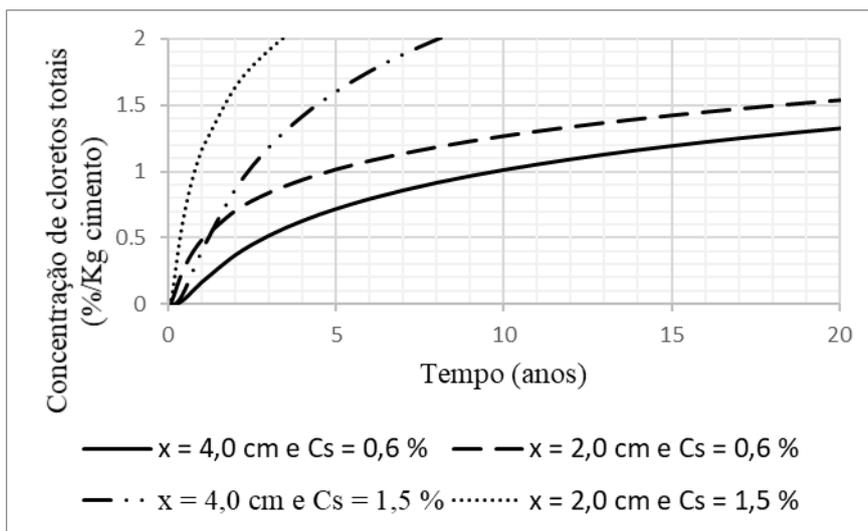


Figura 8: Perfil de penetração de cloretos estimados por Mejlbro (1990) para traço 0,6  
 Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

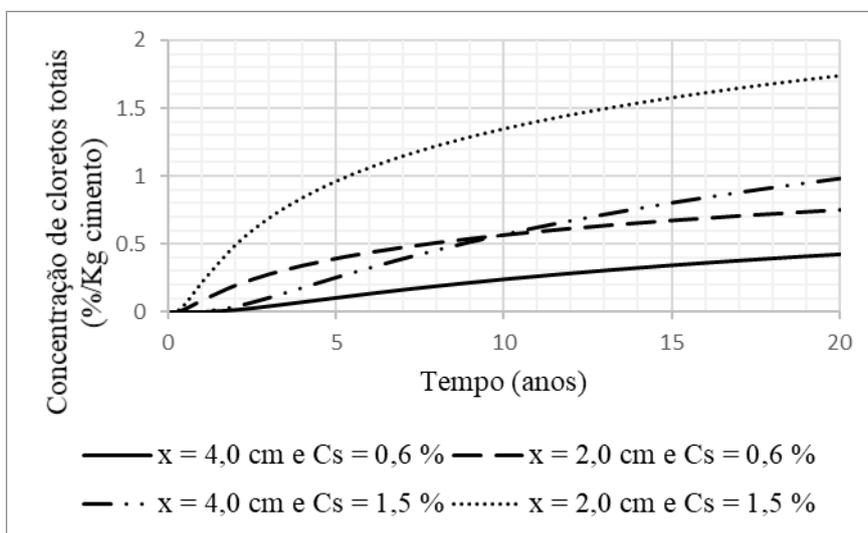


Figura 9: Perfil de penetração de cloretos estimados por Mejlbro (1990) para traço 0,4  
 Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Com auxílio das figuras anteriores, foi possível construir a Tabela 13, a qual informa um resumo dos valores de vida útil para as diversas situações em análise. A concentração crítica de cloretos na profundidade do reforço de aço considerada como correspondente ao valor da vida útil de concreto foi de 0,4% em relação a massa de cimento. O cálculo da vida útil neste artigo não está considerando nenhum critério de projeto ou de segurança e sim unicamente o aspecto físico do problema de difusão.

Tabela 13: Valores de vida útil

Situações	Cobrimento	
	2,0 cm	4,0 cm
Traço 0,6 e Cs = 1,5 %	4 meses	1 ano
Traço 0,6 e Cs = 0,6 %	11 meses	2 anos e 2 meses
Traço 0,4 e Cs = 1,5 %	1 ano e 8 meses	8 anos
Traço 0,4 e Cs = 0,6 %	6 anos	19 anos

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Ao analisar a Tabela 13, verifica-se, que ao se diminuir valores de cobrimento de concreto ou aumentar valores de concentração superficial de cloretos ocorrerá uma diminuição da vida útil. Também é possível notar que ao aumentar a relação água/cimento, ocorre uma diminuição da vida útil da estrutura, devido ao aumento do coeficiente de difusão.

Assim como na pesquisa de Andrade (2001) e no trabalho de Andrade e Rizzon (2007), os resultados obtidos, aprestam baixos valores de vida útil, esse quadro pode ter ocorrido, devido aos elevados valores de coeficientes de difusão de cloretos do concreto produzido e/ou pela adoção de concentrações superficiais de cloretos referentes a ambientes extremos, onde não é viável empregar os cobrimentos adotados para os cálculos.

## 6. CONCLUSÃO

Após o fim das investigações, efetuadas neste trabalho, é possível chegar as seguintes conclusões:

- O concreto com menor teor de água em sua produção, possui menor teor de ar incorporado e menor coeficiente de difusão, acarretando assim em uma menor concentração de cloretos no interior do concreto. Utilizando uma menor relação/cimento, se obtém também, maiores valores de resistência a compressão, resistência a penetração de água e massa específica, além de possuir menor coeficiente de absorção e porosidade efetiva;
- Quando se utilizam modelos em que a concentração superficial aumenta com passar dos anos, se admite que valores de concentração de íons cloreto no interior do concreto permaneçam em contínuo crescimento, tal afirmativa também é confirmada pelos estudos de Andrade (2001);
- Ao se utilizar modelos em que a concentração superficial permanece constante, se observa o pouco crescimento da concentração de cloretos no interior do concreto, com tendência deste parâmetro se manter inalterável com o decorrer dos anos;
- Ao usar o modelo mais realista, o qual considera a concentração superficial e o coeficiente de difusão variando no tempo, verifica-se que o perfil de penetração de cloretos apresenta comportamento intermediário, quando comparado aos demais modelos em que não são considerados esses dois fenômenos conjuntamente;
- O coeficiente de difusão tem grande influência no comportamento do perfil de penetração de cloretos, pois ao modificar o coeficiente de difusão, a modelagem que antes dava o maior valor de vida útil poderá apresentar, agora, menores valores quando comparado com as demais modelagens. Cabe ressaltar que este fenômeno não está relacionado com o aumento ou a redução do coeficiente de difusão, mas sim, da interação entre os modelos de penetração de cloreto, uma vez que ainda continua a lógica de que quanto maior o coeficiente de difusão, mais fácil será a penetração de cloretos, diminuindo assim a vida útil da estrutura.
- Evidenciou-se como o aumento do recobrimento é muito mais efetivo do que o aumento da qualidade do concreto no sentido de aumentar vida útil de um elemento de concreto.

Duplicando-se o recobrimento se chegam a valores de até quatro vezes maior de tempo de vida útil.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

**ACI COMMITTEE et al.** *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. In: American Concrete Institute, 1991.

**AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1556:** *standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion* resumos. Pensilvânia, 2011. 7 p.

**ANDRADE, J. J. de.; RIZZON, A. C. O.** *Vida útil de concretos brancos quando inseridos em ambiente com cloretos: a influência do cimento e do coeficiente de difusão*. *Ambiente Construído*. v. 7, n. 3, p. 21-34, Porto Alegre, 2007.

**ANDRADE, J. J. de O.** *Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos*. 2001. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:** *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

\_\_\_\_\_. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

\_\_\_\_\_. *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

\_\_\_\_\_. *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

\_\_\_\_\_. *NBR NM 47: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico*. Rio de Janeiro, 2002. 23 p.

\_\_\_\_\_. *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

\_\_\_\_\_. *NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

\_\_\_\_\_. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

\_\_\_\_\_. *NBR NM 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

**CARMONA, T. G.** *Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação*. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

**CASCUDO, O.** *O Controle da Corrosão das Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas*. 1. ed. São Paulo: PINI, 1997.

**GJØRV, O. E.** *Durability Design of Concrete Structures*. 2. ed. Nova York: CRC Press, 1996.

**HOFFMANN, A. T.** *Influência da adição de sílica ativa, da relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos*. 2001. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

**LORENZO, R.; OSSORIO, A.** *Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro*. *Facultad de Ingeniería Universidad Antioquia*, v. 72, p. 161–172, 2014.

**MANGAT, P.; MOLLOY, B.** *Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete*. *Materials and Structures*. v. 27, n. 170, p. 338-346, 1994.

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

**NILSSON, L. O.; CARCASSES, M.** *Models for Chloride Ingress into Concrete - A Critical Analysis. In: EU-Project G6RD-CT-2002- 00855, ChlorTest, 2004.*

**OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN.** *NC 345: Hormigón endurecido -Determinación de la absorción de água por capilaridad. Ciudad de La Habana., 2005. 7 p.*

**RILEM TECHNICAL COMMITTEE 178 TMC.** *Testing and modelling chloride penetration in concrete: analysis of total chloride content in concrete. Materials and Structures. v. 35. p. 583-585. 2002.*

**STANISH, K. THOMAS, M.** *The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 1, p. 55-62, 2003.*

**TESSARI, R.** *Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação de íons cloreto. 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.*

**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.*