

# Comportamento dos perfis de cloreto em tetrápodes localizados nos molhes da Barra. (Rio Grande – RS – Brasil)

Cristiane Arpino Silva<sup>1</sup>; André Tavares da Cunha Guimarães<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Engenheira Civil, Mestranda do curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica  
Universidade Federal do Rio Grande – FURG/RS  
crisarpino@ibest.com.br*

<sup>2</sup>*Engenheiro, Doutor em Engenharia Civil, professor Adjunto da Universidade Federal do  
Rio Grande – FURG/RS  
atcg@vetorial.net*

**RESUMO:** Em virtude da influência do ambiente marítimo sobre as estruturas de concreto, essa pesquisa tem por objetivo avaliar os perfis de cloreto ao longo do tempo de uma obra real (tetrápodes), considerando a variação de  $C_s$  (concentração superficial de cloreto no concreto) ao longo do tempo. Bons resultados foram obtidos para o coeficiente de difusão ( $D$ ) e teor de cloreto na superfície do concreto ( $C_s$ ) os quais demonstraram estar de acordo com a realidade dos micro-ambientes dos tetrápodes. Houve a tentativa de adaptar esses parâmetros ao modelo proposto por Cranck [3] a fim de traçar um modelo para a previsão do comportamento dessas estruturas, porém, o modelo em questão demonstrou algumas discrepâncias ao longo da profundidade do concreto. Por outro lado, a partir de estimativas (regressão) foi possível traçar esses perfis de previsão do comportamento, os quais demonstraram estar próximos aos perfis reais de cloreto obtidos nas idades estudadas.

**PALAVRAS – CHAVE:** Concreto, íons cloreto, coeficiente de difusão, tetrápodes, durabilidade

**ABSTRAT:** In view of the influence of the marine environment on the concrete structures, this research has for objective to evaluate the chloride profiles throughout the time of a real work (tetrapods), considering the variation of  $C_s$  (chloride concentration in the surface of the concrete) throughout the time. Good results were obtained for the diffusion coefficient ( $D$ ) and chloride concentration in the surface of the concrete ( $C_s$ ) which had demonstrated to be in accordance to the reality of micro-environments of tetrapods. There was the attempt to adapt these parameters to the model proposed by Cranck [3] in order to trace a model for predicting of the behavior of these structures, however, the model in question demonstrated some discrepancies along the depth of the concrete. On the other hand, in from estimates (regression) it was possible to trace these profiles of forecast of behavior, which had demonstrated to be close to the real profiles of chloride in the studied ages.

**KEYWORDS:** Concrete, chloride íons, diffusion coeficient, tetrapods, durability

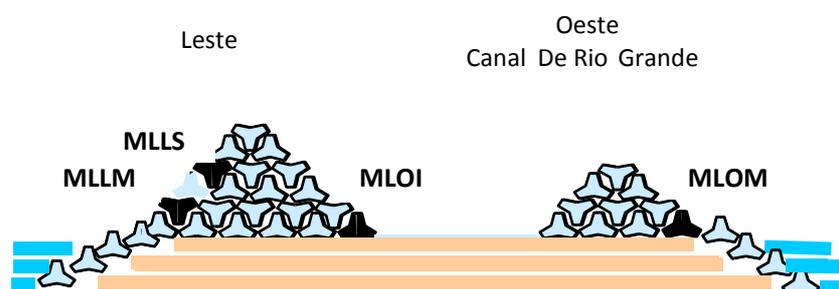
## 1. INTRODUÇÃO

A durabilidade do concreto é motivo de preocupação entre diversos pesquisadores da área Andrade [1], Andrade [2], Helene [9], Mehta [10].

É comum se observar em uma estrutura de concreto armado, a qual deveria apresentar uma vida útil de pelo menos 50 anos, Mehta [10], já em 15 anos de exposição indícios de corrosão.

Há casos em que não existe a devida preocupação com a durabilidade do concreto em relação à penetração de íons cloreto, sendo as causas internas mais comuns: cura inadequada, espessura de cobrimento reduzida, baixa qualidade dos materiais constituintes e, além disso, como causa externa a agressividade do meio em que se encontra inserida a estrutura de concreto.

Por esse motivo, na necessidade de traçar um modelo de previsão do comportamento do concreto armado em relação à ação de íons cloreto, se utilizou os tetrápodes na tentativa de demonstrar a real penetração de cloreto, supondo um concreto armado elaborado com mesmo tipo de cimento (ARI-RS) e inserido em ambiente semelhante aos tetrápodes. Se estudou 4 micro-climas sujeitos a diferentes formas de exposição: MLLS, MLLM, MLOM e MLOI (Figura 1). Entretanto aqui será abordado apenas o micro-ambiente MLLS.



**Figura 1** – Localização dos micro-ambientes pesquisados no molhe leste da barra do Rio Grande.

Nesta pesquisa foram extraídas amostras de concreto com 4,5 e 9,5 anos de exposição ao meio agressivo. Cada micro-ambiente estudado foi representado por dois tetrápodes, totalizando 8 tetrápodes. Em cada idade pesquisada foram realizados dez furos, totalizando 20 furos por micro-ambiente, com colhetas de 5 em 5 mm até uma profundidade de 50 mm através de furadeira especial (Figura 2), sendo que os materiais de mesma camada de dois tetrápodes formaram apenas uma amostra.



**Figura 2** – Furadeira e equipamentos utilizados na coleta das amostras.

As amostras de concreto foram extraídas rigorosamente, as quais após a coleta foram enviadas ao laboratório de análises inorgânicas (CIENTEC-RS).

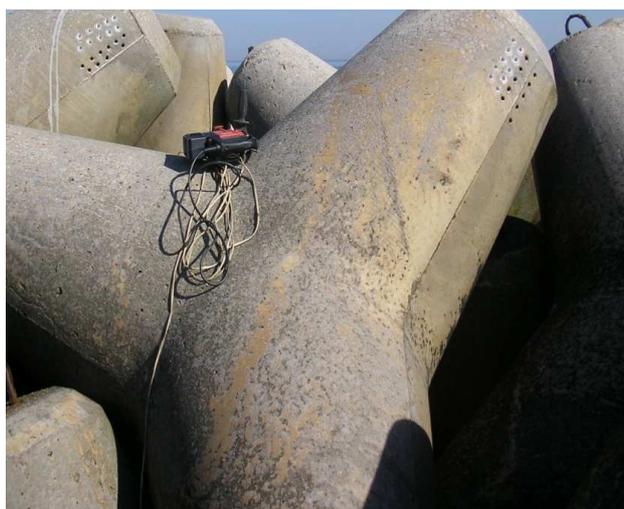
## 2. APLICAÇÃO DO MODELO

### 2.1. Micro-ambiente MLLS

O micro-ambiente MLLS pode ser caracterizado por encontrar-se do lado oeste no molhe leste e por estar acima do nível da água (Fotos 1 e 2). É o micro-ambiente posicionado na maior cota (Figura 3.1).



**Foto 1**– Os dois tetrápodes que compõem o ponto MLLS aos 9,5 anos de idade – furos referente à extração de material aos 4,5 anos



**Foto 2** – Os dois tetrápodes que compõem o ponto MLLS - 20 furos referente à extração de material aos 4,5 anos e 9,5 anos de idade.

Os resultados das análises de laboratório das amostras são apresentados nas tabelas 1 e 2.

Para a idade de 4,5 anos, o maior percentual foi de 0,20 % na camada de 7,5 mm, mas que decresceu nas próximas profundidades, até 0,07% na camada de 27,5 mm. No entanto, o percentual de cloreto cresceu para 0,08 % na profundidade de 32,5 mm, voltando a decrescer em 37,5 mm para 0,06 % em relação à massa do concreto. Entretanto, para a idade de 9,5 anos apresentou 0,45%, na camada de 2,5 mm enquanto que na profundidade de 47,5 mm apresentou o dobro do percentual para os 4,5 anos na camada mais profunda.

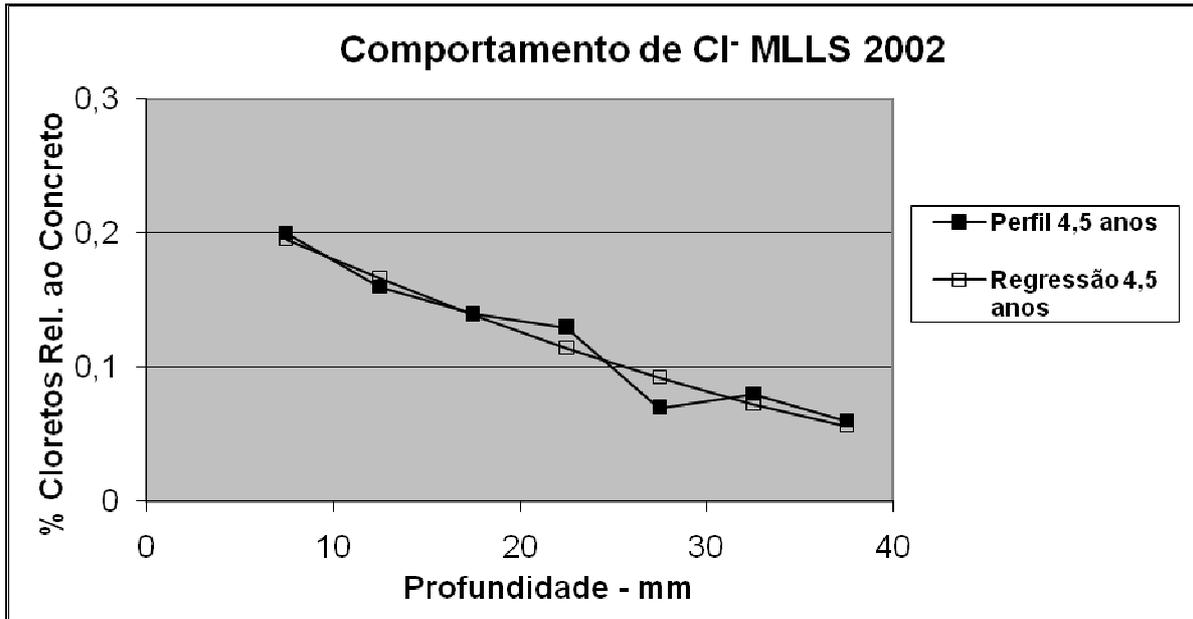
**Tabela 1** - % Cl<sup>-</sup> em relação à massa do concreto (MLLS aos 4,5 anos de idade).

| <b>Camada/micro amb.</b> | <b>Resultado (%)</b> |
|--------------------------|----------------------|
| 5 – 10 mm                | 0,20                 |
| 10 - 15 mm               | 0,16                 |
| 15 – 20 mm               | 0,14                 |
| 20 – 25 mm               | 0,13                 |
| 25 – 30 mm               | 0,07                 |
| 30 – 35 mm               | 0,08                 |
| 35 – 40 mm               | 0,06                 |

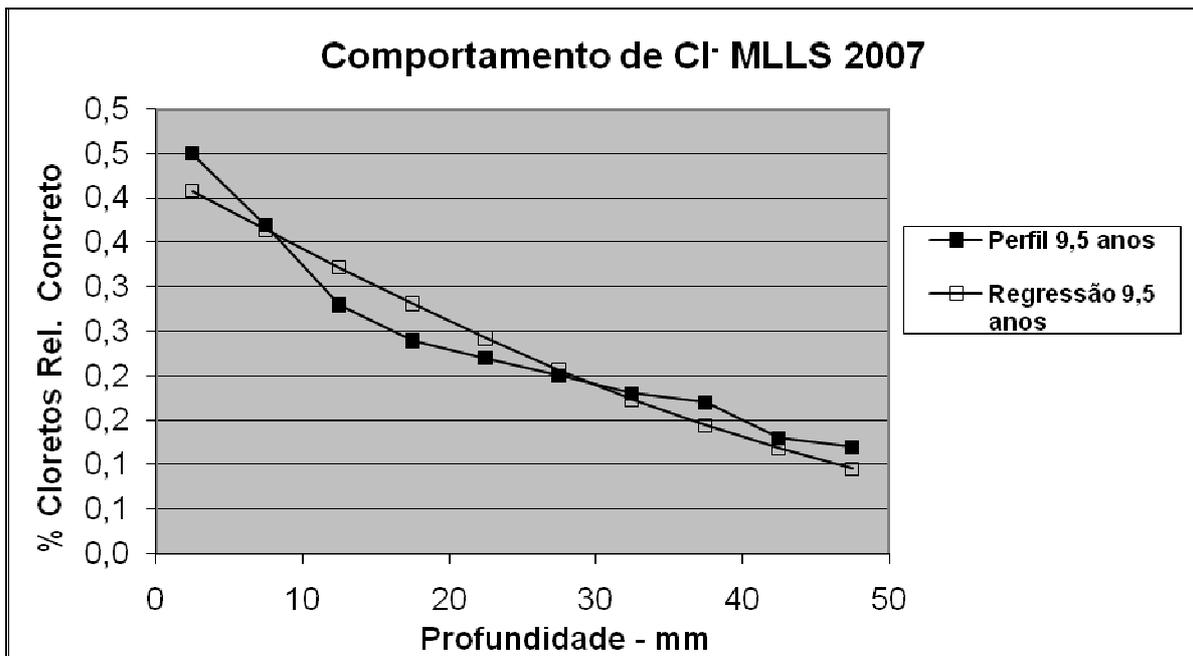
**Tabela 2** - % Cl<sup>-</sup> em relação à massa do concreto (MLLS aos 9,5 anos de idade).

| <b>Camada/micro amb.</b> | <b>Resultado (%)</b> |
|--------------------------|----------------------|
| 0 - 5 mm                 | 0,45                 |
| 5 – 10 mm                | 0,37                 |
| 10 - 15 mm               | 0,28                 |
| 15 – 20 mm               | 0,24                 |
| 20 – 25 mm               | 0,22                 |
| 25 – 30 mm               | 0,20                 |
| 30 – 35 mm               | 0,18                 |
| 35 – 40 mm               | 0,17                 |
| 40 – 45 mm               | 0,13                 |
| 45 – 50 mm               | 0,12                 |

A partir dos resultados de laboratório foram traçados os perfis de cloreto (Figuras 3 e 4).



**Figura 3** – Comportamento do % de cloretos x profundidade (mm) (MLLS) aos 4,5 anos.



**Figura 4** – Comportamento do % de cloretos x profundidade (mm) (MLLS) aos 9,5 anos.

Observa-se em ambas as idades estudadas, ou seja, aos 4,5 anos e aos 9,5 anos que o micro-ambiente MLLS não apresentou pico ou oscilação, sendo este o ponto mais alto pesquisado (Fig. 3.1).

A partir do traçado dos perfis reais de cloreto foi realizada regressão com a utilização da equação tradicional de Fick (Equação 1). O objetivo de se realizar a regressão foi de obter o teor de cloretos na superfície do concreto ( $C_s$ ).

É importante salientar que  $C_s$  obtido demonstrou uma variação ao longo do tempo, ou seja, dos 4,5 anos para a idade de 9,5 anos e que esta variação ocorreu aproximadamente em função da raiz do tempo. Por outro lado, Crank (1975) apresentou as (Equações 2 e 3) para avaliar este comportamento de  $C_s$  variável em função da raiz do tempo.

$$C(x,t) = C_0 + (C_S - C_0) \cdot \text{erfc} \left[ \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}} \right] \quad (1)$$

Onde:

$C(x,t)$  - Concentração de íons cloreto em relação a massa de cimento na profundidade  $x$  a partir da superfície do concreto em dado tempo  $t$  (%);

$C_0$  - Concentração inicial de íons cloreto no interior do concreto (%);

$C_S$  - Concentração superficial de cloretos - admitida como sendo constante - (%);

$x$  - profundidade de penetração de íons cloreto (mm);

$D$  - coeficiente de difusão de íons cloreto ( $\text{mm}^2/\text{ano}$ );

$t$  - Tempo (anos);

erfc - Função complementar erro de Gauss.

$$M_t = 0,5k \cdot t(\pi D_{C_{\text{svar}}})^{1/2} \quad (2)$$

Sendo:

$D_{C_{\text{svar}}}$  = Coeficiente de difusão de íons cloreto no concreto ( $\text{mm}^2/\text{ano}$ ).

$M_t$  = É a massa total de cloretos que sofre difusão da curva obtida por regressão (1ª etapa) dada em ( $\text{mm}^2$ );

$k$  = Parâmetro que considera a variação de  $C_s$  no tempo - obtido da 2ª etapa;

$t$  = Tempo de exposição do concreto aos cloretos em que foi feito o estudo (nesse caso 4,5 anos).

$$C_s = k (t)^{1/2} \quad (3)$$

Onde:

$C_s$  = teor de cloretos na superfície do concreto dado em (% em relação à massa do concreto);

$k$  = Parâmetro que considera a variação de  $C_s$  no tempo;

$t$  = Tempo de exposição do concreto aos cloretos em que se faz o estudo (nesse caso 4,5 anos).

## 2.2. Roteiro utilizado para aplicação do modelo

Após o traçado dos perfis de cloreto para os quatro micro-ambientes seguiu-se o seguinte roteiro a fim de tratar os resultados obtidos, com o objetivo de melhor compreensão dos resultados:

1º) Nessa etapa foi realizada regressão, com o objetivo de melhor correlacionar os pontos com o menor erro quadrado. Com o valor de  $C_s$  e considerando que o tempo estudado seja  $t = 4,5$  anos, obteve-se o valor de  $k$ , a partir da (Equação 3), dado por Cranck (1975).

2º) Foi realizada regressão a fim de se estimar a área abaixo da respectiva curva de regressão ( $M_t$ ). A partir do valor de  $M_t$  e da (Equação 2) pôde-se calcular o coeficiente de difusão ( $D$ ) para a idade estudada.

3º) Por outro lado, Cranck (1975) obteve a (Equação 4) quando considerou que a variação de  $C_s$  fosse uma função da raiz do tempo ( $\sqrt{t}$ ).

Por isso, nessa 3ª etapa se utilizou a (Equação 4), a fim de obterem-se valores de  $C_x$  em função de  $k$ ,  $t$ ,  $D$  (das etapas anteriores) para valores arbitrários de  $x$  (profundidade).

$$C_x = k.t^{1/2} \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{4.D_{C_{svar}}.t}\right) - \frac{x.\pi^{1/2}}{2\sqrt{D_{C_{svar}}.t}} - \operatorname{erfc}\frac{x}{2\sqrt{D_{C_{svar}}.t}} \right\}$$

$$= k(\pi.t)^{1/2} \operatorname{ierf}\frac{x}{2\sqrt{D_{C_{svar}}.t}} \quad (4)$$

Onde:

$D_{C_{svar}}$  = Coeficiente de difusão de íons cloreto no concreto onde considera a variação de  $C_s$ — obtido na 1ª etapa desse roteiro (por regressão).

$k$  = Obtido a partir da (Equação 3);

$t$  = É o tempo de exposição do concreto aos cloretos em que se faz o estudo (nesse caso 4,5 anos);

Entretanto, observou que a (Equação 4) apresentou erro. Isso é evidente, pois o teor de cloreto reduziu nas primeiras profundidades, como deveria ser, mas depois aumentou para maiores profundidades o que não é compatível com a realidade. Com isso, houve a necessidade de se fazer uma regressão dos pontos a partir da idade estudada, ou seja, com a (Equação 2) obteve-se a área abaixo do perfil estudado ( $M_t$ ), depois esse valor foi igualado ao membro direito da (Equação 5), de onde se pôde calcular o coeficiente de difusão para a idade estudada. Deve-se ressaltar que a (Equação 5) considera  $C_s$  constante.

$$M_t = 2C_s(Dt/\pi)^{1/2} \quad (5)$$

Onde:

$C_s$  = Maior teor de cloretos na superfície do concreto – Obtido da (Equação 3) sendo o valor de  $k$  o mesmo obtido na 2ª etapa desse roteiro;

$t = \acute{E}$  o tempo de exposição do concreto aos cloretos em que se faz o estudo (4,5 anos);  
 $D =$  Coeficiente de difusão de cloretos no concreto ( $\text{mm}^2/\text{ano}$ ).

Com o valor de  $D$  (Equação 5) e com a utilização da (Equação 1), foi possível traçar o perfil de cloretos para a idade em estudo (4,5 anos) o qual foi coincidente com o próprio perfil obtido por regressão do perfil de comportamento real nessa idade. Vale salientar que a (Equação 5), também dada por Cranck [3] considera que  $C_s$  não varie no tempo. É importante comentar que o  $D$  obtido, não representou nenhum significado sobre o comportamento real dos perfis de cloreto no concreto, esse parâmetro foi estimado apenas com o objetivo de realizar a regressão.

Para obter um perfil de previsão do comportamento do teor de cloreto aos 9,5 anos, tomou-se o perfil aos 4,5 anos obtido da (regressão) como modelo, ou seja, se utilizou os mesmos valores de  $D_{C_{s\text{var}}}$  e  $k$  obtidos aos 4,5 anos, porém modificou-se a idade para 9,5 anos, o que resultou em um novo valor de  $M_t$  (Equação 2) e  $C_s$  (Equação 3). Através deste procedimento, o mesmo artifício utilizado para traçar a curva de 4,5 anos (modelo aos 4,5 anos) se utilizou para traçar a curva aos 9,5 anos (modelo aos 9,5 anos).

É importante salientar, antes do quarto passo desse roteiro, um estudo realizado por Guimarães [4], onde o autor pesquisou quatro pontos de elementos estruturais, do cais do porto no sul do Brasil com 22 anos de idade. Os pontos estudados foram denominados PS, PI, ES e EI, em cotas diferentes em relação ao nível do mar de 2,02 m; 0,52 m; 0,12 m e -0,18 m, respectivamente. Ficou evidente através dos resultados para o ponto PS, em zona totalmente de respingo (ZPR), que o percentual maximo alcançado para  $C_s$  foi de 3,1 % em relação  massa do cimento

Por outro lado, Pereira [11] ao pesquisar estruturas offshore no litoral do Rio Grande do Norte, com 25 anos de idade os valores obteve valores de  $C_s$  que variaram de 3,0 a 3,8 % em relação  massa do cimento.

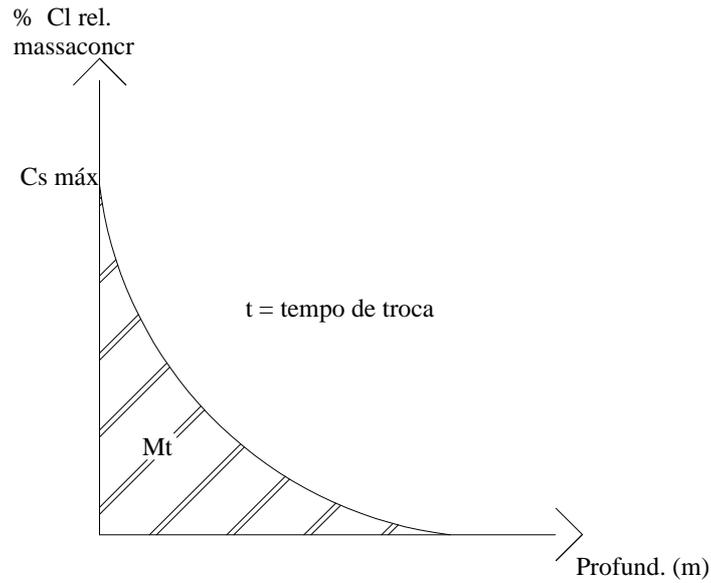
Considerando os resultados apresentados pelos autores, para estruturas reais com mais de 20 anos em que se supõe que o valor de  $C_s$  já tenha se estabilizado, optou-se por adotar para os tetrápodes (localizado a aproximadamente 4 km da costa) o valor médio entre (3,1 e 3,8 %), ou seja, um  $C_s$  de 3,5 % em relação  massa do cimento, pois essas estruturas estão localizadas de maneira intermediária em relação às estruturas estudadas por Guimarães [4] e Pereira [11].

Considerando um estudo realizado por Rodrigues [12] em cimento ARI (mesmo cimento utilizado na elaboração dos tetrápodes), a massa específica seca do concreto foi algo em torno de  $2200 \text{ kg/m}^3$ . Portanto, o maximo teor de cloreto na superfície do concreto de 3,5 % em relação  massa do cimento passa a ser de aproximadamente 0,588 % em relação  massa do concreto, considerando que na elaboração destes elementos houve um consumo de cimento de  $370 \text{ kg/m}^3$ .

4º) Em um determinado tempo chega-se ao teor maximo de  $C_s$ , ou seja, de 0,588 % e tem-se um perfil nesta idade (idade de troca -  $t_{\text{troca}}$ ), quando se considera  $C_{s\text{var}}$  para  $C_{s\text{const}}$  (Figura 5).

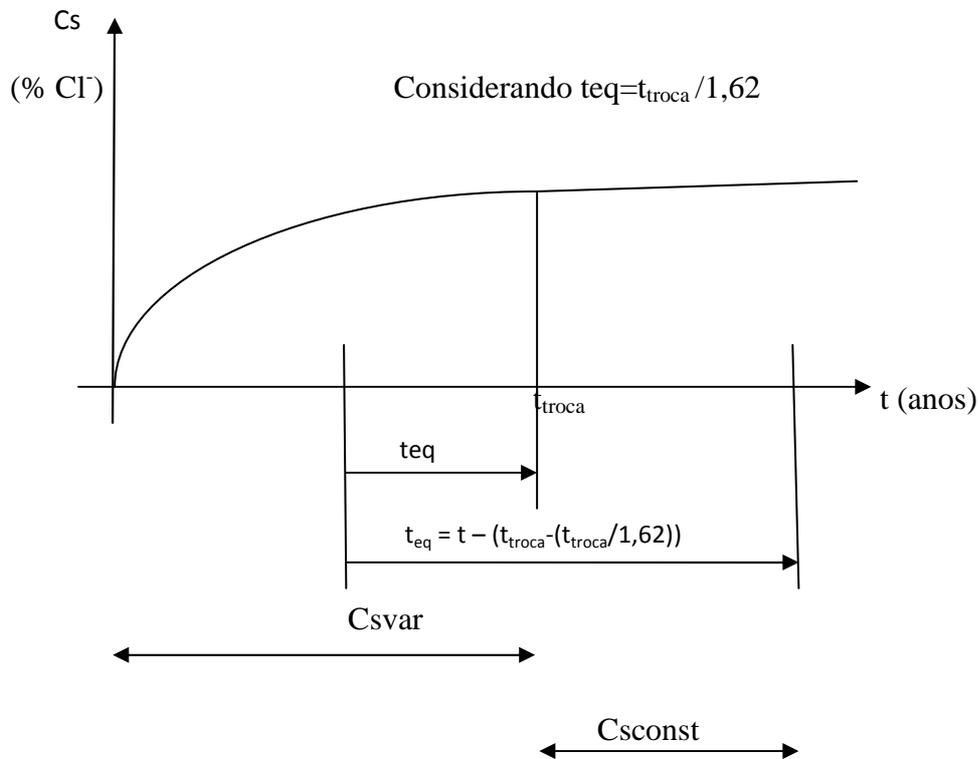
Para ter continuidade do mesmo perfil a partir do tempo de troca, se calculou um tempo equivalente para  $C_{s\text{const}}$  a partir do qual se obteve igual perfil. Para obter o mesmo perfil e não alterar o coeficiente de difusão que  próprio do concreto, já praticamente todo hidratado, foi considerado um tempo equivalente que igualasse estes perfis. Portanto, com  $C_{s\text{max}}$  e  $M_t$  iguais obteve-se a partir das (Equação 2 e 5) a seguinte igualdade:

$$t_{\text{troca}} = 1,62 t_{\text{eq}} \quad (6)$$



**Figura 5** - Perfil de cloretos para o qual  $C_{s\text{máx}}$  atinge o valor fixo de 0.588% em relação à massa do concreto na idade de  $t_{\text{troca}}$ .

5º) A partir de  $t_{\text{eq}}$  e da (Equação 1) foi possível traçar o perfil no qual  $C_s$  atinge o valor máximo de 0,588%. O mesmo foi realizado para as idades de 50, 100 e 200 anos, porém, para cada idade foi recalculado o tempo no qual ocorre a difusão de cloretos para o  $C_s$  fixo (Equação 7). Na (Figura 6) é representado esse comportamento:



**Figura 6** – Comportamento de  $C_s$  ao longo do tempo.

$$t_{eq} = t - (t_{troca} - (t_{troca}/1,62)) \quad (7)$$

Onde:

$t_{eq}$  = tempo para o qual se obtém o mesmo perfil considerando  $C_s$  variável (Equação 5) e considerando  $C_s$  constante (Equação 2);

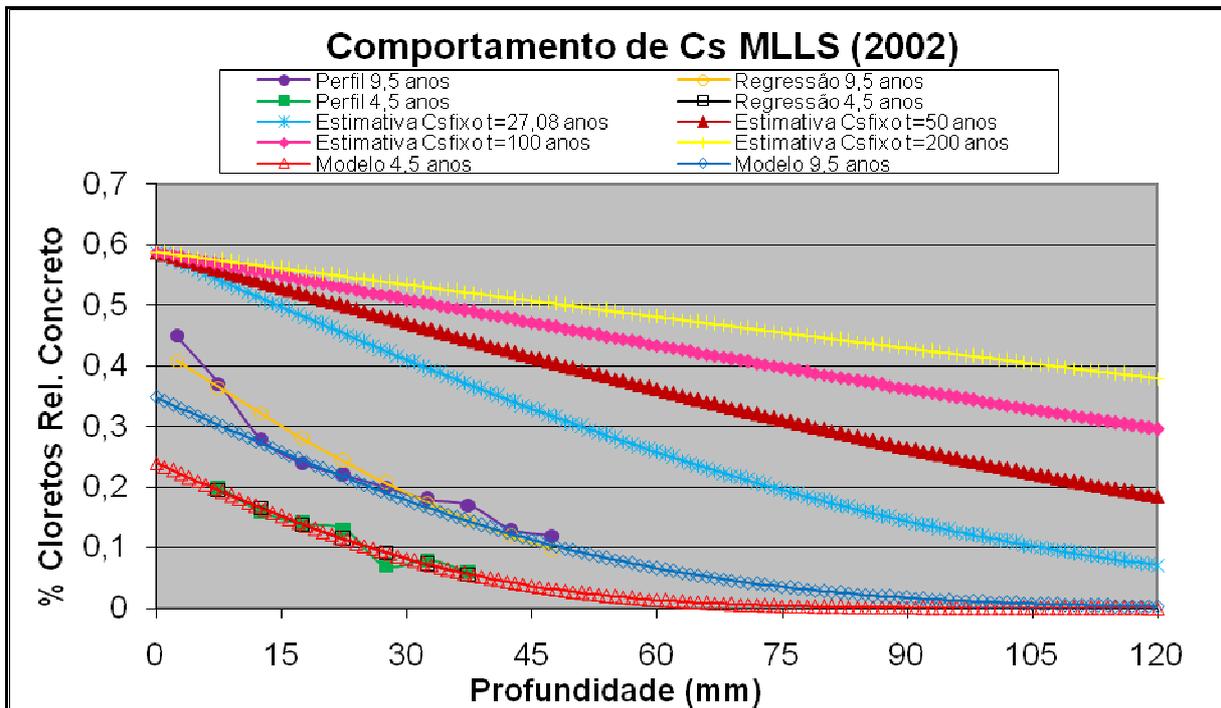
$t$  = idade em estudo podendo ser 50, 100 ou 200 anos;

$t_{troca}$  = tempo para o qual  $C_s$  atinge o seu valor máximo obtido na 4ª etapa desse roteiro.

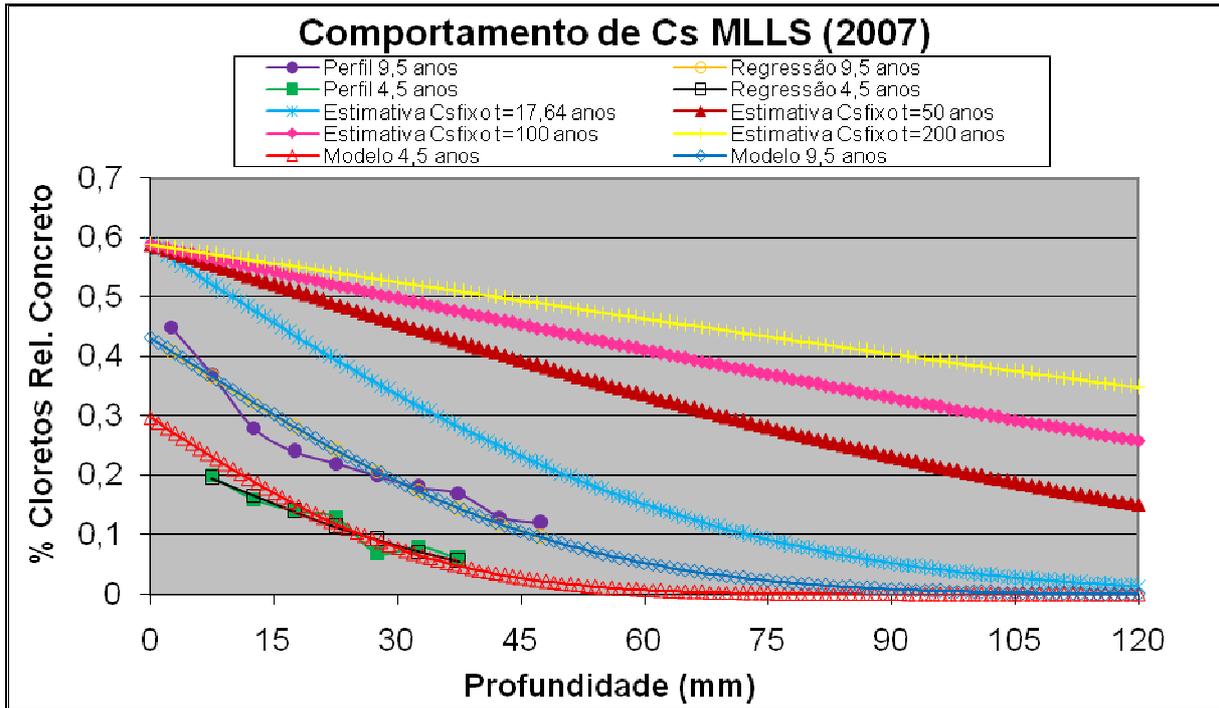
6º) Nessa etapa, todos os procedimentos utilizados para o perfil de cloreto na idade de 4,5 anos foram repetidos para a idade de 9,5 anos.

7º) Todos os procedimentos realizados nas etapas anteriores foram utilizados nessa etapa, porém considerou-se  $k = k_{eq}$ . Sendo que  $k_{eq}$  representa um  $k$  intermediário entre as idades de 4,5 e 9,5 anos, obtido por regressão, considerando o menor erro possível.

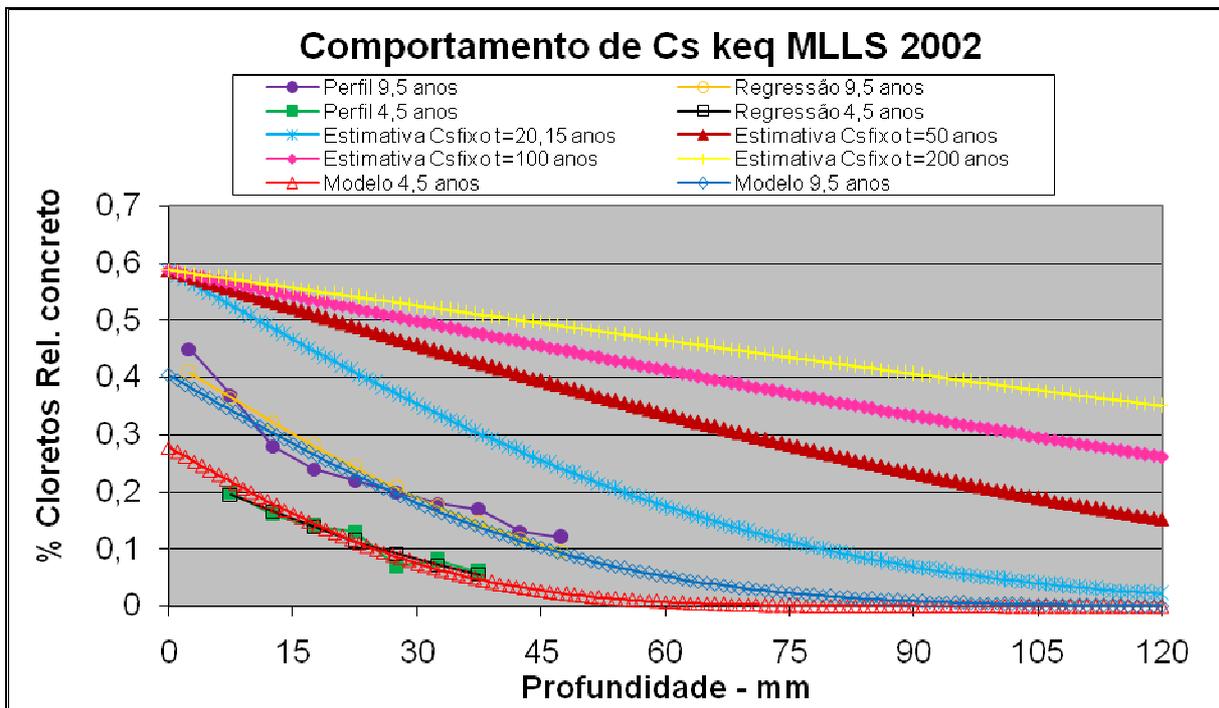
Ao seguir todas as etapas do roteiro obtiveram-se os perfis de previsão do comportamento do concreto (modelo aos 4,5 anos e modelo aos 9,5 anos), e considerando  $C_s$  fixo de 0,588% em relação a massa do concreto os perfis de comportamento do concreto nas idades para:  $C_s$  fixo (na idade estudada), 50 anos, 100 anos e 200 anos, considerando um  $k$  para cada idade e um  $k_{eq}$  entre as idades de 4,5 e 9,5 anos, respectivamente nas (Figuras 7, 8, 9 e 10).



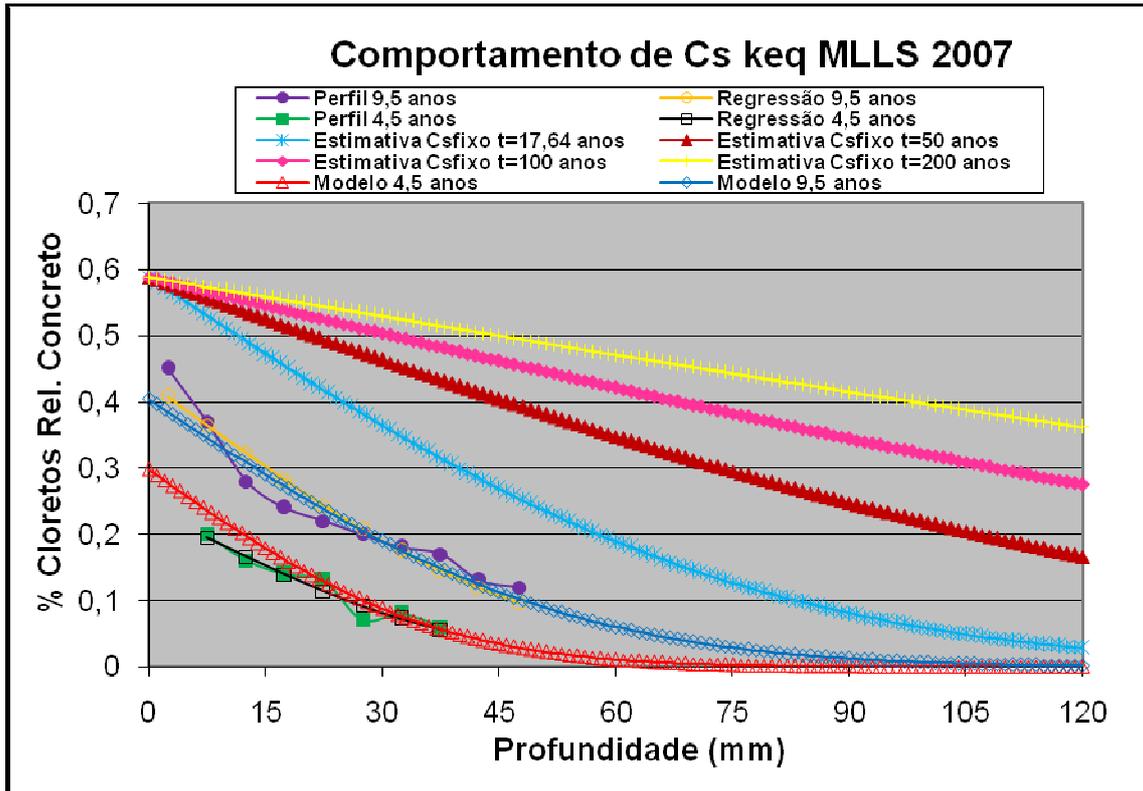
**Figura 7** - Comportamento dos perfis de cloreto para o ponto MLLS utilizando perfil medido aos 4,5 anos – perfis estimados para 4,5 anos, 9,5 anos, tempo de troca, 50 anos, 100 anos e 200 anos.



**Figura 8** - Comportamento dos perfis de cloreto para o ponto MLLS utilizando perfil medido aos 9,5 anos – perfis estimados para 4,5 anos, 9,5 anos, tempo de troca, 50 anos, 100 anos e 200 anos.



**Figura 9** – Comportamento dos perfis de cloreto para o ponto MLLS utilizando perfil medido aos 4,5 anos e keq – perfis estimados para 4,5 anos, 9,5 anos, tempo de troca, 50 anos, 100 anos e 200 anos.



**Figura 10** – Comportamento dos perfis de cloreto para o ponto MLLS utilizando perfil medido aos 9,5 anos – perfis estimados para 4,5 anos, 9,5 anos, tempo de troca, 50 anos, 100 anos e 200 anos.

Na tabela 3 são apresentados os resultados sobre o comportamento de cloretos no concreto para o micro-ambiente MLLS, de forma a compará-los em ambas as idades estudadas de 4,5 e 9,5 anos.

Tabela 3 - Resultados obtidos da análise do micro-ambiente MLLS.

| Micro-ambiente MLLS    |                           |       |                         |                         |                           |       |
|------------------------|---------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-------|
| Idade                  | Cs(%relação ao concreto). | K     | D(mm <sup>2</sup> /ano) | t <sub>equ</sub> (anos) | t <sub>troca</sub> (anos) | Keq   |
| 4,5 anos               | 0,24 %                    | 0,113 | 179,23                  | 16,72                   | 27,08                     | -     |
| 9,5 anos               | 0,43 %                    | 0,140 | 129,01                  | 10,89                   | 17,64                     | -     |
| Keq <sub>4,5anos</sub> | 0,24 %                    | 0,131 | 133,36                  | 12,44                   | 20,15                     | 0,131 |
| Keq <sub>9,5anos</sub> | 0,43 %                    | 0,131 | 147,35                  | 12,44                   | 20,15                     | 0,131 |

Pode-se observar através da tabela 3 que com o aumento da idade de avaliação de cloretos no micro-ambiente estudado houve um aumento no teor máximo de cloreto na superfície do concreto de 0,24 % para 0,43 %. Isso já era de se esperar, pois as idades de análise ainda são pequenas e, portanto, esse teor pode ainda estar variando (aumentando) com o tempo. Por outro lado, da idade de 4,5 anos para 9,5 anos o coeficiente de difusão reduziu de 179,23 mm<sup>2</sup>/ano para 129,01 mm<sup>2</sup>/ano. Os valores de Cs apresentados na tabela 3 foram obtidos através de regressão (1ª etapa do roteiro). Entretanto, utilizando-se um k equivalente o coeficiente de difusão aumentou com o tempo.

- Comentários dos resultados obtidos através da Figura 3: O perfil de 4,5 anos o qual representa o comportamento real de cloreto no concreto é caracterizado por apresentar um decréscimo no teor de cloreto até a profundidade de 27,5 mm, mas volta a crescer e decrescer novamente aos 32,5 e 37,5 mm, respectivamente. A regressão dos pontos realizada para o perfil de 4,5 anos é representada pela curva (regressão aos 4,5 anos) a qual apresentou boa correlação entre os pontos.

- Comentários dos resultados obtidos através da Figura 4: Na idade de 9,5 anos foi traçado o perfil real de comportamento do teor de cloreto (perfil aos 9,5 anos) e a partir dessa curva, por regressão, obteve-se o perfil (regressão aos 9,5 anos) o qual apresentou resultados na média dos pontos da curva de comportamento real.

- Comentários dos resultados obtidos através da Figura 7: Considerando o modelo obtido com o perfil medido aos 4,5 anos pode-se observar que a curva estimada aos 9,5 anos apresentou bons resultados, pois demonstrou grande similaridade ao comportamento real de cloreto no concreto (perfil medido aos 9,5 anos). Porém, esta curva se apresentou diferente apenas nas profundidades iniciais, ou seja, aos 2,5 e 7,5 mm em relação à curva de comportamento real representado por (perfil 9,5 anos).

Na idade de 4,5 anos, foram estimados os perfis para Cs fixo no tempo de troca, ou seja, aos 27,08 anos a partir do qual se supõe que Cs não varie mais com a idade do concreto, valor esse em torno de 0,588 % em relação à massa do concreto. Essas curvas foram denominadas de (Estimativa de Cs fixo para  $t_{troca}=27,08$  anos,  $t=50$  anos,  $t=100$  anos e  $t=200$  anos), sendo que o tempo equivalente (teq) de penetração de cloreto no qual Cs é considerado fixo foi de 16,72 anos; 39,64 anos; 89,64 anos e 189,64 anos, respectivamente.

- Comentários dos resultados obtidos através da Figura 8: Deve-se salientar que a curva estimada para 4,5 anos utilizando o modelo obtido com o perfil medido aos 9,5 anos demonstrou comportamento e inclinação semelhantes ao perfil medido aos 4,5 anos, pois se apresentou na média dos pontos que representam o comportamento real.

Na idade de 9,5 anos foram estimados os perfis para Cs fixo no tempo de troca, ou seja, aos 17,64 anos. Essas curvas foram denominadas de (Estimativa de Cs fixo para  $t_{troca}=17,64$  anos;  $t=50$  anos;  $t=100$  anos e  $t=200$  anos), sendo que o tempo equivalente (teq) de penetração de cloreto no qual Cs é considerado fixo foram de 10,89 anos; 43,25 anos; 93,25 anos e 193,25 anos, respectivamente. É possível através dos perfis de estimativa a partir de Cs fixo aos 17,64 anos; 50 anos; 100 anos e 200 anos observar que apresentaram teores de cloreto de 0,014 %; 0,151 %; 0,258 % e 0,348 % em relação a massa do concreto, respectivamente.

- Considerando as Figuras 9 e 10: Considerando  $keq$  do modelo obtido com o perfil de 4,5 anos o tempo necessário para estabilização de Cs foi de 20,15 anos, sendo que o teor de cloreto obtido nessa idade foi de aproximadamente de 0,022 % em relação a massa do concreto aos 120 mm de profundidade. Por outro lado, comparando a penetração de cloreto entre as idades de 50 e 200 anos houve um aumento no teor de cloreto de 0,199 % em relação à massa do concreto considerando a mesma a profundidade de análise de 120 mm (Figura 9).

Já no modelo obtido com o perfil medido aos 9,5 anos, considerando  $keq$  e uma mesma idade de estabilização de Cs de 20,15 anos, o percentual de cloreto nessa idade a uma profundidade de 120 mm foi de 0,028 % em relação a massa do concreto, sendo que de 50 a 200 anos apresentou um aumento no teor de cloreto de 0,333 %, considerando a mesma profundidade de análise (Figura 10).

Com o uso do keq o modelo obtido com o perfil medido aos 9,5 anos (Figura 8) e o modelo obtido com o perfil medido aos 4,5 anos (Figura 9), apresentaram um comportamento semelhante aos perfis de comportamento reais de cloreto representados por (perfil 9,5 anos e perfil 4,5 anos) (Figuras 8 e 9), respectivamente. Em ambas as análises os perfis de cloreto se mantiveram próximos a média dos pontos dos perfis de comportamento real.

- Considerando as Figuras 7 e 8: Nota-se para o micro-ambiente MLLS que o tempo estimado para que Cs atinja o valor fixo de 0,588% em relação à massa do concreto foi maior para o modelo a partir da curva de 4,5 anos (Figura 7) do que para o modelo a partir da curva de 9,5 anos (Figura 8), ou seja, para 4,5 anos Cs começa a se estabilizar a partir de aproximadamente 17 anos enquanto que para 9,5 anos, já se obtém essa estabilização a partir dos 11 anos (tabela 3).

Por outro lado, ao avaliar o comportamento do perfil de cloreto para maiores idades, ou seja, aos 50 anos, 100 anos e 200 anos se obteve maiores teores de cloreto com o modelo obtido com o perfil medido na idade de 4,5 anos em relação ao modelo obtido com o perfil medido na idade de 9,5 anos (Figuras 7 e 8) respectivamente, considerando Cs fixo de 0,588%. Isso é explicável, pois o coeficiente de difusão foi maior para a idade de 4,5 anos do que para a idade de 9,5 anos.

Pode-se dizer para o micro-ambiente MLLS que ao utilizar o modelo para keq, as curvas se apresentaram um pouco mais na média dos pontos dos perfis reais de cloreto (Figuras 9 e 10) do que se utilizando um k para cada idade (Figuras 7 e 8), desconsiderando a curva obtida na própria idade do perfil medido utilizado para o modelo, isto porque esta curva estimada na própria idade do perfil utilizado para fazer o modelo foi praticamente à mesma do perfil real. Entretanto, os perfis estimados para a outra idade, foram aqueles que apresentaram certo erro, sendo que com um keq estes perfis se apresentaram mais próximos aos perfis medidos na idade estudada.

Para estimar a média anual do grau de saturação dos tetrápodes tornou-se importante realizar uma comparação do GS estimado para os tetrápodes e os valores estimados para o TECON, caso este concreto tivesse sido executado com cimento ARI-RS.

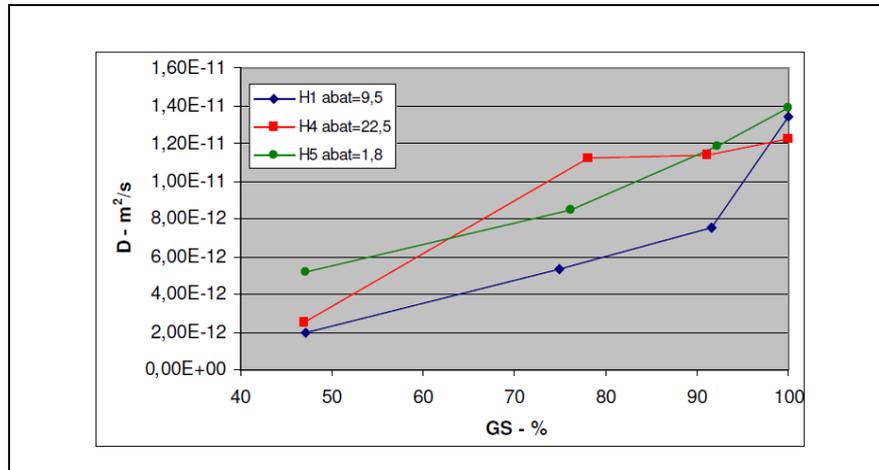
Nos estudos realizados por Guimarães [7] e por Rodrigues [12], os valores de GS foram correlacionados para concretos posicionados na vertical expostos ao sul, norte, leste e oeste (Rodrigues [12]).

Como os tetrápodes possuem superfície lateral em relação à superfície de concretagem, serão utilizados os testemunhos HL de Rodrigues [12] como base de comparação. Estes apresentaram no rack um valor médio anual de GS igual a aproximadamente 48%. De acordo com a estimativa de Rodrigues [12], o GS do concreto exposto junto ao TECON, em ambiente de névoa salina, sofreu um aumento de aproximadamente 24% em relação aos testemunhos expostos junto ao rack, situado a 1200 metros de distância da água do mar. Na estimativa de GS se utilizou como parâmetro de comparação os traços de concreto H1, H4 e H5 de Rodrigues [12] os quais apresentaram traço bastante semelhante ao traço do concreto dos tetrápodes.

Para tal comparação foram utilizados os valores de coeficiente de difusão dos micro-ambientes dos tetrápodes na idade de 9,5 anos. Isto porque os coeficientes de difusão da idade de 9,5 anos foram mais consistentes, ou seja, as estimativas para outras idades foram melhores, tanto usando k ou keq com os perfis medidos aos 9,5 anos.

O coeficiente de difusão para o micro-ambiente MLLS foi de  $129,01 \text{ mm}^2/\text{ano}$ , ou seja,  $4,10 \cdot 10^{-12} \text{ mm}^2/\text{s}$ , o qual foi comparado com os coeficientes de difusão e GS estimados por Rodrigues [12].

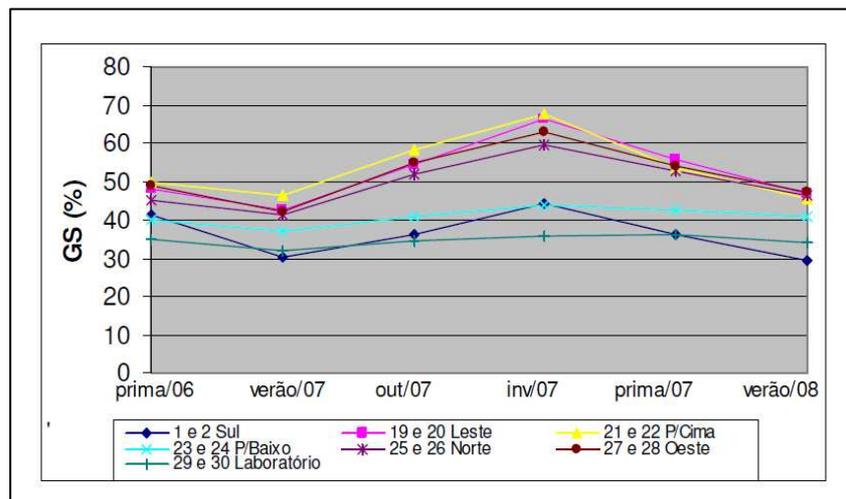
A estimativa de GS foi realizada a partir da (Figura 11) a qual relaciona o grau de saturação com o coeficiente de difusão para concretos com diferentes consistências e relação  $a/c = 0,55$ .



**Figura 11** – Relação entre Coeficiente de difusão e GS para concretos com relação  $a/c = 0,55$  e diferentes consistências. (Extraída de Rodrigues [12]).

Observou-se a partir da comparação com a pesquisa de Rodrigues [12] que o GS estimado para MLLS foi um valor em torno de 52,73% (H4) e 64,48% (H1) (Figura 11).

Em sua pesquisa Rodrigues [12] variou a orientação geográfica da face exposta dos testemunhos o que é semelhante ao que ocorre nos tetrápodes, pois os micro-ambientes estudados apresentam-se em posições geográficas diferenciadas no que se refere à dos agentes agressivos. Na (Figura 12), por exemplo, pode-se analisar que os testemunhos 19 e 20 (voltados para leste) estudados por Rodrigues [12], foram os que apresentaram maiores valores de GS se comparados com as outras posições geográficas, não sendo superior apenas aos testemunhos 21 e 22 (voltados para cima).



**Figura 12** – Variação do GS médio por estação do ano – traço 1 – testemunhos com superfícies expostas em diferentes micro-ambientes (testemunhos VC). (Extraída de Rodrigues [12]).

Deve-se salientar que o valor de 59% estimado por Rodrigues [12] foi muito próximo a faixa de valores de estimativa de GS para o micro-ambiente MLLS. Deve-se salientar, que entre os 4 micro-ambientes pesquisados dos tetrápodes, o menor valor de GS foi para o micro-clima MLLS, o que é explicável, pois embora esse ponto esteja exposto ao sentido dos ventos e correntes predominantes (nordeste), encontra-se em um ponto mais elevado e de grande insolação, o que talvez possa ser o principal motivo do GS reduzido.

Esse resultado de GS foi satisfatório e coerente com os estudos realizados nesse sentido Guimarães e Helene [5], Guimarães [7], Rodrigues [12], Souza [13] onde se observou uma grande influência do GS sobre a difusão de íons cloreto no concreto e a sua correlação com a forma de exposição ao meio agressivo.

### 3. CONCLUSÕES

Conforme o exposto se pode dizer que para micro-ambiente MLLS, levando em conta as idades de 4,5 anos e 9,5 anos estudadas, apresentou o seguinte comportamento ao longo do tempo:

- $D_{4,5} \square D_{9,5}$
- $CS_{4,5} \square CS_{9,5}$
- $k_{4,5} \square k_{9,5}$

O comportamento desses parâmetros mostrou-se coerente com os estudos de vida útil do concreto Guimarães [4], Guimarães e Helene [6], Guimarães et al. [8], pois o coeficiente de difusão tendeu a reduzir com a idade do concreto, mesmo em se tratando de um concreto como o dos tetrápodes elaborado a partir de cimento ARI. Por outro lado, o teor de cloretos na superfície do concreto aumentou, pois nas primeiras idades, esse teor tendeu a aumentar até atingir o máximo valor fixo de 0,588 % em relação a massa do concreto.

Deve-se salientar, que o valor de  $keq$  para o micro-clima pesquisado foi aproximadamente à média entre os valores de  $k$  nas idades de 4,5 anos e 9,5 anos. Isso é evidente, pois através de regressão tentou-se obter justamente esse resultado, ou seja, um valor para  $keq$  intermediário entre os  $k$  das idades estudadas.

- Conclusão para a (figura7): Na idade de 4,5 anos (modelo aos 9,5 anos) (Figura 7) apresentou bons resultados se comparado com o comportamento real de cloretos no concreto representado por (perfil aos 9,5 anos) (Figura 7), porém, houve certa diferença de comportamento nas profundidades iniciais, ou seja, em 2,5 e 7,5 mm.

- Conclusão para a (figura 8): Na idade de 9,5 anos quando se utilizou o modelo na tentativa de prever o comportamento de MLLS (Figura 8) na idade de 4,5 anos, o perfil estimado (modelo aos 4,5 anos) manteve-se bastante próximo ao perfil real (perfil aos 4,5 anos) (Figura 8).

- Conclusão entre utilizar  $k$  e  $keq$ : A partir de  $keq$  na idade de 4,5 anos, o comportamento da curva (modelo aos 9,5 anos) (Figura 9) manteve-se mais próxima ao perfil real (perfil 9,5 anos) (Figura 9), do que quando se utilizou o  $k$  na respectiva idade (Figura 7).

Sendo  $k$  e  $keq$  aos 9,5 anos os (modelos aos 4,5 anos) (Figura 8 e 10) mostraram-se igualmente semelhantes ao perfil real (perfil aos 4,5 anos) (Figuras 8 e 10).

Deve-se salientar que ao utilizar um  $keq$ , se obteve uma previsão do comportamento do teor de cloretos no concreto mais próximo aos perfis reais, obtidos das análises dos tetrápodes.

- Conclusão entre considerar a idade de 4,5 anos e a idade de 9,5 anos: Entre os perfis estimados deve-se salientar que (modelo aos 4,5 anos) para  $k$  e  $keq$  (Figuras 8 e 10) estimados na idade de 9,5 anos, demonstraram um comportamento mais semelhante ao perfil real de cloretos (perfil aos 4,5 anos) (Figuras 8 e 10) do que na estimativa de (modelo aos 9,5 anos) para  $k$  e  $keq$  (Figuras 7 e 9) realizado na idade de 4,5 anos.

Portanto, entre as idades estudadas se obteve uma melhor estimativa do comportamento do teor de cloretos no concreto na idade de 9,5 anos.

Deve-se salientar, em relação à durabilidade, que perfis de aproximadamente 5 anos ainda são de pouca idade para se usar como estimativa de vida útil residual de uma estrutura. Já, Perfis com aproximadamente 10 anos já podem ser utilizados, mas deve-se prever que estes ainda podem ter seus valores de  $C_s$  aumentando.

O GS estimado a partir da comparação com o estudo de Rodrigues [12] foi satisfatório e demonstrou a importância da localização do concreto no meio agressivo e a influência do meio ambiente sobre o GS do concreto e por sua vez, sobre o coeficiente de difusão de íons cloreto.

## REFERÊNCIAS

1. ANDRADE, M. C.; Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras. Tradução e Adaptação Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini, 1992.
2. ANDRADE, J.J.O. Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: Análise das Manifestações Patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco. Tese Apresentada para a Obtenção do Título de Mestre em Engenharia à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
3. CRANK, J. The Mathematics of Diffusion, second ed., Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 1975.
4. GUIMARÃES, A.T.C. Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos. São Paulo, 2000. 241 p. Tese Apresentada para a Obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, PCC/USP – Universidade de São Paulo.
5. GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. Influência do Teor de Umidade sobre a Difusividade de Cloretos na Pasta de Cimento. Relatório FAPESP processo 99/10909-7. São Paulo, 2001.
6. GUIMARÃES, A.T.C. e HELENE, P.R.L. Modelo para Previsão de Vida Útil Residual Utilizando Perfil de Cloreto com Pico. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.5, p.11-21, Agosto, 2004.
7. GUIMARÃES, A. T. C. Grau de Saturação: Sua Variação com o Tipo de Concreto e sua Influência na Difusão e Íons Cloreto. São Paulo, 2005. Monografia Apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de Pós-Doutorado em Engenharia Civil.

8. GUIMARÃES, André T.C., CASTRO, P. e NUNES, Jorge L.O. Teor de Cloretos Próximos a Superfície do Concreto em Ambientes Marítimos. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. 49º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo : IBRACON, 2007. v. 1.
9. HELENE, P. R. L. Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado. São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.
10. MEHTA, P. K. Durability of Concrete – Fifty Years of Progress? In: V. M. Malhotra, ed. Proceedings of the Second International Conference on Durability of Concrete. Detroit , ACI, 1991. P.1-31 (SP-126).
11. PEREIRA, A. C.. Métodos Probabilísticos para la Predicción de la Vida Útil de Estructuras de Hormigón: Influencia del Factor Variabilidad Espacial en el Caso de Plataformas Offshore en Brasil. Madrid, 2003. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos, Ingeniero Civil.
12. RODRIGUES, F.T. Medição do Grau de Saturação e a Difusão de Íons Cloreto em Concretos Executados com Cimento de Alta Resistência Inicial. Tese Apresentada para a Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009.
13. SOUZA, K.N. Estudo Experimental e Probabilístico da Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado Situadas em Ambiente Marítimo: Influência do Grau de Saturação do Concreto sobre a Difusividade de Cloretos. Tese Apresentada para a Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2005.