

Comportamento ao Longo do Tempo de um Perfil de Cloreto formando Pico

Behavior to Long of the Time of a Chloride Profile with Peak

André. T. C. Guimarães¹ & Paulo R. L. Helene²

¹*Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – atcg@mikrus.com.br*

²*Departamento de Construção Civil PCC/USP, São Paulo, SP – helene@pcc.usp.br*

RESUMO: GUIMARÃES and HELENE (2001, 2005) apresentaram modelo de estimativa de penetração de íons cloretos ao longo do tempo para perfis formando pico, ou seja, a concentração de cloretos inicialmente aumenta da superfície para o interior do concreto e a partir de uma determinada profundidade começa a diminuir. Este trabalho mostra a variação de um perfil ao longo do tempo através de medições em diferentes idades e compara com valores estimados através do modelo apresentado por GUIMARÃES e HELENE (2001, 2005) aplicado sobre o primeiro perfil medido na estrutura. O modelo apresentou uma boa precisão para este estudo de caso, devendo ser verificado em outras estruturas em uso.

ABSTRACT: GUIMARÃES and HELENE (2001, 2005) had presented model of forecast of penetration of chloride ions to long of the time for profiles having formed a peak, or either, the chloride concentration initially increases of the surface of the structure of concrete for the interior and from one determined depth it starts to diminish. This work presents the variation of this profile to the long of the time through measurements in different ages and compares with the values foreseen for the model of GUIMARÃES and HELENE (2005) from the first profile measured in the structure. The model was presented with good precision for this study of case, having had to be surveyed in other structures in use.

1. INTRODUÇÃO

Ataque de cloretos em ambiente marítimo ou em estruturas que são usados saís de degelo nem sempre apresentam perfis com teores diminuindo da superfície externa para o interior do concreto. Alguns perfis apresentam um aumento no teor de cloretos da superfície externa até uma determinada profundidade, diminuindo deste ponto até camadas mais profundas, formando pico. Este tipo de perfil deve ter tratamento diferente do modelo tradicional da segunda lei de Fick, obtendo modelos de estimativa de vida útil mais precisos.

GUIMARÃES and HELENE (2001, 2005) apresentaram modelo de estimativa de penetração de íons cloretos ao longo do tempo para perfis formando pico, ou seja, a concentração de cloretos inicialmente aumenta da superfície para o interior do concreto e a partir de uma determinada profundidade começa a diminuir.

Para comprovar a eficiência deste modelo é necessário observar o comportamento do perfil de cloretos com pico de uma mesma estrutura ao

longo do tempo. Com este objetivo foram obtidos dois perfis de cloretos de uma mesma estrutura em idades diferentes, 22 anos e 27 anos. Sobre o perfil obtido na idade de 22 anos foram estimados perfis para a idade de 27 anos através de três modelos: a) modelo tradicional considerando a segunda lei de Fick, extrapolando o valor de C_s ; b) modelo tradicional considerando a segunda lei de Fick, deslocando o eixo do “x” para a profundidade do pico e c) modelo proposto por GUIMARÃES e HELENE (2001). Os resultados são comparados com o perfil medido na idade de 27 anos, sendo os resultados analisados.

2. MODELOS PARA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL

2.1. Modelo Tradicional Correspondente a Segunda Lei de Fick

ANDRADE et al. (2000) sugerem que para concreto com considerável tempo de ataque a cloretos, a concentração no pico de teor de cloretos deve ser constante e o ponto zero do eixo do x

deve ser transferido para a profundidade onde forma o pico de teor de cloretos (Fig. 1).

ANDRADE et al. (2000) consideram que a curva a partir do pico até camadas mais profundas apresenta comportamento igual ao proposto pela solução tradicional da segunda lei de Fick.

Portanto pode-se utilizar a solução tradicional referente à segunda lei de Fick, conforme eq. 1, considerando x igual a zero para a profundidade do pico.

$$\frac{C_{C_{Cl}} - C_O}{C_{Seq} - C_O} = \operatorname{erfc} \frac{x'}{2\sqrt{Dt}} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

$C_{C_{Cl}}$ = teor de cloretos na posição x' ;
 C_O = teor inicial de cloretos na posição x' ;
 x' = distância entre o pico e a posição do teor $C_{C_{Cl}}$, ou seja, considerando $x' = 0$ no pico;
 t = tempo, considerando $t = 0$ aquele instante em que o concreto começa a sofrer o ataque de cloretos;
 $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$.

2.2. Modelo Proposto por Guimarães et alli (2001; 2005)

GUIMARÃES et alli (2001, 2005) também consideram que o ponto zero do eixo do x deve ser transferido para a profundidade onde forma o pico de teor de cloretos (Fig. 1) e que a partir deste ponto, em direção a camadas mais profundas, o perfil apresenta um comportamento conforme a segunda lei de Fick.

Consideram ainda que a forma de um pico sugere um efeito equivalente à difusão no sentido das maiores profundidades, a partir desse pico, com perda de parte do material que sofre difusão na direção oposta (Fig. 2).

GUIMARÃES et alli (2005) adaptando a equação de CRANK (p. 36, 1975) apresentam a seguinte equação para essa condição de difusão:

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} = \alpha (C_{Seq} - C_P), \quad x' = 0 \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

C_{Seq} = teor equivalente de cloretos na superfície externa do concreto;

C_P = teor de cloretos no pico;
 α = constante de proporcionalidade.

GUIMARÃES e HELENE (2005), ainda citando CRANK (p. 36, 1975), apresentam a seguinte solução para a eq. 6:

$$\frac{C_{C_{Cl}} - C_O}{C_{Seq} - C_O} = \operatorname{erfc} \frac{x'}{2\sqrt{Dt}} - \exp(hx' + h^2 Dt) \operatorname{erfc} \left(\frac{x'}{2\sqrt{Dt}} + h\sqrt{Dt} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

$C_{C_{Cl}}$ = teor de cloretos na posição x' ;
 C_O = teor inicial de cloretos na posição x' ;
 x' = distância entre o pico e a posição do teor $C_{C_{Cl}}$, ou seja, considerando $x' = 0$ no pico;
 $h = \alpha / D$;
 t = tempo, considerando $t = 0$ aquele instante em que o concreto começa a sofrer o ataque de cloretos;
 $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$.

Conforme demonstra CRANK (1975) é possível obter-se curvas de $(C_{C_{Cl}} - C_O) / C_{Seq} - C_O$ em relação a $(x' / 2(Dt)^{1/2})$, visto que para cada relação C_P / C_{Seq} (considerando C_O igual a zero) tem-se um valor característico de $h(Dt)^{1/2}$ para a curva (Fig. 3).

Este modelo representa apenas o comportamento do perfil de cloretos somente do pico para o interior do concreto.

3. APLICAÇÃO DOS MODELOS EM ESTRUTURA EXISTENTE

3.1. Estrutura Pesquisada

O elemento estrutural utilizado nesta pesquisa é um trecho composto de estacas pranchas do cais do Terminal de Containers-TECON. O cais está localizado em porto marítimo da cidade do Rio Grande – Brasil (Fig. 4), junto ao canal do Rio Grande. Este canal liga o estuário da Lagoa dos Patos, com aproximadamente 300 km de extensão, ao Oceano Atlântico.

Através das medições diárias durante o ano de 1992, do marégrafo localizado próximo à estrutura pesquisada e com sistema de canaletas própria para medir a máxima altura diária de respingo, BRETANHA (2004) classificou o micro-ambiente dos pontos pesquisados.

Nestes pontos, durante o ano, são predominantes os dias de zona de névoa (50%) e zona de respingo (45%) e poucos dias de zona de maré (5%).

Durante os meses de verão a salinidade da água do canal é alta, atingindo 34 ‰, enquanto que no inverno a salinidade é muito próxima a zero na maioria dos dias.

Devido ao regime de ventos e chuvas na região, o nível da água no canal é normalmente mais elevado no inverno, provocando respingos mais constantes e mais fortes. Este processo provoca ciclos de secagem e molhagem com água com baixíssima salinidade, que deve provocar a dessanilização na camada mais externa do concreto. Esta condição é propícia para formação de perfis de íons cloreto com pico.

Durante a pesquisa foram extraídos testemunhos, conforme ASTM C 42 (1994), e realizados ensaios de caracterização, além dos dados obtidos em relatórios de execução da obra. Obteve-se o perfil do teor de cloretos com material extraído com furadeira a cada 5 mm de profundidade (20 furos em seis estacas, totalizando 120 furos, de um trecho de 50 m do cais).

O concreto da estrutura foi executado com agregado graúdo de origem granítica britada com diâmetro máximo ($D_{máx}$) de 38 mm e a areia é quartzosa. O aglomerante utilizado foi CP IV-25 com 34% de cinza volante com um consumo de 400 kg/m^3 . A relação a/c é de 0,42 obtendo-se um f_{ck} de 19 MPa. Com 22 anos de uso apresentou massa específica de 2190 kg/m^3 e absorção por imersão e após fervura de 7,09 % conforme ASTM C 642 (1990). O cobrimento da grande maioria das barras de aço é igual ou superior a 60 mm.

Embora GUIMARÃES (2000) já tivesse obtido o perfil de cloretos na idade de 22 anos da estrutura pesquisada, esses teores foram refeitos com amostras pulverizadas devidamente armazenadas, juntamente com as amostras extraídas na idade de 27 anos. Esse procedimento foi adotado para que os perfis comparados fossem ensaiados nas mesmas condições, ou seja, no mesmo laboratório e executado pelo mesmo laboratorista.

Os teores de cloretos solúveis em água em relação à massa de concreto, conforme ASTM 1218 (1993), em amostras extraídas aos 22 anos de idade, foram de 0,28%, 0,42%, 0,57%, 0,44%, 0,32%, 0,19%, 0,11%, 0,07%, 0,04% e 0,01%, respectivamente para as profundidades de 2,5 mm,

7,5 mm, 12,5 mm, 17,5 mm, 22,5 mm, 27,5 mm, 32,5 mm, 37,5 mm, 42,5 mm e 47,5 mm.

Para a idade de 27 anos os teores para as mesmas profundidades foram respectivamente de 0,41%, 0,54%, 0,60%, 0,45%, 0,35%, 0,28%, 0,15%, 0,08%, 0,07% e 0,06%.

O teor de 0,07% de cloretos em relação à massa de concreto equivale a 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento para o traço do concreto pesquisado.

3.2. Aplicação dos Modelos

A seguir são comparadas aplicações de três modelos:

- equação tradicional da solução da segunda lei de Fick, utilizando C_s extrapolado para a superfície da estrutura, conforme Figura 1, utilizando a eq. 1;

- equação tradicional da solução da segunda lei de Fick, considerando x' igual a zero no pico, conforme Figura 1, utilizando a eq. 1;

- proposta de GUIMARÃES et alli (2001), utilizando eq. 3.

Utilizando o método do mínimo quadrado foi realizada a regressão para as três curvas para o perfil medido na idade de 22 anos, obtendo-se os valores da Tabela 1.

Tabela 1 – Valores obtidos por regressão para os três modelos analisados na idade de 22 anos

Modelos	D_2 ($\text{mm}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$)	C_s (%)	C_{pico} (%)
Tradicional – C_s extrapolado – eq. 1	9,53	1,09	0,59
Tradicional – x extrapolado - eq. 1	5,74	0,577 *	0,577 *
Proposta de Guimarães et alli (2001) – eq. 06	7,07	0,785	0,582

* $C_s = C_{pico}$, pois considera x' igual a zero, ou seja os dois valores se referem a posição do pico

A Fig. 5 apresenta os valores das curvas de regressão dos dois modelos tradicionais para as idades de 22 anos e as curvas estimadas para a idade de 27 anos e 100 anos, utilizando os mesmos modelos, além dos perfis medidos nas idades de 22 anos e 27 anos.

Na Fig. 5 observa-se que para o modelo tradicional posicionando o eixo do x no pico

mantém-se constante o valor do teor de cloretos neste ponto.

A Figura 6 apresenta os valores das curvas de regressão para a idade de 22 anos e 27 anos, além das curvas estimadas para as idades de 27 anos e 100 anos, utilizando o modelo tradicional para x' igual a zero (eixo do x deslocado para o pico) e o modelo sugerido por GUIMARÃES et alli (2001).

Nesta figura também são apresentados os perfis de cloretos medidos na estrutura pesquisada nas idades de 22 anos e 27 anos. Na regressão dos valores medidos na idade de 27 anos foi desconsiderada a profundidade de 27,5 mm, pois o valor deste ponto apresenta uma distorção em relação ao restante do perfil.

3.3. Análise dos Resultados

Quando utiliza-se o modelo tradicional extrapolando o valor de C_s o teor de cloretos no pico varia acentuadamente com o tempo, mesmo para variação de poucos anos, diferentemente do que se observa no perfil medido aos 27 anos. O valor do teor no pico, estimado pelo mesmo modelo, para a idade de 100 anos é extremamente alto (Fig. 5). Portanto, este modelo não é apropriado para estimar vida útil residual ou coeficientes de difusão de concretos que apresentam perfil com pico.

O modelo tradicional situando o eixo do x no pico e o sugerido por GUIMARÃES et alli (2001) apresentaram perfis de cloretos para as idades de 22 anos, 27 anos e 100 anos muito próximos.

4. CONCLUSÕES

O modelo tradicional da solução da segunda lei de Fick, utilizando C_s extrapolado para a superfície da estrutura, conforme Figura 1, utilizando a eq. 1, não é adequado para estimar a vida útil de estruturas de concreto que apresentam perfil de cloreto formando pico.

Com exceção do ponto na profundidade de 27,5 mm, as curvas estimadas com o modelo tradicional situando o eixo do x no pico e o modelo sugerido por GUIMARÃES et alli (2001) apresentam boa aproximação com o perfil medido na idade de 27 anos.

Portanto estes dois modelos podem ser utilizados para estimar a vida útil residual de uma estrutura, sendo mais fácil a utilização do modelo tradicional.

No entanto, a diferença do coeficiente de difusão considerando o modelo tradicional situando o eixo do x no pico e o modelo proposto por GUIMARÃES et alli (2001) deve ser estudado para verificar qual se adapta melhor a situação do perfil formando pico, no caso de se utilizar este valor em estruturas similares ou para efeito de comparação com concretos de diferentes traços, executados com diferentes tipos de materiais ou expostos a outros ambientes ou micro-ambientes.

Provavelmente o modelo sugerido por GUIMARÃES et alli (2001) seja mais aplicável quando há forte dessanilização, ou seja, perda de cloreto para o meio antes do pico, enquanto que o modelo tradicional deva-se aplicar quando não há grandes perdas para o meio antes do pico.

REFERÊNCIAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete - ASTM C 1218-92. In: *Annual Book of ASTM Standard*. Philadelphia, 1993.
2. _____. Standard test method for specific gravity, absorption, and voids in hardened concrete - ASTM C 642-90. In: *Annual Book of ASTM Standard*. Philadelphia, 1990.
3. ANDRADE, C.; SAGRERA, J. L.; SANJUÁN, M. A. Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water. In: 2nd INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELLING THE CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE. *Proceedings*. Eds. C.Andrade, J.Kropp. Paris, 2000.
4. BRETANHA, S. *Variação do grau de saturação do concreto em ambiente marítimo*. Rio Grande, 2004. Dissertação (Mestrado), Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Engenharia Oceânica.
5. CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. New York, Oxford University Press, 1975
6. GUIMARÃES, A. T. C. *Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos*. São Paulo, 2000. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Engenharia Civil.
7. 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.

8. GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L. Concrete structures service life estimation with chloride peak profiles. In: Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete

Materials and Testing. *Proceedings*. ACI, Recife, 2005.

FIGURAS

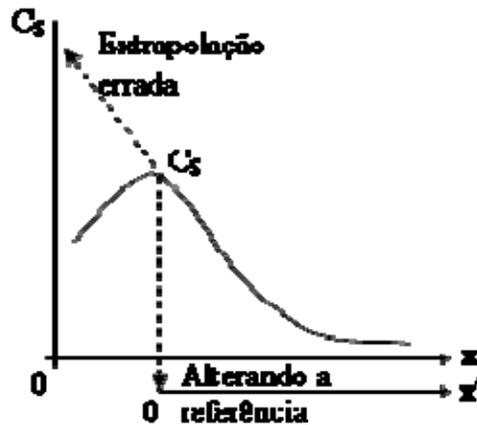


Figura 1 – Correta e errônea extrapolção dos teores do perfil de cloretos (ANDRADE et. al., 2000)

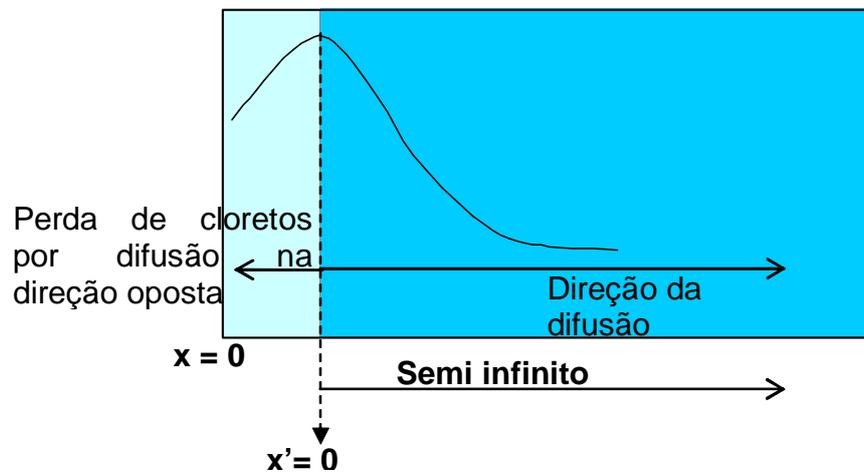


Figura 2 – Difusão de cloretos com perda de fração de cloretos que sofre difusão na direção oposta (GUIMARÃES et alli 2005)

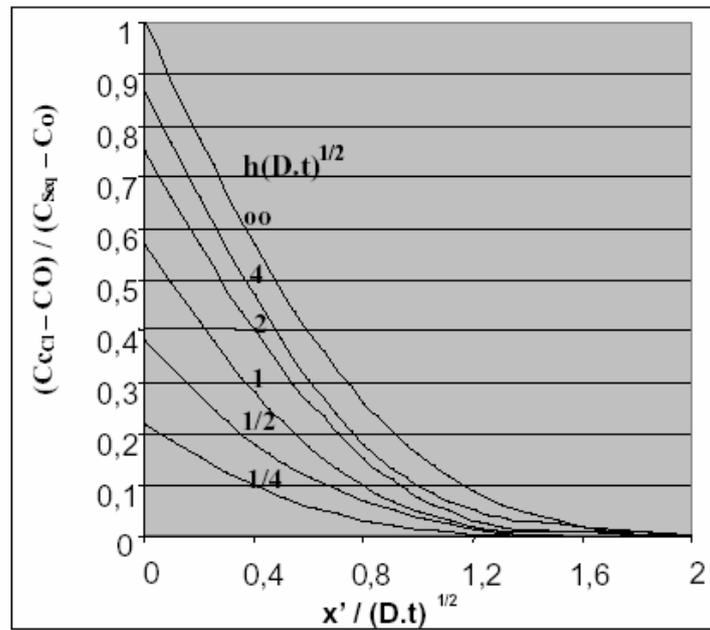


Figura 3 – Curvas de relação entre $(C_{cCl} - C_0) / C_{Seq} - C_0$ e $(x' / 2(D.t)^{1/2})$ (CRANK, 1975)



Figura 4 - Localização do cais do Terminal de Containers - TECON, RGS, Brasil Características do Concreto

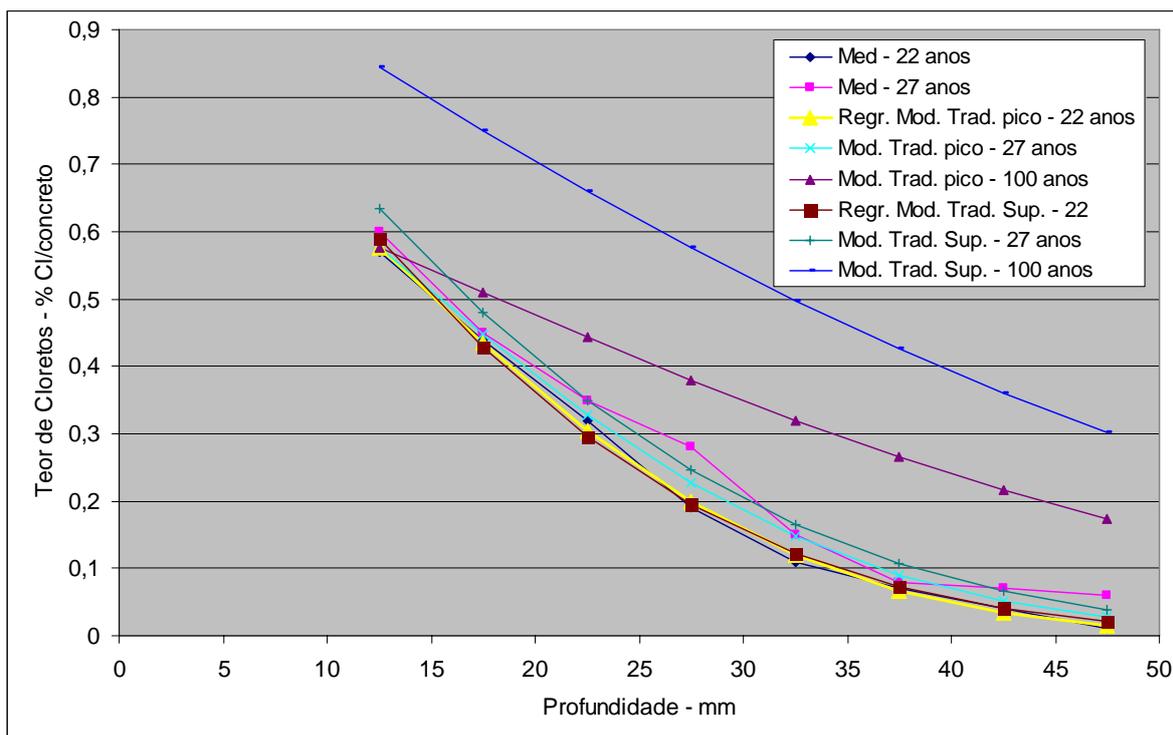


Figura 5 - Perfis de cloretos medidos aos 22 anos e 27 anos, perfis obtidos por regressão para a idade de 22 anos e perfis estimados pelos modelos tradicionais para a idade de 27 anos e 100 anos. Mod. Tradicional pico – $x' = \text{zero}$; Mod. Tradicional Sup. – extrapolação de C_s

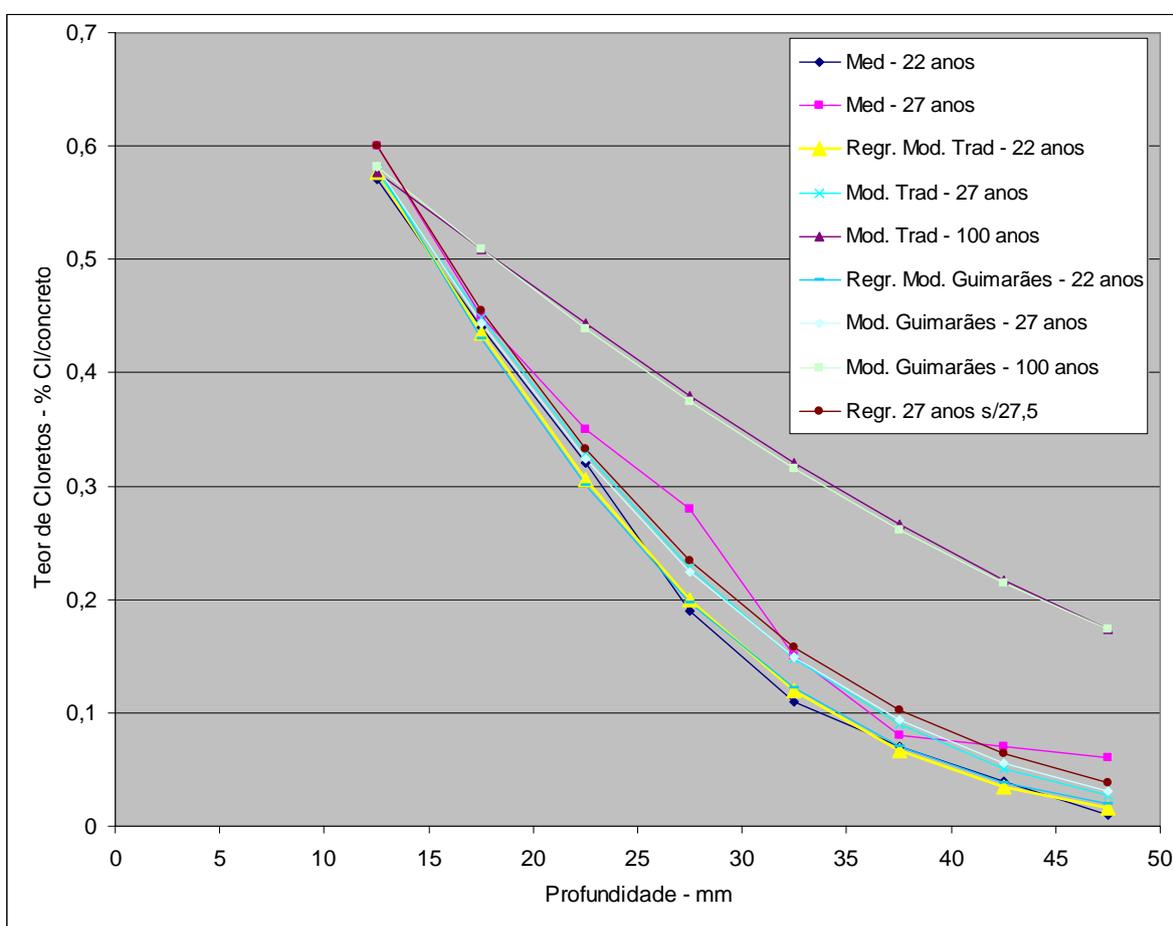


Figura 6 – Perfis de cloretos medidos aos 22 anos e 27 anos, suas regressões e perfis estimados pelos três modelos para a idade de 27 anos e 100 anos