



## Modelagem e Previsão da Vida Útil de Concretos de Cimento Portland Através de Técnicas Estatísticas

Guilherme Weber Godziuk, Bruno Gazzola Antonini Ribeiro, Jairo José de Oliveira Andrade (orientador)

*Faculdade de Engenharia, PUCRS*

### **Resumo**

Esse trabalho tem como objetivo analisar a influência que o tipo de cimento tem na penetração de íons cloreto em concretos. Inicialmente foram moldadas vigas com diferentes tipos de cimento (CP II E, CP IV e CP V) com relações a/c iguais a 0,45 que, após 28 dias de cura, foram imersas em uma solução de NaCl. Amostras de concreto foram retiradas, sob a forma pulverulenta, a diferentes profundidades, durante 15, 30, 60, 180 e 360 dias, sendo analisadas pelo método de potenciometria direta a fim de verificar a evolução do perfil de penetração de cloretos com base na concentração superficial ( $C_s$ ) e com base no coeficiente de difusão ( $D$ ). Com esses resultados, foram criadas curvas de penetração utilizando a formulação baseada na 2ª Lei de Fick, possibilitando estimar um modelo de projeção da evolução da penetração de cloretos em idades avançadas. A previsão do crescimento da concentração superficial de cloretos foi realizada através de ajustes não lineares segundo a equação  $C(t) = C_0 \cdot t^m$ , enquanto que a modelagem referente ao coeficiente de difusão foi expressa por  $D(t) = D_0 \cdot t^{-m}$ , cujas expressões foram propostas originalmente por Costa e Appleton (1999).

Foram coletados dados da literatura a fim de realizar uma meta-análise (união de resultados de diversos trabalhos visando extrair informações adicionais de dados pré-existent) visando verificar a consistência dos dados do experimento. Para tanto, através de uma pesquisa bibliográfica criteriosa, os resultados foram comparados a fim de determinar se os padrões de comportamento são similares. Oito trabalhos extraídos da literatura foram empregados para a realização da meta-análise (MEIRA *et al.*, 2007; LIN *et al.*, 2010; J.M.

Khatib, 2001; W. Chalee, 2009; COSTA *et al.*, 1999; Mangat & Limbachiya, 1999; Oh & Jang, 2007; Guimarães & Helene, 2004).

Os perfis de penetração de cloretos ao longo do tempo estão apresentados na Figura 1.

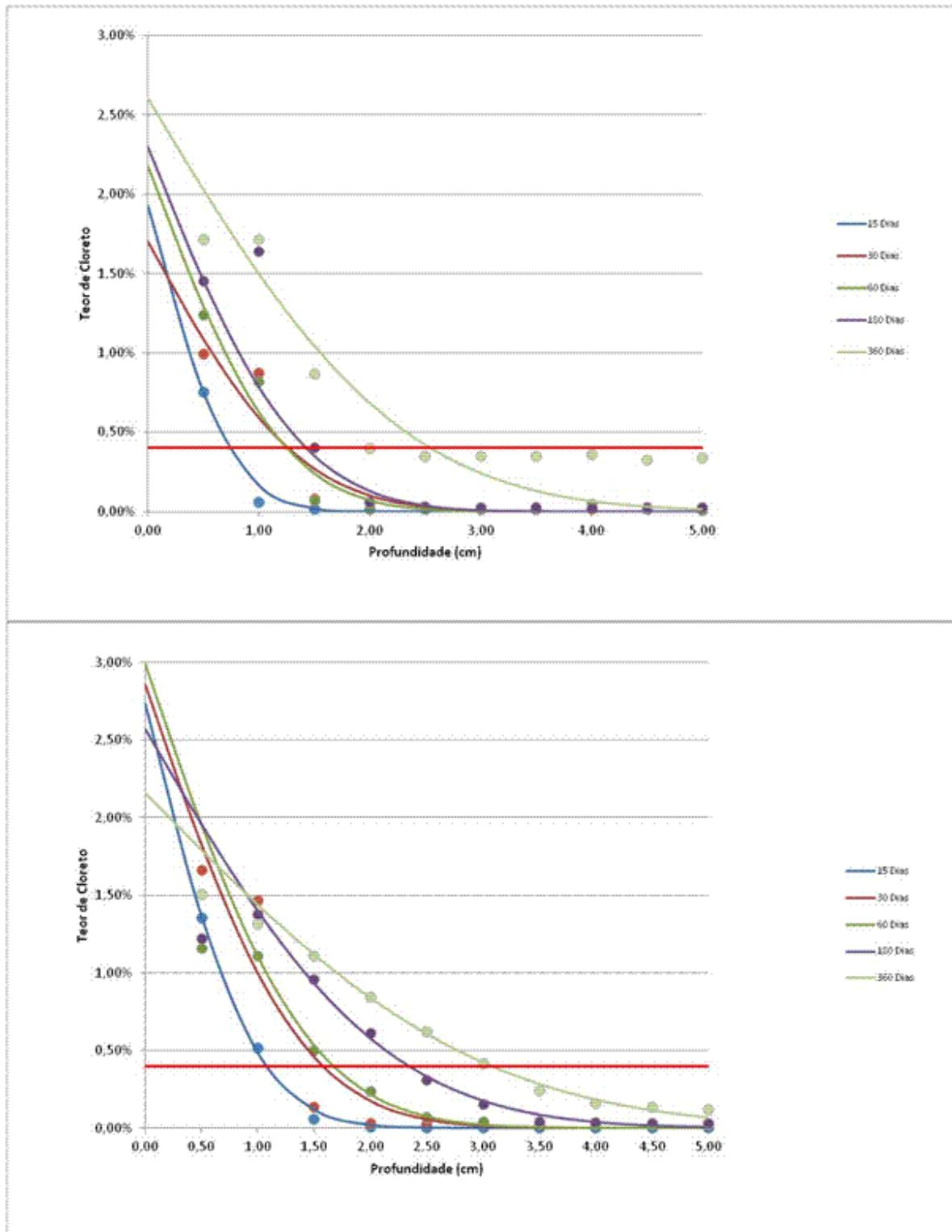
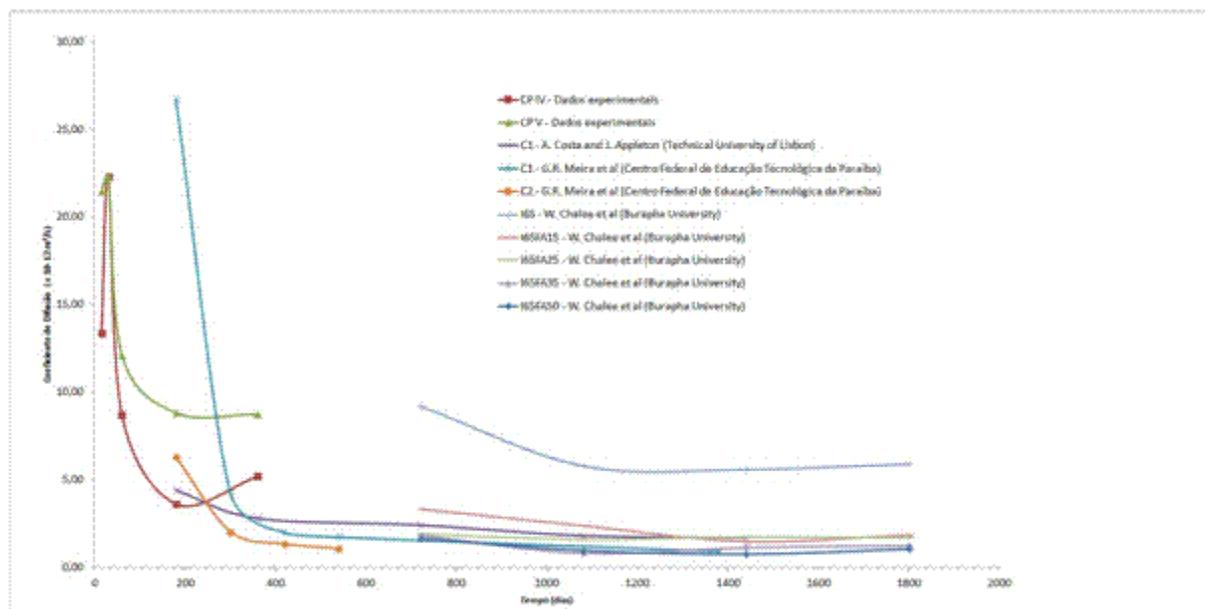


Figura 1 Os perfis obtidos com os concretos, em ordem, CP IV e CP V

Através de uma análise da Figura 1 pode-se observar que o concreto com o CP V ARI apresentou uma maior penetração de cloretos, independentemente da idade. Além disso, pode-se verificar que a concentração de cloretos que pode causar a despassivação da armadura (0,4% em relação à massa de cimento) ao final de 1 ano de exposição ficou a aproximadamente 2,5 cm para o cimento CP IV e 3,0 cm para o CP V ARI. Isso mostra que a profundidade de penetração de cloretos para apenas 1 ano é extremamente elevada, o que deve ser considerado no momento da escolha dos materiais para a elaboração dos concretos.

Nas Figuras 2 e 3 estão apresentadas a meta-análise realizada com os dados da literatura considerando  $C_s$  e  $D$ , respectivamente.



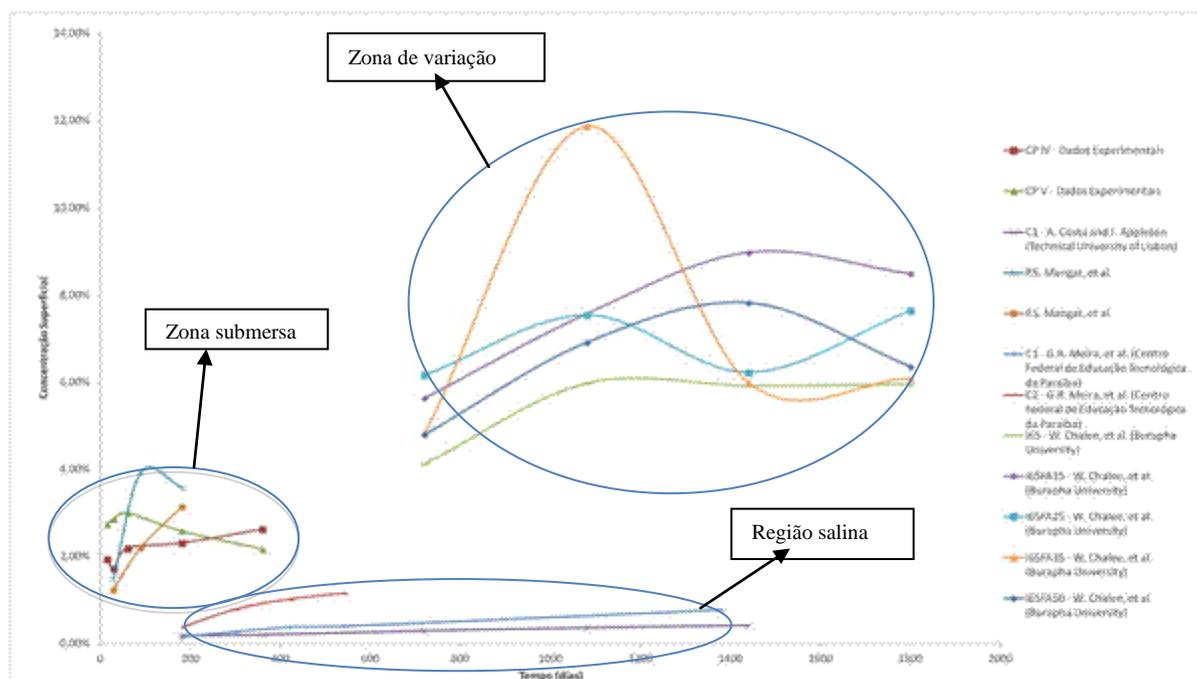


Figura 3 As curvas de evolução de Cs.

Os resultados mostram que, além da resistência do concreto, o tipo de cimento empregado influencia de maneira significativa na penetração de cloretos. Também foi verificado que é possível prever a penetração desses íons em idades avançadas através da análise do comportamento da concentração superficial e do coeficiente de difusão existente nesses concretos em diferentes idades.

As equações relacionando o crescimento de Cs e a minimização de D em função do tempo estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 Equações de C(t) e D(t).

Autor	Equações ajustadas	r <sup>2</sup>
Este trabalho (CP IV)	$C(t) = 0,0132.t^{0,111}$	0,7724
	$D(t) = 63,562.t^{-0,468}$	0,6962
Este trabalho (CP V)	$C(t) = 0,0362.t^{-0,073}$	0,5658
	$D(t) = 55,845.t^{-0,334}$	0,8809
MEIRA <i>et al.</i> , (2007)	$C(t) = 0,0024.t^{0,808}$	0,9666
	$D(t) = 35783.t^{-1,526}$	0,805
COSTA <i>et al.</i> , (1999)	$C(t) = 0,0165.t^{0,4337}$	0,963
	$D(t) = 43,712.t^{-0,449}$	0,9699
J.M. Khatib <i>et al.</i> , (2001)	$C(t) = 0,2938.t^{0,51}$	0,7982
	$D(t) = 6297,8.t^{-1,031}$	0,9308
MEIRA <i>et al.</i> , (2007)	$C(t) = 0,0017.t^{1,054}$	0,9528
	$D(t) = 25924.t^{-1,624}$	0,9635
W. Chalee <i>et al.</i> , (2009)	$C(t) = 0,3368.t^{0,3922}$	0,7108
	$D(t) = 215,42.t^{-0,495}$	0,6913

Verifica-se que os dados apresentados no presente trabalho possuem uma forte aderência com os demais resultados encontrados na literatura, como pode ser verificado através da análise das Figuras 2 e 3. Com as Equações apresentadas na Tabela 1, é possível estimar os valores de  $D$  e  $C_s$  para um determinado tempo  $t$ , visando auxiliar no projeto de estruturas de concreto localizadas em áreas salinas e que estejam de acordo com as exigências de durabilidade previstas na NBR 6118 (ABNT, 2007).

### Referências Bibliográficas

- Guimarães, A. T., Helene, P. R.** (Agosto de 2004). Modelo para previsão de vida útil residual utilizando perfil de cloreto com pico. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, pp. 11-21.
- J.M. Khatib, P. M.** (2001). Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride.
- Mangat, P., Limbachiya, M.** (1999). Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials. *Cement and Concrete Research*, pp. 1475-1485.
- Oh, B. H., Jang, S. Y.** (2007). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, pp. 47 - 53.
- W. Chalee, C. J.** (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structures*, pp. 342-353.
- COSTA, A.; APPLETON, J.** Chloride penetration into concrete in marine environment-Part II: Prediction of long term chloride penetration. *Materials and Structures*, v. 32, p. 354-359, 1999. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/index/R17R7L3L24426872.pdf> >.
- LIN, G.; LIU, Y.; XIANG, Z.** Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments. *Cement and Concrete Composites*, 2010. Disponível em: < <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946510000983> >.
- MEIRA, G. R.; ANDRADE, C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, C.; JR, J. C. B.** Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone - relationship between deposition of chloride on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. *Cement and Concrete Composites*, n. 29, p. 667-676, 2007.