

# Influência do grau de saturação na difusão de cloretos no concreto: visão geral de sua importância na estimativa de vida útil

## Influence of the saturation degree in the chloride diffusion in the concrete: general vision of its importance in the estimate of service life

André Tavares da Cunha Guimarães<sup>1</sup> & Felipe Trez Rodrigues<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escola de Engenharia – FURG, Rio Grande, RS – atcg@vetorial.net

<sup>2</sup>Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Oceânica FURG, Rio Grande, RS –ftrez@bol.com.br

**RESUMO:** GUIMARÃES (2000), CLIMENT et al. (2002) e NIELSEN e GEIKER (2003) demonstraram que o grau de saturação do concreto (GS) tem grande influência na difusão de ions cloreto. Neste trabalho é apresentada uma visão geral da influência do grau de saturação na vida útil do concreto, sendo comparados os resultados de três grupos de pesquisadores. Também, valores de GS para concretos executados com cimentos pozolânico e de alta resistência inicial são apresentados. Ainda é demonstrada a precisão de modelo baseado na segunda lei de Fick considerando ou não o grau de saturação do concreto em estruturas reais em ambiente marítimo. Observa-se que os modelos dos três grupos de pesquisa apresentam resultados similares mesmo utilizando métodos de ensaio diferentes. Através dos estudos de casos apresentados neste trabalho comprova-se a grande influência do GS na difusão de cloretos no concreto e a importância da consideração deste fator na vida útil de projeto (novas estruturas) e na vida útil residual de estrutura em uso.

**ABSTRACT:** GUIMARÃES (2000), CLIMENT et al. (2002) and NIELSEN and GEIKER (2003) had demonstrated that the saturation degree (SD) of the concrete has great influence in the diffusion of chloride ions. In this work it is presented a general vision of the influence of the saturation degree in the concrete service life, being compared the results of three groups of researchers. Also, values of SD for concrete executed with pozzolanic cement and high initial resistance cement are presented. Still is demonstrated to the precision of model based on the second law of Fick considering or not it SD of the concrete in real structures in maritime environment. It is observed that the models of the three groups of research present similar resulted using different methods of assay. Through the studies of cases presented in this work it show great influence of the SD in the chloride diffusion in the concrete and the importance of the consideration of this factor in the service life of project (new structures) and in the residual service life of structure in use.

### 1. INTRODUÇÃO

Os modelos deterministas de penetração de agentes agressivos no concreto normalmente levam em consideração a segunda lei de Fick, dada por

$$\frac{C_{cCl} - C_o}{C_{seq} - C_o} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D.t}} \quad (1)$$

onde,

$C_{cCl}$  = teor de cloretos na posição  $x$ ;

$C_o$  = teor inicial de cloretos na posição  $x$ ;

$C_{seq}$  = teor de cloretos na superfície do concreto

( $x = \text{zero}$ );

$x$  = distância entre a superfície e a posição do teor

$C_{cCl}$ ;

$D$  = coeficiente de difusão de cloretos no concreto;

$t$  = tempo, considerando  $t = \text{zero}$  aquele instante em que o concreto começa a sofrer o ataque de cloretos, ou seja, o tempo de exposição da estrutura a ambiente marítimo ou a saís de degelo;

$\text{erfc}(z) = 1 - \text{erf}(z)$ ; sendo  $\text{erf}(z)$  = função erro de Gauss.

Na equação (1), a profundidade de penetração de um teor de cloretos (normalmente considerado ao redor de 0,4% em relação à massa de cimento, por ser este, aproximadamente, o teor de despassivação do aço no interior do concreto) depende da concentração de cloretos na superfície da estrutura, da temperatura, do tempo de exposição e do coeficiente de difusão do concreto. Por sua vez, o coeficiente de difusão do concreto depende das características do concreto e do meio ambiente em que está inserido.

GUIMARÃES (2000), CLIMENT et al. (2002) e NIELSEN e GEIKER (2003) demonstraram que o grau de saturação do concreto (GS) tem grande influência na difusão de cloreto.

GUIMARÃES (2000) considera a influência do tipo de cimento, da temperatura média por estação do ano, do GS e da posição da superfície de ataque em relação à superfície de concretagem (GUIMARÃES et al., 1999) sobre o coeficiente de difusão do cloreto, aplicando coeficientes de redução  $R_C$ ,  $R_T$ ,  $R_{GS}$ ,  $R_{SC}$ , respectivamente, a partir de coeficientes de difusão obtidos em laboratório executados com cimento Portland comum e com GS de 100%:

$$D_{\text{const.CI}^- (\text{ef})} = D_{\text{const.CI}^- (\text{lab.})} \cdot R_C \cdot R_T \cdot R_{GS} \cdot R_{SC} \quad (2)$$

onde,

$D_{\text{const.CI}^- (\text{ef})}$  = coeficiente de difusão considerando as condições de exposição no micro-ambiente;

$D_{\text{const.CI}^- (\text{lab.})}$  = coeficiente de difusão obtido em laboratório na condição de concreto saturado (GS = 100%), executado com cimento Portland comum.

Este trabalho tem o objetivo de mostrar os avanços obtidos em pesquisas realizadas até a presente data sobre a influência do GS na vida útil de projeto e vida útil residual de estruturas de concreto armado.

## 2. MODELOS DE INFLUÊNCIA DO GS NA DIFUSÃO DE CLORETOS

### 2.1. Cimento Portland pozolânico e cimento de alta resistência inicial

GUIMARÃES e HELENE (2007) mostram a influência do GS na difusão de cloretos em diversos traços de concreto com cimento pozolânico e VICENTE MURCIA (2007) e RODRIGUES e GUIMARÃES (2008), em pesquisa conjunta, para concreto com cimento de alta resistência inicial - ARI e apresentam modelo da variação de  $D/D_{\text{máx}}$  em função do GS (Fig. 1).

GUIMARÃES e HELENE (2007) utilizam corpos de prova de argamassa peneirada do concreto, de aproximadamente 30 mm de diâmetro e 45 mm de altura, e tempo de cura de 6 meses no mínimo. Os corpos de prova saturados são mantidos parcialmente submersos em recipiente hermeticamente fechado. Os corpos de prova não saturados são mantidos em sacos plásticos (no mínimo 2) com massa relativa à umidade do GS desejado, sendo o excesso de ar retirado e os sacos plásticos lacrados. Após aproximadamente 30 dias, os corpos de prova são contaminados no topo com cloreto de sódio finamente moído e novamente armazenados até as idades de desgaste para obtenção do perfil de cloretos.

### 2.2. Comparação com resultados de CLIMENT et al.(2002)

CLIMENT et al. (2002) utiliza corpos de prova de concreto de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, sendo curados por aproximadamente 6 meses. Os corpos de prova são mantidos em câmaras com umidade relativa controlada para obtenção do GS desejado e a contaminação do topo é feita em câmara de queima de PVC. Após tempos predeterminados, os corpos de prova são desgastados e obtidos os perfis de cloretos.

VICENTE MURCIA (2007) compara valores de coeficiente de difusão em função do GS para o concreto H1 (GUIMARÃES e HELENE, 2007) e valores obtidos por CLIMENT et al. (2002) para concreto similar (H-25) (Fig.2). Embora os métodos utilizados apresentem significativas diferenças, a curva ajustada apresenta boa correlação.

### 2.3. Comparação com resultados de NIELSEN e GEIKER (2003)

NIELSEN e GEIKER (2003) utilizam corpos de prova prismáticos com dimensões de 70 x 100 x 100 mm de argamassa executada com cimento de

alta resistência inicial e curados por 6 meses. A contaminação dos corpos de prova, após a estabilização do GS, é obtida por imersão em solução de 26% de NaCl por duas horas e secos com secador de cabelo, sendo novamente armazenados por 60 dias, quando são obtidos os perfis de cloretos. Os corpos de prova saturados são mantidos em uma solução de 3% de NaCl por 30 dias, quando são desgastados para obtenção dos perfis de cloreto.

Na Fig. 3 são comparados os resultados de concretos similares de GUIMARÃES e HELENE (2007) e NIELSEN e GEIKER (2003). Os resultados são muito próximos, sendo os métodos de ensaio diferentes.

### 3. MEDIÇÕES DE GS

GUIMARÃES (2000) desenvolveu um método para medição do GS do concreto por gravimetria (Fig. 4a), sendo utilizado para monitoramento de testemunhos de concreto para pesquisa (testemunhos em rack) (Fig. 4b) ou para monitoramento de estruturas existentes (Fig.5). A Fig. 6 apresenta alguns valores de GS.

Observa-se que concretos de melhor qualidade apresentam GS maiores em relação a concretos mais pobres, quando compara-se concreto executado com cimento pozolânico com concreto executado com cimento ARI de mesmo traço (Fig. 6).

Concretos expostos a distância maior da água do mar apresentam GS menores, como pode ser observado na Fig. 6 comparando os testemunhos PS expostos no pavilhão do TECON (Fig. 5d) e Rack-Poz-L que apresentam características similares e foram executados com cimento pozolânico CP IV - 32. Os testemunhos PS expostos no paramento do cais, junto ao ponto de extração, apresentaram GS menores que testemunhos PS expostos no pavilhão, possivelmente devido a grande movimentação de navios, ficando os testemunhos confinados junto ao cais e, portanto, parcialmente protegidos de intempérie.

## 4. APLICAÇÕES

### 4.1. Estimativa de vida útil de projeto

A seguir são apresentados resultados de estudos de caso, onde foram obtidos perfis de

cloretos em estruturas em uso com idade superior a 20 anos. Foram comparados os perfis medidos na idade da extração das amostras com os resultados do modelo determinístico baseado na segunda lei de Fick, não considerando o GS e considerando o GS.

Na Fig. 7 apresentam-se valores de  $k$  para o modelo  $c = k(t)^{1/2}$  para o ponto PS – TECON (GUIMARÃES, 2005), relativo à viga de paramento de cais marítimo no extremo sul do Brasil (Fig. 5a). O concreto desta estrutura foi executado com cimento pozolânico.

Observa-se que o modelo apresenta um erro de 128% quando não considerado o GS (Fig. 7d) e que este erro cai para 3,6% quando considerado o GS (Fig.7b), em relação ao valor obtido no perfil medido aos 22 anos (Fig. 7a). Para o ponto ES do mesmo cais, relativo a estacas prancha (Fig. 5b), o erro não considerando o GS e considerando o GS foram de 141% e 45%, respectivamente. Para o ponto EI (Fig. 5b), o erro não considerando o GS foi de 150% e considerando o GS este erro baixa para 61%. Para os pontos ES e EI, os erros considerando o GS ainda são altos, embora tenham reduzido muito em relação ao modelo não considerando o GS, provavelmente porque as estacas pranchas foram executadas com cimento CP IV – 25 e os modelos da influência do GS sobre a difusão de cloretos foram realizados com concretos executados com cimento CP IV – 32.

Para um ponto situado a 40 m de altura da Torre de telecomunicações em ambiente marítimo (Fig. 5c), o erro não considerando o GS foi de 106%, diminuindo para 17% quando considerado o GS.

Observa-se uma grande influência do GS na difusão de cloretos no concreto, sendo, portanto, muito importante a sua consideração nos modelos de vida útil.

### 4.2. Prolongamento de vida útil residual

Atualmente está se medindo em rack o GS de concretos protegidos superficialmente com pintura epóxi, acrílica e hidrofugante. Espera-se obter valores de GS próximo ao de concretos em ambiente interno. Para os valores obtidos e apresentados na Fig. 6 e conforme Fig. 2, o coeficiente de difusão de concretos com cimento pozolânico varia em torno de 200% entre os

internos e os externos na posição lateral. Para cimento ARI esta diferença é ao redor de 100%. Portanto, se esta condição for obtida para concreto com superfície protegida, a vida útil deve triplicar para cimento pozolânico e dobrar para cimento ARI. Da mesma forma, se em estrutura existente se estimar que a frente de ataque por cloreto atinja o aço em aproximadamente 5 anos (estimativa de vida útil residual na idade de 22 anos), como foi no ponto PI do cais do TECON (GUIMARÃES, 2005)(Fig.5a), executado com cimento pozolânico, caso tivesse sido protegido por pintura nesta zona de maior ataque, que foi entre a zona de névoa e zona de respingo, este teria sua vida útil residual prolongada para 15 anos. Ainda haveria o benefício de aumentar a resistividade do concreto, diminuindo a taxa de corrosão quando fosse despassivada a barra de aço.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se a importância de considerar o grau de saturação (GS) nos modelos de vida útil residual, antes e depois de o concreto sofrer intervenção, e na vida útil de projeto. Deve-se salientar, no caso de pintura ou aplicação de hidrofugante, a importância de se manter a proteção superficial do concreto de acordo com as recomendações dos fabricante destes produtos.

## REFERÊNCIAS

1. Guimarães, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo - PCC/USP, Engenharia Civil, 2000.
2. Climent, M. A.; Vera, G.; López, J. F.; Viqueira, E.; Andrade, C. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete – Part I: The instantaneous plane source diffusion case. **Cement and concrete Research**, v 32, p. 1113-1123, 2002.
3. Nielsen, P. E.; Geiker, M. R. Chloride diffusion in partially cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v33, p. 133-138, 2003.
4. Guimarães, A.T.C.; Tula, L.; Helene, P.R.L. **Performance of surface concrete elements** - II Internatinal Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, Gramado, 1999. CD
5. Guimarães, A.T.C.; Helene, P.R.L. **Models of variation of chloride ion diffusion as a unction of changes in the saturation degree (SD) of concrete mixes prepared with pozzolanic cement**. Integral Service Life Modelling of Concrete Structures - RILEM Workshop TC-MAI,- Guimarães, p. 63-70, 2007.
6. Vicente Murcia, F.J. **Difusividad del ión cloruro a través de morteros de cemento parcialmente saturados de agua**. Monografia (Conclusão de Curso), Escuela Politécnica Superior de Alicante, 2007.
7. Souza, K; G. Estudo da influência dos micro ambientes na variação do grau de saturação do concreto. **Teoria e Prática na Construção Civil**, n.8, p. 63-68, 2006.
8. Bretanha, S. **Variação do grau de saturação do concreto em ambiente marítimo**. Dissertação (Mestrado), Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Engenharia Oceânica, 2004.
9. Castagno, R.; Guimarães, A.T.C; Helene, P.R.L. Aplicação de modelo de penetração de cloretos considerando o grau de saturação do concreto: estudo de caso em zona de névoa marítima de estrutura existente. **Revista Vetor**, v.14 (1), p. 61-77, 2003.
10. Rodrigues, F.T.; Guimarães, A.T.C. **Influência do grau de saturação na difusão de cloretos para concreto executado com cimento ARI-RS**. 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, 2008. CD
11. Guimarães, A. T. C. **Grau de Saturação: Sua variação com o tipo de concreto e sua influência na difusão de íons cloretos**. Monografia apresentada à Escola Politécnica da USP para conclusão de Pós-Doutorado em Engenharia Civil, 2005.

## ANEXO

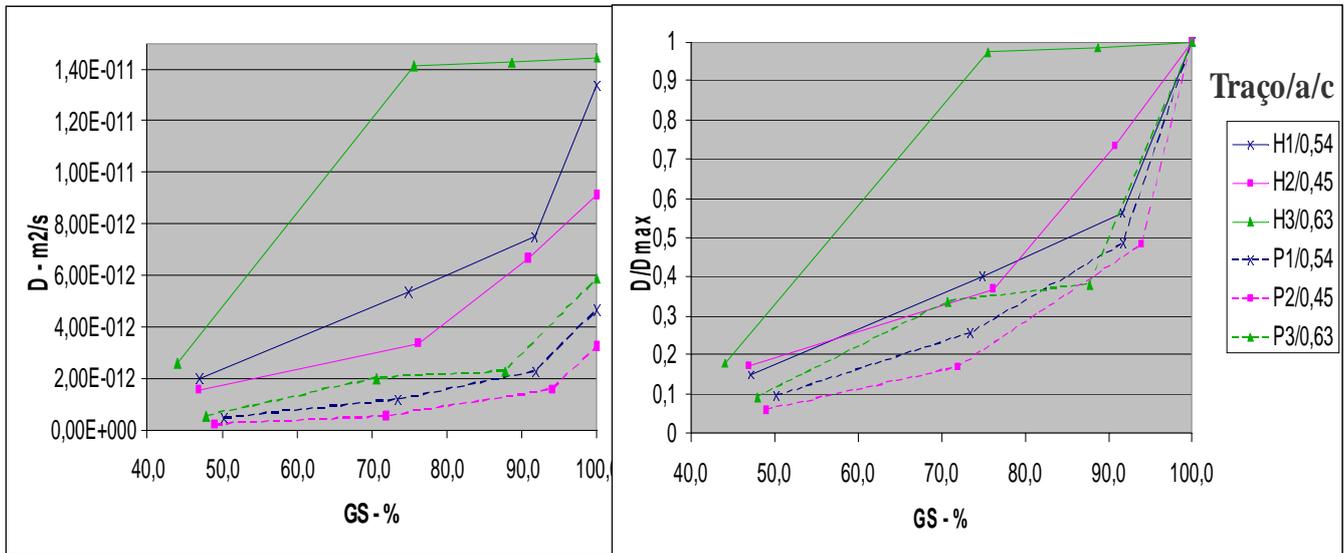


Figura 1 - Variação do coeficiente de difusão em relação ao GS de concreto executados com cimento de alta resistência inicial – H (VICENTE MURCIA, 2007; RODRIGUES e GUIMARÃES, 2008) e com cimento pozolânico - P (GUIMARÃES e HELENE, 2007)

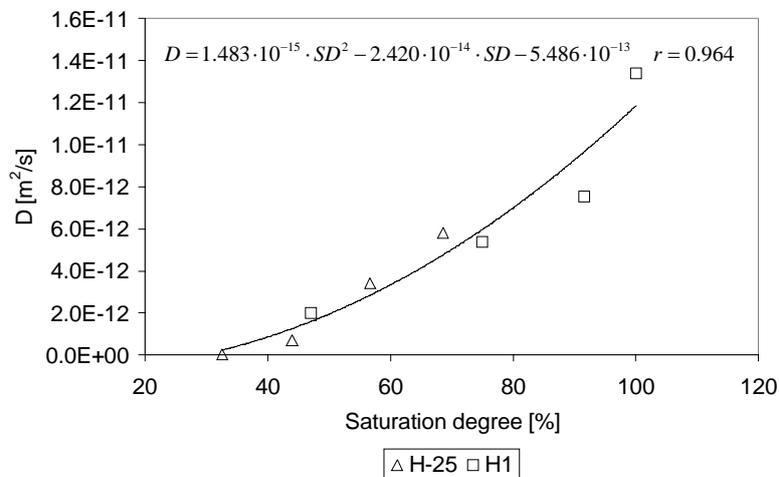


Figura 2 - Comparação entre coeficientes de difusão para o concreto H1 (GUIMARÃES e HELENE, 2007) e de CLIMENT et al. (2002), para concreto H25 (VICENTE MURCIA, 2007)

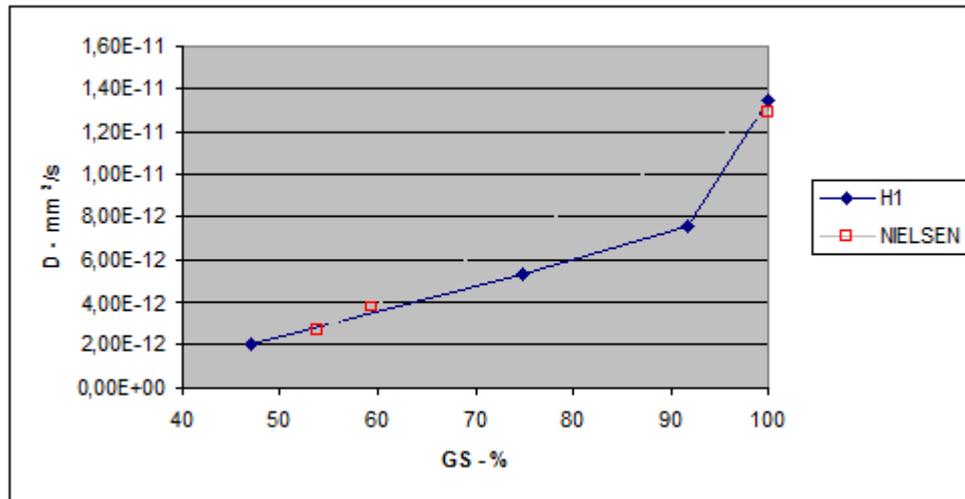


Figura 3 - Comparação entre coeficientes de difusão para o concreto H1 (GUIMARÃES e HELENE, 2007) e de NIELSEN et alli (2003), ambos com cimento ARI



(a)



(b)

Figura 4 - a) Medição de GS por Gravimetria, b) exposição de testemunhos em rack a 1200 m de distância da água do mar (SOUZA et al., 2005)

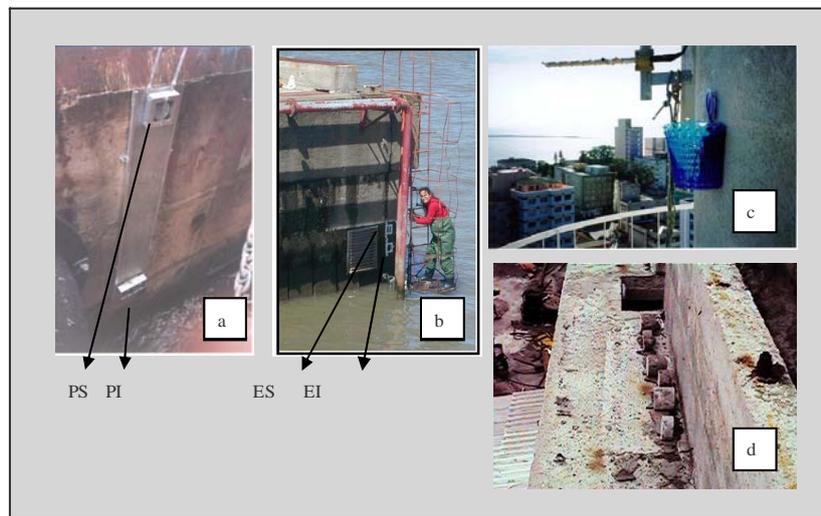
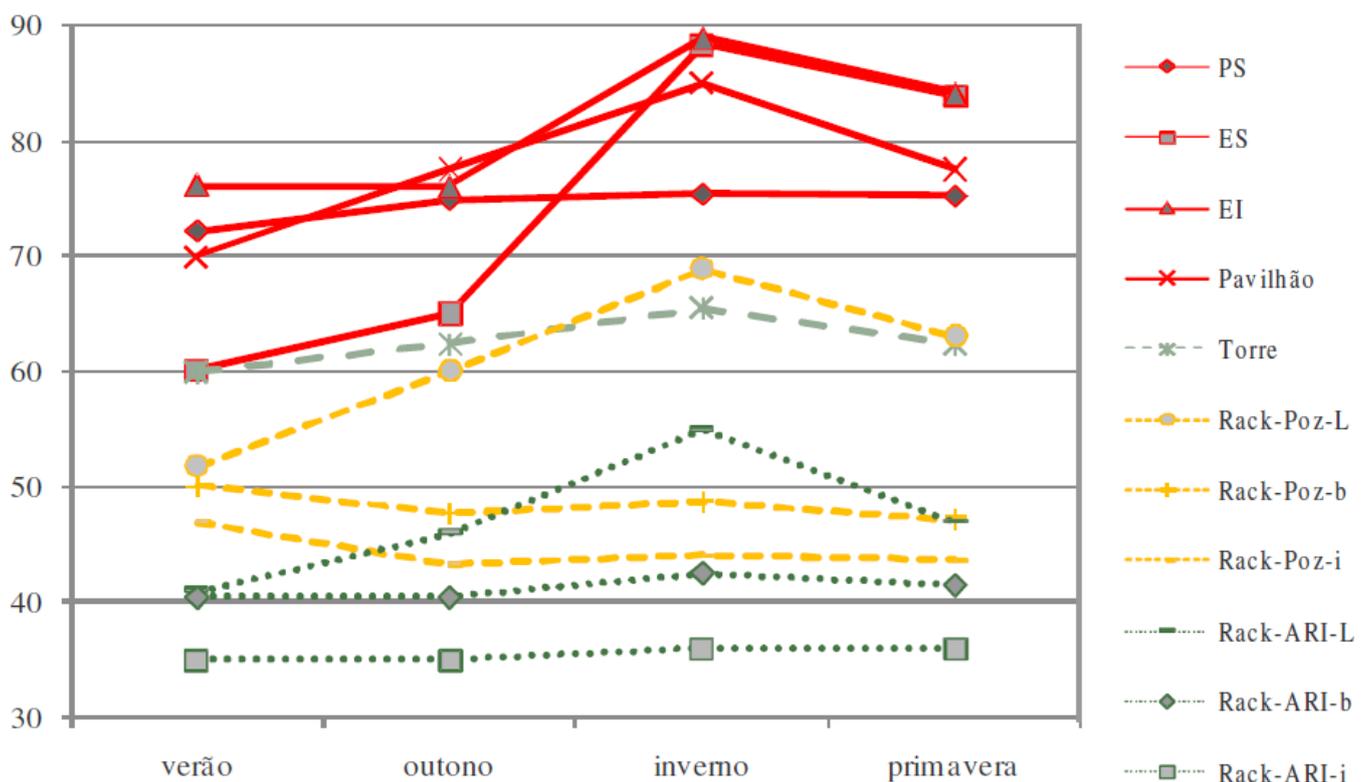


Figura 5 - Medição de GS: a) TECON- pontos PS e PI – cim. CP IV-32 (BRETANHA, 2004), b) TECON – pontos ES e EI – cim. CP IV-25 (BRETANHA, 2004), c) Torre – medição a 40 m de altura e 500m da água do mar – cim. Portland comum (CASTAGNO e GUIMARÃES, 2004), d) Testemunhos do ponto PS expostos em pavilhão no TECON, ponto a 10 m de altura e 120 m da água do mar (GUIMARÃES, 2000)



\*L – testemunho com superfície lateral, em relação a superfície de concretagem, exposta para o sul; b – testemunho com superfície exposta para baixo (ambiente aberto protegido de intempérie; i – testemunho exposto a ambiente de laboratório (interno).

Figura 6 - Valores de GS para os pontos PS, ES, EI (BRETANHA, 2004); testemunhos de PS expostos no pavilhão do TECON (GUIMARÃES, 2000); Torre (CASTAGNO et al., 2004); rack para o traço P1(Poz) (SOUZA et al.,2005) e para o traço H1(ARI) ( RODRIGUES e GUIMARÃES, 2008)

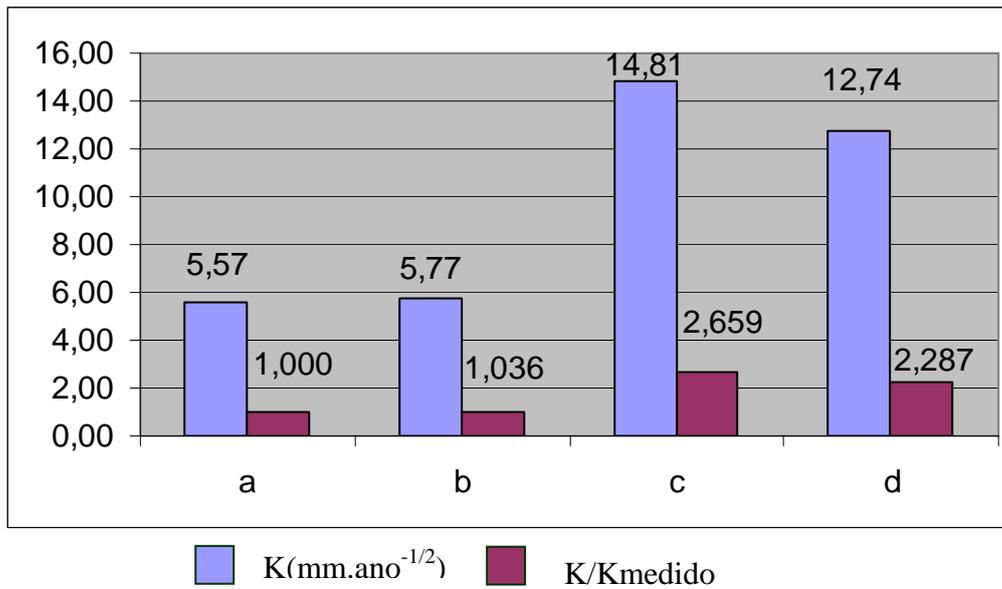


Figura 7 - Coeficiente de penetração de íons cloretos –  $K(\text{mm.ano}^{-1/2})$  – Ponto PS - a) Medido aos 22 anos: obtido através da curva teórica por regressão; b) Modelo: considerando o modelo com os fatores ( $f_{ck}$  – variação da resistência; Cimento – tipo de cimento; T – variação da temperatura; GS – variação do Grau de saturação; SE – posição da superfície exposta da relação superfície de concretagem); c) Não considerando SE e GS; d) Não considerando somente GS (GUIMARÃES, 2005)