

Variação do grau de saturação do concreto em ambiente marítimo

Sônia S.F. Bretanha¹; André T. C. Guimarães²

¹Engenheira Civil, Mestranda do curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, professora substituta da Fundação Universidade Federal do Rio Grande
bretanha@terra.com.br

²Engenheiro, Doutor em Engenharia Civil, professor Adjunto da Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG/RS
atcg@mikrus.com.br

RESUMO: Atualmente a maioria dos modelos de durabilidade do concreto em ambiente marítimo não considera o grau de saturação (GS) da estrutura, fato esse que GUIMARÃES [4] demonstrou ter grande influência sobre a difusão de íons cloreto. Este estudo visa a comprovação do modelo de durabilidade do concreto armado desenvolvido por GUIMARÃES [4] em estruturas situadas em ambientes marítimos considerando a variação do grau de saturação (GS). Para tal são estudadas estruturas situadas em diversos micro-ambientes no cais do Terminal de Containers - TECON em Rio Grande-RS. Dessa forma se reconhece um modelo capaz de prever a vida útil de estruturas de concreto armado situadas em ambiente marítimo ainda na fase de projeto, fazendo com que essas desempenhem suas funções economicamente, evitando desperdício e os altos custos para sua recuperação.

PALAVRAS-CHAVES: Grau de Saturação, Concreto, Cloretos

1. INTRODUÇÃO

Os fenômenos da terra e as variações da natureza acarretam problemas nas estruturas de concreto armado situadas em ambientes marítimos devido as porções significativas de água que afetam as obras situadas na costa e na linha de união com o mar sendo motivo de estudos de várias destas construções. GUIMARÃES [4] desenvolveu modelo utilizado em ambiente marítimo comprovando a necessidade de se considerar o grau de saturação (GS) em estruturas de concreto armado, conseguindo-se assim fazer uma previsão da vida útil de estruturas e da profundidade de ataque de íons cloreto, com mais precisão. Vários modelos hoje em dia são elaborados em laboratório para determinar a vida útil do concreto situado em ambiente marítimo considerando o concreto saturado. Neste trabalho são considerados vários micro-ambientes e estudado o comportamento do concreto através do modelo considerando a variação do grau de saturação (GS).

Assim, este estudo visa pesquisar o grau de representatividade do modelo de GUIMARÃES [4] quanto ao comportamento do concreto quando submetido ao ambiente marítimo.

Para tal foi medido a variação sazonal do GS, que é o percentual de água livre em relação ao volume de poros do concreto, e aplicado o modelo em quatro micro-ambientes no cais do Terminal de Containers – TECON, do qual há dados sobre os materiais empregados e as técnicas de construção utilizadas.

2. INTENSIDADE DO ATAQUE DE CLORETOS

2.1. Ambiente marítimo

O micro clima e a atmosfera onde está inserido a estrutura de concreto são fatores que determinam a intensidade de ataque dos íons cloretos.

A água do mar, atmosfera marinha (maresia), água de amassamento, agregados contaminados por sais, soluções de sais degelantes, processos industriais e os aditivos são as fontes mais comuns, que faz com que ocorra presença de cloretos no concreto [1, 3, 7, 8, 10].

Podemos encontrar no interior do concreto os íons cloreto de forma que eles fiquem livres na solução dos poros do concreto, na forma de cloroaluminatos combinados quimicamente e na superfície dos poros de hidratação fisicamente adsorvidos [3]. Os que despassivam o aço são os cloretos livres.

Modelos obtidos em laboratórios na condição de concreto saturado tem apresentado uma estimativa de vida útil inferior a observados em estruturas existentes [4], surge então a necessidade de considerar o GS nos modelos de vida útil do concreto situado em ambientes marítimos.

2.2 Influência do GS na difusão de íons cloretos

Alguns estudos tem sido apresentados utilizando-se de modelos de durabilidade de estruturas de concreto, considerando como um fator de grande importância a influência do GS do concreto sobre a difusão de íons cloreto em estruturas localizadas em ambientes marítimos. GUIMARÃES [4] desenvolveu método de ensaio para avaliar a influência do GS da pasta de cimento endurecido sobre o coeficiente de difusão do cloreto. Esse método só permitiu uma avaliação considerando a primeira lei de Fick, quando na realidade o fenômeno ocorre segundo a segunda lei de Fick (fluxo em regime não permanente). GUIMARÃES [4] salienta que esse ensaio deve sofrer alterações no sentido de poder avaliar esse fator utilizando a segunda lei de Fick.

Trabalho semelhante foi desenvolvido por CLIMENT et al. [2] apontando a necessidade de se medir o coeficiente de difusão de cloreto considerando o percentual de água contido nos poros do concreto. A pesquisa de CLIMENT et al. [2] constituiu de um experimento que submetia a superfície do concreto a introdução de gás da queima do PVC fazendo-se a contaminação do concreto por cloreto. Foi controlada a umidade de exposição dos corpos de prova durante o ensaio e determinou-se o perfil de cloreto através de um intervalo de tempo, obtendo-se o coeficiente correspondente de difusão. O modelo de CLIMENT et al. [2] considerou a contaminação por cloreto com um determinado grau de saturação nunca superior a 80%. Conforme CLIMENT et al. [2] esse ensaio apresentou uma maior penetração de íons

cloreto no estado de gás em corpos de prova de menor GS (difusão do gás de PVC no ar dos poros), dessa forma diminui a diferença entre a quantidade de íons que penetram em corpos de prova saturado e os não saturados, do que se houvesse apenas a penetração de íons cloreto por difusão na solução dos poros.

NIELSEN et al. [11] também propõem um modelo com a finalidade de estimar o coeficiente de difusão em função do GS do concreto submetido a ambientes agressivos como estruturas expostas a água do mar ou sais de degelo. Seu trabalho foi realizado através de medidas de difusão de cloretos em amostras de argamassas e traçado o perfil de cloreto das amostras considerando GS de 53,8%; 59,4%; 81,3% e 100%. A contaminação dos corpos de prova não saturados após obter os GS pré estabelecidos, foi realizado com imersão destas por 2 horas em solução com 26% de NaCl em relação a massa de água após sua superfície seca com secador de cabelo. Os corpos de prova saturados permanecem imersos em solução com 3% de NaCl durante o ensaio. Nesse método de ensaio ocorre que nos corpos de prova não saturados há penetração de cloretos não só por difusão, mas também por capilaridade. Dessa forma, da maneira que ocorreu o ensaio de CLIMENT et al. [2], diminui a diferença entre a quantidade de íons que penetram em corpos de prova saturado e os não saturados, do que se houvesse apenas a penetração de íons cloreto por difusão na solução dos poros.

2.3 Modelo de durabilidade considerando o grau de saturação

Segundo GUIMARÃES [4] o modelo utilizado em sua pesquisa considera a equação baseada na lei de Fick , durante o período de iniciação do modelo TUUTTI e conforme mecanismos clássicos de transporte de massa em materiais porosos.

Os coeficientes de difusão são obtidos pela primeira leis de Fick considerando:

$$J = - \text{Def} \, dC/dx \quad (1)$$

onde:

J : o fluxo de átomos por unidade de área na unidade de tempo (balanço de massa);

Def : coeficiente de difusão efetivo;

dc/dx : gradiente de concentração.

O modelo de GUIMARÃES [4] apresenta a variação da relação dos coeficientes de difusão de pasta não saturada e de pasta saturada ($D/D_{\text{máx}}$) em função do grau de saturação (GS) (Fig. 1).

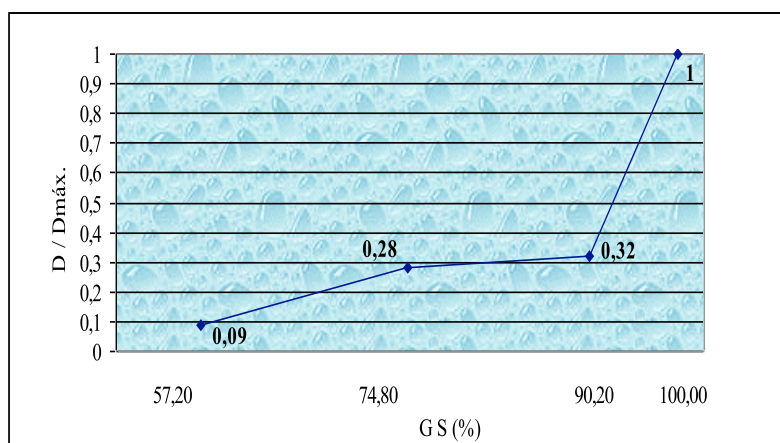


Figura 01 – Variação da relação do coeficiente de difusão de íons cloretos(D/Dmáx) em função da variação do GS [4]

3. ESTUDO DE CASO

3.1 Localização

O meio ambiente da obra pesquisada localiza-se no canal de acesso Rio Grande, o qual está situado em um raio de 500 milhas marítimas (de Buenos Aires à Paranaguá) e é o ponto geográfico central que oferece o maior calado para os navios operarem, 40' de profundidade. Situa-se a 32 graus, 07 minutos e 20 segundos de latitude sul e a 52 graus e 36 segundos de longitude oeste de Greenwich, é o ponto de mar mais meridional do Brasil, localizado a margem oeste do canal do norte, sendo este escoadouro natural de toda a bacia hidrográfica da Lagoa dos Patos.

Este estudo foi realizado em diversos pontos no cais do Terminal de Containers – TECON em Rio Grande. Dessa forma foi possível aplicar os dados obtidos no modelo desenvolvido por GUIMARÃES [4] para ataque de íons cloreto em diversos micro – ambientes.

2 Características do concreto

Conforme GUIMARÃES [4], foram extraídos testemunhos, de acordo com a ASTM C 42-94, sendo considerados diâmetro mínimo de duas vezes o diâmetro máximo do agregado. Submeteu-se estes testemunhos ao Ensaio de absorção capilar com a finalidade de caracterizar o concreto pesquisado conforme a NBR 9779 (1987). O concreto da viga do paramento apresentou resistência média de 23,95 MPa, e a estaca prancha 18,8 MPa, sendo esses valores obtidos durante a execução da obra.

A massa específica seca do concreto da viga do paramento e da laje do cais aos 22 anos de uso foi de 2275 kg/ m³. Nas estacas pranchas a massa específica foi de 2190 kg/ m³.

A absorção capilar no paramento obtido aos 22 anos, foi uma média de 0,216 g/cm² e as médias das estacas pranchas de 0562 g/cm², idade da estrutura na época da pesquisa de GUIMARÃES [4]. A absorção por imersão conforme a NBR 9779 (1987) na viga do paramento foi de 5,28% e na estacas pranchas foi de 7,10% [4].

3.3 Aplicação do modelo de GUIMARÃES [4]

O presente trabalho visa verificar o modelo desenvolvido por GUIMARÃES [4] e medir dois tipos de concretos situados em quadro micro-ambiente. Os pontos estudados situam-se um no paramento da estrutura do cais do TECON e dois nas estacas pranchas do mesmo cais, assim denominas PS, ES e EI (Fig. 2).

Foram utilizadas as seguintes equações desenvolvidas a partir da segunda lei de Fick para prever a vida útil da estrutura simulando para fase do projeto:

$$c_{Cl} = 2. (z) . (D_{const.Cl} . t)^{1/2} \quad (2)$$

onde:

c_{Cl} = : espessura em cm;

$D_{const.Cl}$ - : coeficiente de difusão do concreto, considerado constante, em cm^2/ano ;

t : vida útil, em anos ;

z : valor da função de erro de Gauss,

$$erf(z) = 1 - (C_{cCl} - C_o) / (C_s - C_o). \quad (3)$$

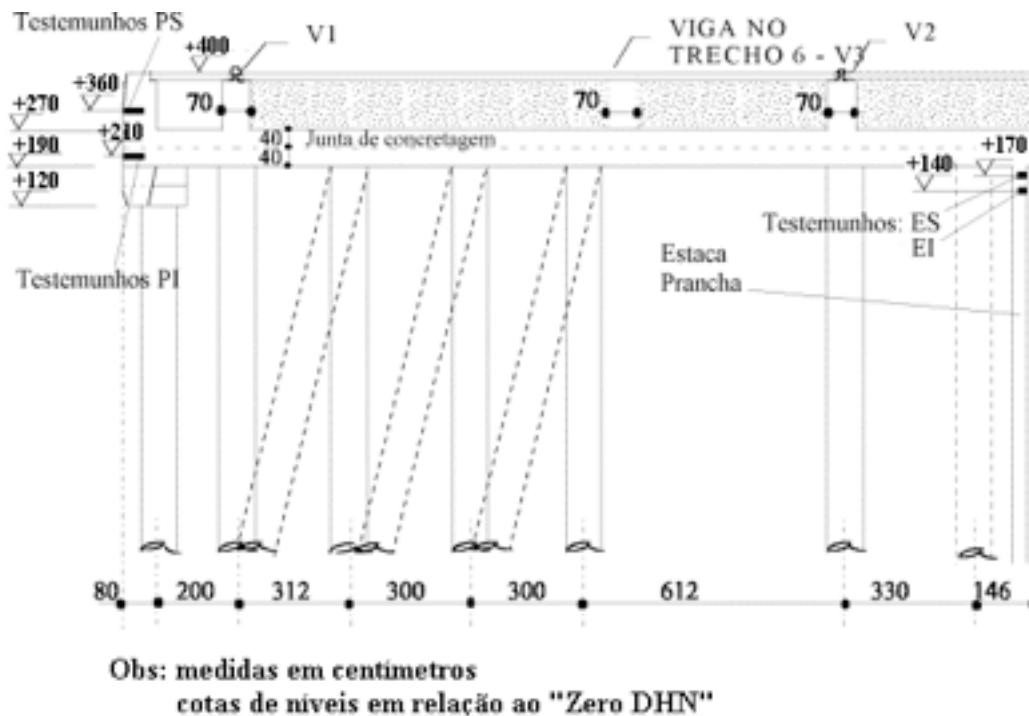


Figura 02 – Pontos pesquisados no cais [4]

Foi calculado por regressão um valor para C_s teórico que define o perfil e considera o tempo da idade da estrutura.

O método de regressão considerando a solução da segunda lei de Fick e obtendo pontos para uma melhor correlação não mostrou-se eficaz para o ponto PI do paramento do cais citado na pesquisa de GUIMARÃES [4]. Portanto esse ponto não foi utilizado nessa pesquisa.

3.3.1 Ponto do paramento - PS

A resistência a compressão (f_{ck}) é de 23,4 MPa . Em dois anos, considerando um aumento de 67%, obteve-se uma resistência média nos dois primeiros anos de 31,2 MPa (C30) e 39,1 MPa (C40) estimada para 20 anos restante da estrutura.

Conforme o ábaco sugerido por HELENE [6], o coeficiente de difusão considerado constante ($D_{const.Cl}$) para concretos C30 e C40 é de $600.10^{-10} cm^2.s^{-1}$ e $316. 10^{-10} cm^2.s^{-1}$ respectivamente, sendo considerado C_s de 1,2% C_o de 0,02%, C_{cCl} de 0,30%. Considerando os dois primeiros anos o concreto da classe C30 e de 2 a 22 anos da classe C40, obtém-se uma média ponderada do coeficiente de difusão de $342.10^{-10} cm^2.s^{-1}$.

Utilizando o perfil de cloretos medidos foram calculados por regressão, as curvas teóricas com a finalidade de obter a concentração teórica de cloretos na superfície do elemento estrutural (C_s teórico).

No ponto PS do TECON obteve-se C_s teórico = 1,71 %/ massa cim.; $(D_{const} \cdot t)^{1/2} = 14,53$; para uma correlação (R^2) de 0,9864.

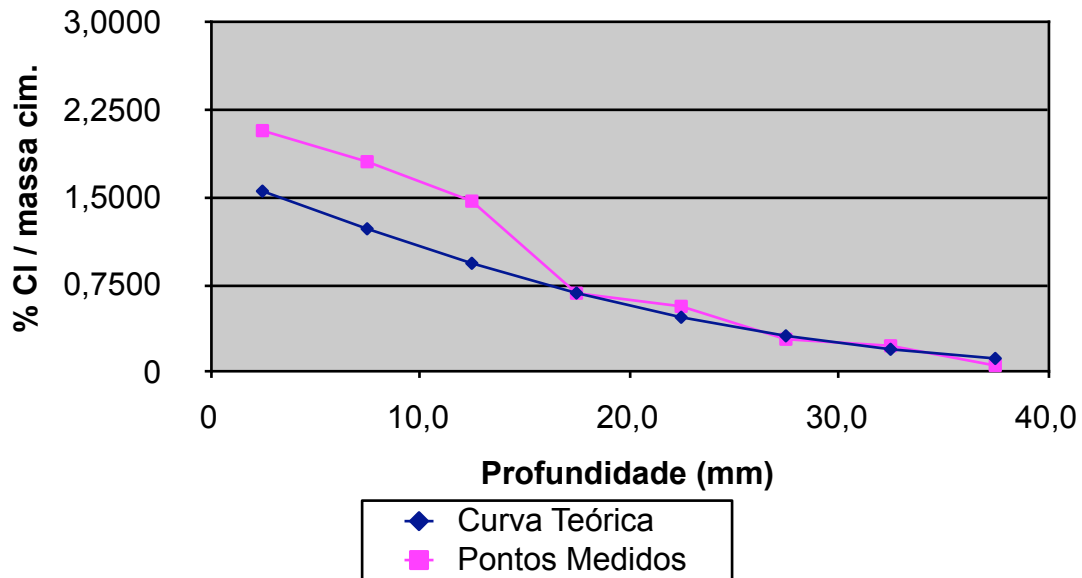


Figura 03 – Perfil de valores medidos e valores teóricos da profundidades de ataque de cloretos no Ponto PS – C_s teórico = 1,71 %/ massa cim.; $(D_{const} \cdot t)^{1/2} = 14,53$ mm.

Cálculo do coeficiente de penetração de cloreto considerando a curva teórica

Considerando a curva teórica dos valores medidos e uma frente de contaminação que provoca a despassivação do aço de 0,4% em relação ao cimento, obtém-se o valor de K para no modelo $c_{Cl} = K (t)^{1/2}$.

Considerando:

$t = 22$ anos;

$(D_{const} \cdot t)^{1/2} = 14,53$ mm; obtemos:

$D_{const} = 9,60 \text{ mm}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$

Conforme a segunda lei de Fick, para:

$C_{cCl} = 0,4\%$ - concentração de cloretos na profundidade c_{Cl} , no tempo t ;

$C_0 = \text{zero}$ - concentração inicial de cloretos no interior do concreto do componente estrutural;

$C_s = 1,71 \%$ - concentração teórica de cloretos na superfície do elemento estrutural, admitida constante;

obtém-se $\text{erf}(z) = 0,7661$ e portanto $z = 0,84$. Logo

$$c_{Cl(PS)} = 2 \cdot (0,84) \cdot (9,60 \text{ mm}^2 \cdot \text{ano}^{-1} \cdot t)^{1/2}$$

$$c_{Cl(OS)} = 5,20 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2} \cdot (t)^{1/2}$$

Logo, obtém-se K_{reg} , que é o coeficiente de penetração de cloretos, considerando a curva teórica obtida pela regressão dos pontos medidos.

$$K_{reg.} = 5,20 \text{ mm. ano}^{-1/2}$$

Cálculo do coeficiente de penetração de cloretos considerando o coeficiente de difusão medido em laboratório e os fatores de influência na difusão de íons cloreto – Modelo de GUIMARÃES [4]

Utilizando a solução da segunda lei de Fick:

$$c_{Cl} = 2 \cdot (z) \cdot (D_{const.Cl} \cdot t)^{1/2} \quad \text{onde:}$$

$$\text{erf}(z) = 1 - (C_{Cl} - C_0) / (C_s - C_0).$$

GUIMARÃES [4] considera a influência do tipo de cimento, da temperatura média anual, do grau de saturação e da posição da superfície de ataque em relação a superfície de concretagem sobre o coeficiente de difusão do cloreto aplicando coeficientes de redução R_C , R_T , R_{GS} , R_{SC} respectivamente:

$$D_{const.Cl} (ef) = D_{const.Cl} (lab.) \cdot R_C \cdot R_T \cdot R_{GS} \cdot R_{SC} \quad \text{sendo:}$$

(4)

$D_{const.Cl} (ef)$ – coeficiente de difusão considerando as condições de exposição no micro ambiente;

$D_{const.Cl} (lab.)$ – coeficiente de difusão obtido em laboratório na condição de concreto saturado (GS = 100%).

Conforme alguns pesquisadores [6] [9] a adição de cinza volante provoca uma redução de 20% na profundidade de penetração da frente de ataque de cloretos, equivalente a uma redução do coeficiente de difusão de 36%.

O concreto do TECON foi executado com cimento Pozolânico, logo o grau de redução do coeficiente de difusão devido ao tipo de cimento (R_C) é de 0,64.

A influência da temperatura é obtida pela equação de Arrhenius:

$$D_T = D_{T_0} \cdot e^{-k \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad \text{onde:}$$

D_T = difusividade efetiva à temperatura T ;

D_{T_0} = difusividade efetiva à temperatura T_0 ;

k = constante da reação; T, T_0 = temperaturas em K.

PAGE et al.[12] realizaram ensaios de difusão de cloretos com variação da temperatura. Com os resultados dos ensaios obtém-se valores de k 5511,5 e 4766,6 para relação a/c de 0,5 e 0,4 respectivamente. Considerando o valor a/c de 0,44 médio de k , obtém-se k de 5139. É considerado a temperatura T_0 de 22,5°C e a temperatura média por estação do ano, obtendo

um coeficiente médio anual de diminuição do coeficiente de difusão (R_T), conforme Tabela 01.

Os valores médios de temperatura foram calculados com valores de temperatura diária dos anos de 1988 até o ano de 1998, conforme dados da Fundação Universidade do Rio Grande-Instituto Nacional de Meteorologia-8º Distrito, RS, Brasil.

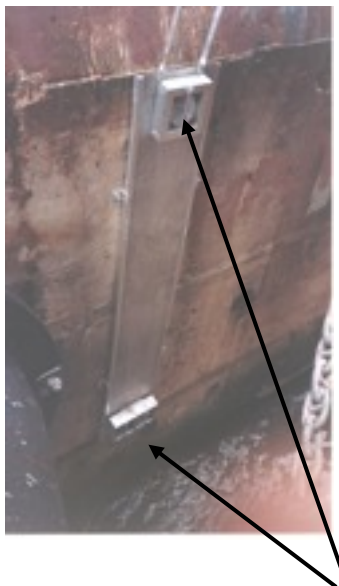
Durante o ano de 2002/2003 foram medidas as variações do GS nas estruturas pesquisadas do TECON (Fig. 04).

Tabela 01 – Valores médios de R_T

T ₀ = 22,5 oC = 295,5 K				Média
k = 5139				
Meses	Ti (°C)	Ti(K)	R _T *	0,81
Verão	23,4	296,4	1,05	
Outono	16,46	289,46	0,70	
Inverno	14,37	287,37	0,61	
Primavera	20,33	293,33	0,88	

$$*R_T = e^{-k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

(a)



(b)



Corpos de Prova

Figura 04 – Pontos pesquisados no cais – a) Pontos PS e PI ; b) Pontos PS e PI

O coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido à variação do GS (R_{GS}) é calculado através do gráfico da Fig. 1 (modelo de GUIMARÃES [4]) para GS's médios

medidos durante as quatro estações, utilizando a relação entre os valores obtidos. Os resultados são apresentados na Tabela 02.

Tabela 02 - Valores médios de R_{GS}

Estação	GS médio (%)	R_{GS}	R_{GS} médio
Verão	72,15	0,25	0,273
Outono	74,93	0,28	
Inverno	75,45	0,28	
Primavera	75,24	0,28	

Conforme GUIMARÃES et al. [5], o coeficiente de redução em função da diferença posição da superfície exposta em relação a concretagem (R_{sc}) é calculado com média de quatro valores de carga passante (ASTM C1202, 1994), considerando que a superfície exposta é lateral em relação a superfície de concretagem:

$$R_{sc} = (1937/2653 + 1937/2776,5 + 2580/3366 + 2580/3299,5)/4$$

$$R_{sc} = 0,74$$

Assim calcula-se o coeficiente de difusão efetivo considerando as condições do concreto do elemento estrutural e o tipo de cimento utilizado, em função do coeficiente de difusão obtido em laboratório:

$$D_{const.Cl-(ef)} = 342 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,64 \cdot 0,81 \cdot 0,273 \cdot 0,74 = 35,82 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Para:

$$C_s = 1,71\%$$

$$C_{Cl} = 0,4\%$$

obtém-se

$$\text{erf}(z) = 0,7661$$

Portanto:

$$z = 0,84$$

$$c_{Cl} = 2 \cdot (0,84) \cdot (35,82 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot t)^{1/2}$$

$$c_{Cl} = (5,65 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}) \cdot (t)^{1/2}$$

Logo, obtém-se K_{modelo} , que é o coeficiente de penetração de cloretos considerando o modelo.

$$K_{\text{modelo}} = 5,65 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$$

Avaliação do modelo

Observa-se que o valor de $5,65 \text{ mm. ano}^{-1/2}$ corresponde ao coeficiente de penetração de íons cloretos, e que para esse mesmo ponto PS o coeficiente de penetração de íons cloretos calculado a partir do perfil teórico obtido com os teores medidos neste trabalho é de $5,20 \text{ mm.ano}^{-1/2}$. Logo, os valores apresentam uma diferença de 8,6%.

Não considerando a variação do grau de saturação e posição da superfície exposta em relação a superfície de concretagem (R_{sc}), teremos a diferença de 141,7% devido o coeficiente de penetração de cloreto ser de $12,57 \text{ mm.ano}^{-1/2}$. Não considerando apenas o GS (grau de saturação) a diferença é de 107,9% (Fig. 5).

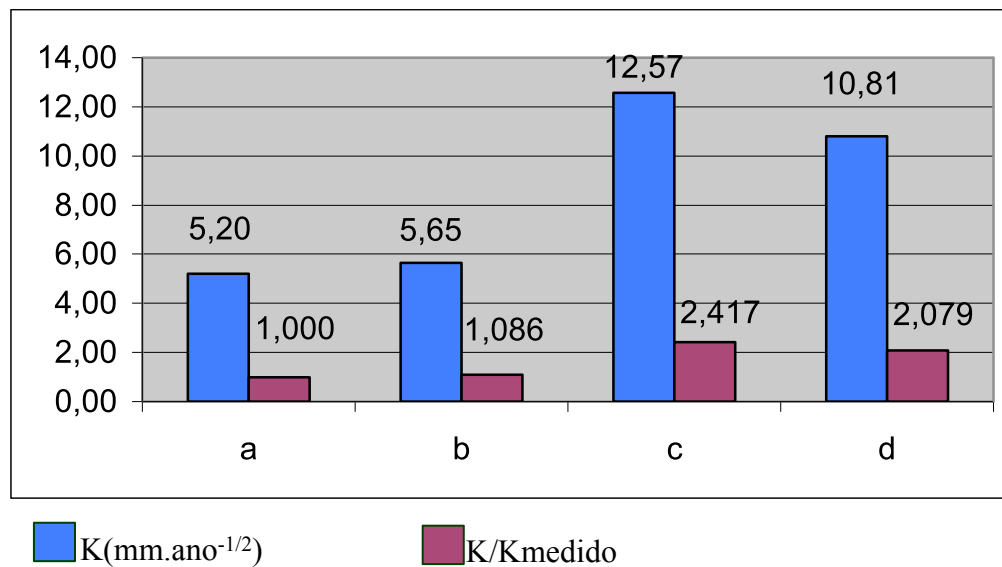


Figura 05 - Coeficiente de penetração de íons cloretos – $K(\text{mm.ano}^{-1/2})$ – Ponto PS – a) Medido: obtido através da curva teórica por regressão; b) Modelo: considerando o modelo com os fatores (f_{ck} – variação da resistência; Cimento – tipo de cimento; T – variação da temperatura; GS – variação 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

2. Ponto da estaca prancha – ES

A resistência a compressão (f_{ck}) é de 18,8 MPa. Em dois anos considerando um aumento de 67% obtendo uma resistência média de 28 dias a dois anos de 25,10 MPa (C25) e uma resistência de 2 anos a 22 anos de 31,4 MPa (C30).

Conforme o ábaco sugerido por HELENE [6], o coeficiente de difusão considerado constante (D_{constCl^-}) para concretos C25 e C30 é de $705.10^{-10} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ e $600.10^{-10} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ respectivamente, sendo considerado C_s de 1,2% C_o de 0,02%, C_{CCI} de 0,30%. Considerando os dois primeiros anos o concreto da classe C25 e a resistência de 2 a 22 anos da classe de C30 obtém-se uma média ponderada do coeficiente de difusão de $610.10^{-10} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$.

Utilizando o perfil de cloretos medidos foram calculados por regressão, as curvas teóricas com a finalidade de obter a concentração teórica de cloretos na superfície do elemento estrutural (C_s teórico).

No ponto ES do TECON obteve-se C_s teórico = 6,22 %/ massa cim.; $(D_{\text{const}} \cdot t)^{1/2} = 15,13$ mm e correlação (R^2) de 0,9966.

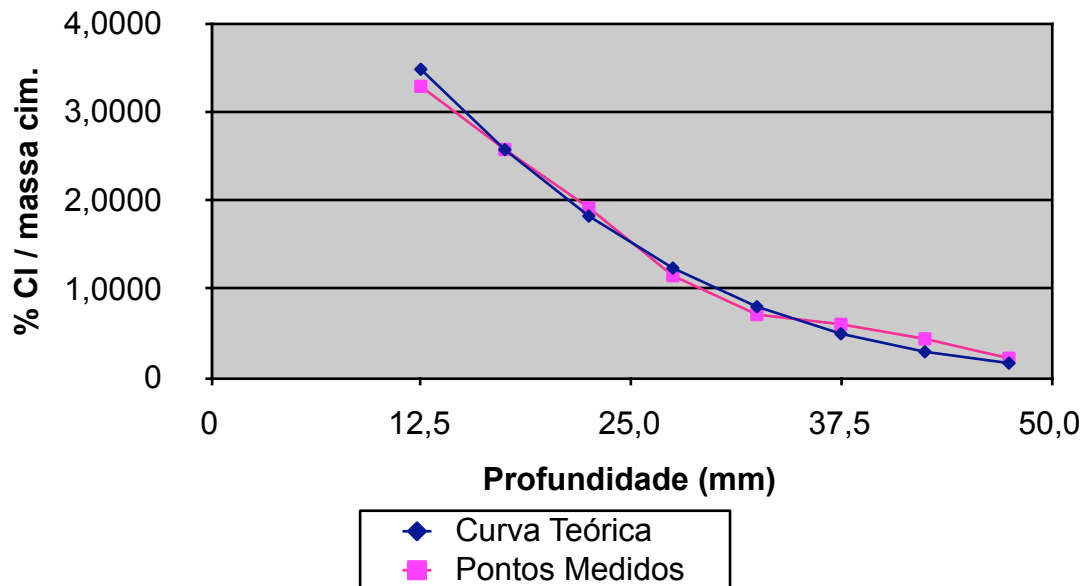


Figura 06 – Perfil de valores medidos e valores teóricos da profundidade de ataque de cloretos no Ponto ES - C_s teórico = 6,22 %/ massa cim.; $(D_{\text{const}} \cdot t)^{1/2} = 15,13$ mm..

Cálculo do coeficiente de penetração de cloreto considerando a curva teórica

Considerando a curva teórica dos valores medidos e uma frente de contaminação que provoca a despassivação do aço de 0,4%, obtém-se o valor de K para no modelo $c_{Cl} = K (t)^{1/2}$.

Considerando:

$t = 22$ anos;

$(D_{\text{const}} \cdot t)^{1/2} = 15,13$ mm; obtemos:

$D_{\text{const}} = 10,40 \text{ mm}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$

Conforme a segunda lei de Fick, para:

$C_{Cl} = 0,4\%$ - concentração de cloretos na profundidade c_{Cl} , no tempo t ;
 $C_0 = \text{zero}$ - concentração inicial de cloretos no interior do concreto do componente estrutural;
 $C_s = 6,22\%$ - concentração teórica de cloretos na superfície do elemento estrutural, admitida constante;

Portanto pela equação (3) obtemos:

$$\text{erf}(z) = 0,9357 \text{ e obtém-se } z = 1,31 \text{ e}$$

$$c_{Cl(PS)} = 2 \cdot (1,31) \cdot (10,40 \text{ mm}^2 \cdot \text{ano}^{-1} \cdot t)^{1/2}$$

$$c_{Cl} = 8,45 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2} \cdot (t)^{1/2}$$

Logo, obtém-se um coeficiente de penetração de cloretos de:

$$K_{\text{reg.}} = 8,45 \text{ ano}^{-1/2}$$

Cálculo do coeficiente de penetração de cloretos considerando o coeficiente de difusão medido em laboratório e os fatores de influência – Modelo de GUIMARÃES [4]

GUIMARÃES [4] considera a influência do tipo de cimento, da temperatura média anual, do grau de saturação e da posição da superfície de ataque em relação à superfície de concretagem sobre o coeficiente de difusão aplicando coeficientes de redução R_C , R_T , R_{GS} , R_{SC} respectivamente:

Para utilização da equação (3) são calculados os coeficientes de redução R_C, R_T, R_{GS} e R_{SC} .

O coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido ao tipo de cimento (R_C) é de 0,64, pois o concreto foi executado com cimento Pozolânico, conforme GUIMARÃES [4].

A influência da variação da temperatura é calculada interpolando os valores de k de para valores de relação a/c citados por PAGE et al. [12] em função do valor da relação a/c dos pontos ES e EI. Obteve-se para o ponto ES o valor de R_T igual a 0,82.

Tabela 03 – Valores médios de R_T

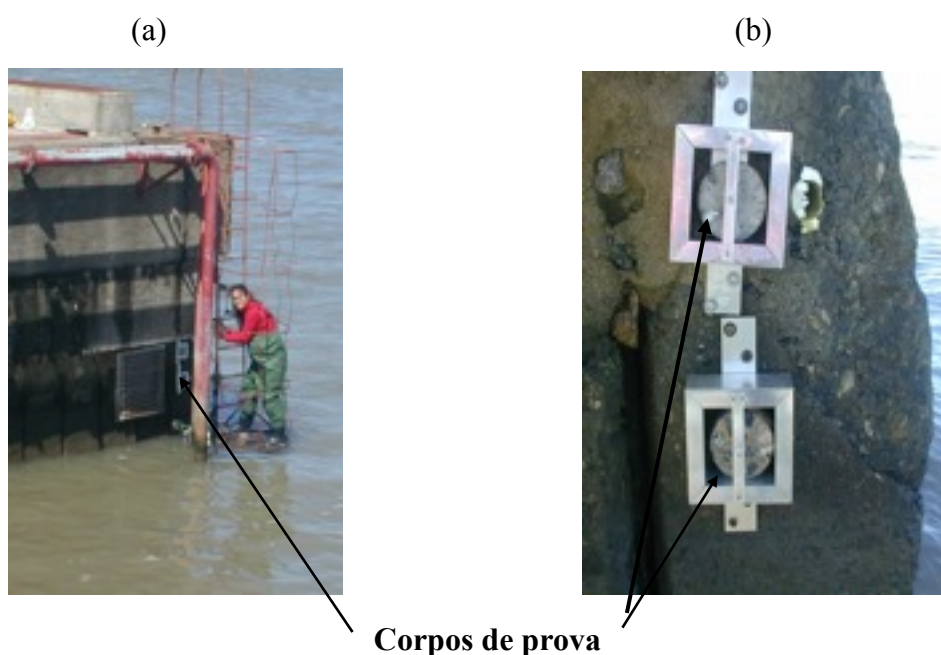
To = 22,5 oC = 295,5 K				Média
k = 4766				
Meses	Ti (°C)	Ti (K)	R_T^*	0,82
Verão	23,4	296,4	1,05	
Outono	16,46	289,46	0,71	
Inverno	14,37	287,37	0,63	
Primavera	20,33	293,33	0,89	

$$*R_T = e^{-k \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Utilizando o modelo de GUIMARÃES [4] (Fig. 1), o coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido a variação do GS (R_{GS}) é calculado para GS's médios medidos durante as quatro estações (Fig. 7). Os resultados são apresentados na Tabela 04.

Tabela 04 - Valores médios de R_{GS}

Estação	GS médio (%)	R_{GS}	R_{GS} médio
Verão	60,25	0,12	0,225
Outono	65,09	0,17	
Inverno	88,27	0,31	
Primavera	83,95	0,30	



Corpos de prova

Figura 07 - Pontos pesquisados no cais – a) Pontos ES e EI; b) Pontos ES e EI

Conforme GUIMARÃES et al. [5], o coeficiente de redução em função da diferença posição da superfície exposta em relação a concretagem (R_{sc}) é calculado com média de quatro valores de carga passante (ASTM C1202, 1994), considerando que a superfície exposta é lateral em relação à superfície de concretagem:

$$R_{sc} = [((3058+2194)/(2998+2555)) + ((3022+3924)/(3360+3239))]/2 = (0,95 + 1,05)/2 = 1,0$$

Assim calcula-se pela equação (3) o coeficiente de difusão efetivo considerando as condições do concreto do elemento estrutural e o tipo de cimento utilizado, em função do

coeficiente de difusão obtido em laboratório para concreto executado com cimento Portland comum:

$$D_{\text{const.Cl}^- (\text{ef})} = 610 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,64 \cdot 0,82 \cdot 0,225 \cdot 1 = 72,03 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Para $C_S = 6,22\%$ e $C_{\text{ccI}} = 0,4\%$ obtém-se $\text{erf}(z) = 0,9357$

Portanto:

$$z = 1,31$$

$$c_{\text{Cl}} = 2 \cdot (1,31) \cdot (72,03 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot t)^{1/2}$$

$$c_{\text{Cl}} = (12,49 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}) \cdot (t)^{1/2}$$

Logo, obtém-se K_{modelo} , que é o coeficiente de penetração de cloretos considerando o modelo.

$$K_{\text{modelo}} = 12,49 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$$

Avaliação do modelo

Observa-se que o valor de $12,49 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$ corresponde ao coeficiente de penetração de íons cloreto, e que para esse mesmo ponto ES o coeficiente de penetração de íons cloreto calculado por regressão dos pontos medidos é de $8,45 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$. Logo, os valores apresentam uma diferença de $47,8\%$ no ponto da estaca prancha ES.

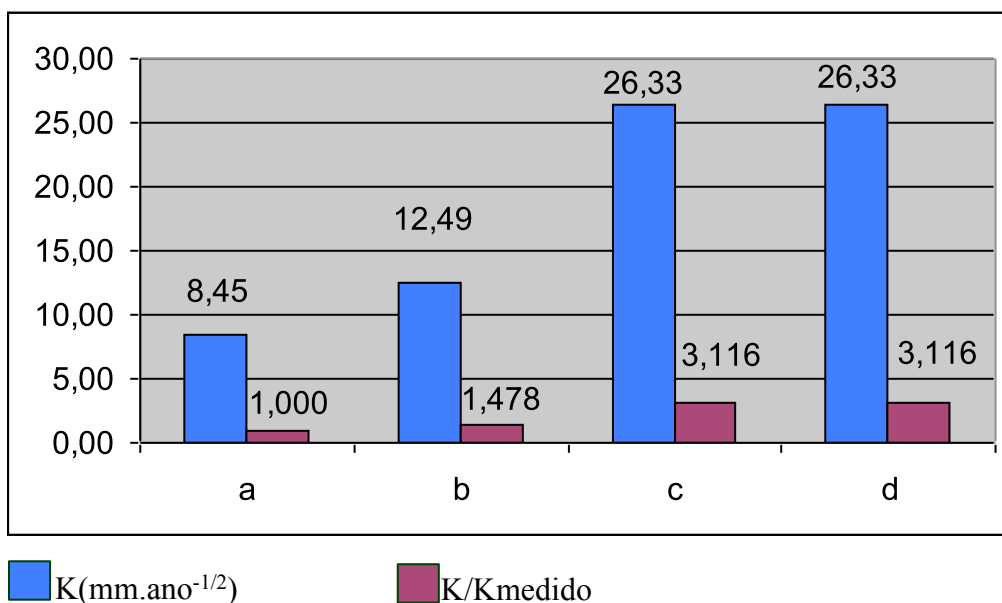


Figura 08 - Coeficiente de penetração de íons cloretos – Ponto ES – a) Medido: obtido através da curva teórica por regressão; b) Modelo: considerando o modelo com os fatores (f_{ck} –

variação da resistência; Cimento – tipo de cimento; T – variação da temperatura; GS – variação do Grau de saturação; SE – posição da superfície exposta a superfície de concretagem); c) Não considerando SE e GS; d) Não considerando somente GS

Não considerando a variação do grau de saturação e posição da superfície exposta em relação à superfície de concretagem (R_{sc}), teremos a diferença de 211,6% devido ao coeficiente de penetração de cloreto ser de $26,33 \text{ mm.ano}^{-1/2}$. Não considerando apenas o GS (grau de saturação) a diferença também é de 211,6% (Fig. 08).

3.3.3. Ponto da estaca prancha – EI

Sendo o concreto no ponto EI igual ao do ponto ES utiliza-se o mesmo coeficiente de difusão de laboratório, igual a $610 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Conforme GUIMARÃES [4], o ponto EI apresenta o perfil de penetração de íons cloreto mostrado na Fig. 09.

No ponto EI do TECON obtém-se por regressão C_s teórico = 2,37 %/ massa cim.; $(D_{\text{const}} \cdot t)^{1/2} = 17,69 \text{ mm}$ e correlação (R^2) de 0,9575.

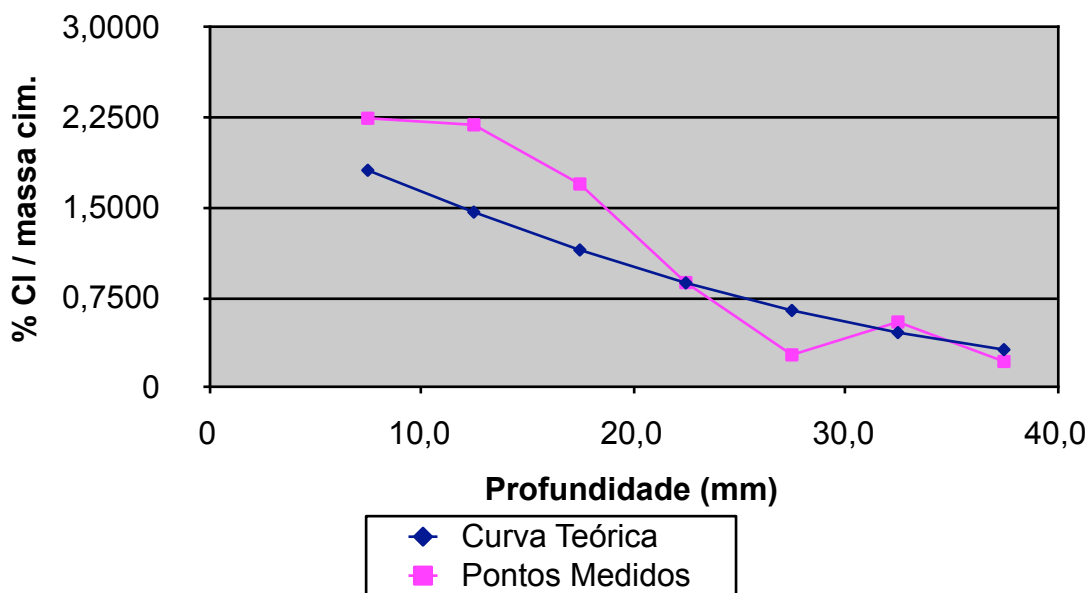


Figura 09 – Perfil de valores medidos e valores teóricos da profundidades de ataque de cloretos no Ponto EI - C_s teórico = 2,37%/ massa cim.; $(D_{\text{const}} \cdot t)^{1/2} = 17,69 \text{ mm}$

Cálculo do coeficiente de penetração de cloreto considerando a curva teórica

Considerando a curva teórica dos valores medidos e uma frente de contaminação que provoca a despassivação do aço de 0,4%, obteremos o valor de K para no modelo $c_{Cl} = K (t)^{1/2}$.

Considerando:

$t = 22$ anos;

$(D_{const} \cdot t)^{1/2} = 17,69$ mm; obtemos:

$D_{const} = 14,22$ mm².ano⁻¹

para:

$C_{cCl} = 0,4\%$ - concentração de cloretos na profundidade c_{Cl} , no tempo t ;

$C_0 = \text{zero}$ - concentração inicial de cloretos no interior do concreto do componente estrutural;

$C_S = 2,37\%$ - concentração teórica de cloretos na superfície do elemento estrutural, admitida constante;

obtém-se $\text{erf}(z) = 0,8312$ e $z = 0,97$

Portanto:

$c_{Cl(PS)} = 2 \cdot (0,97) \cdot (14,22 \text{ mm}^2 \cdot \text{ano}^{-1} \cdot t)^{1/2}$

$c_{Cl} = 7,32 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2} \cdot (t)^{1/2}$

Logo, obtém-se um coeficiente de penetração de cloretos de:

$K_{reg.} = 7,32 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$

Cálculo do coeficiente de penetração de cloretos considerando o coeficiente de difusão medido em laboratório e os fatores de influência

O valor de R_C é igual ao ponto ES, ou seja, igual a 0,64.

Considerando mesmo concreto do ponto ES, conforme Tabela 03, obtém-se o valor para R_T igual a 0,82.

Utilizando o modelo de GUIMARÃES [4], o coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido a variação do GS (R_{GS}) é calculado para GS's médios medidos durante as quatro estações. Os resultados são apresentados na Tabela 05.

Tabela 05 - Valores médios de R_{GS}

Estação	GS médio (%)	R_{GS}	R_{GS} médio
Verão	76,22	0,28	0,295
Outono	76,08	0,28	

Inverno	88,87	0,32
Primavera	84,07	0,30

O coeficiente de redução em função da diferença posição da superfície exposta em relação a concretagem (R_{sc}) é o mesmo do ponto ES, ou seja, igual a 1,0.

Assim calcula-se o coeficiente de difusão efetivo considerando as condições do concreto do elemento estrutural e o tipo de cimento utilizado, em função do coeficiente de difusão obtido em laboratório para concreto executado com cimento Portland comum (equação 4):

$$D_{const.Cl-(ef)} = 610 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,64 \cdot 0,82 \cdot 0,295 \cdot 1 = 94,44 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Para $C_s = 2,37\%$ e $C_{cCl} = 0,4\%$ obtém-se $\text{erf}(z) = 0,8312$ e $z = 0,97$

Portanto:

$$c_{Cl} = 2 \cdot (0,97) \cdot (94,44 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot t)^{1/2}$$

$$c_{Cl} = (10,59 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}) \cdot (t)^{1/2}$$

Logo, obtém-se K_{modelo} , que é o coeficiente de penetração de cloretos considerando o modelo.

$$K_{\text{modelo}} = 10,59 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$$

Avaliação do modelo

Observa-se que o valor de $10,59 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$ corresponde ao coeficiente de penetração de íons cloreto, e que para esse mesmo ponto EI o coeficiente de penetração de íons cloreto calculado a partir do perfil obtido por regressão neste trabalho é de $7,32 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$. Logo, os valores apresentam uma diferença de 44,7 % no ponto da estaca prancha EI.

Não considerando a variação do grau de saturação e posição da superfície exposta em relação à superfície de concretagem (R_{sc}), teremos a diferença de 166,4% devido o coeficiente de penetração de cloreto ser de $19,50 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$. Não considerando apenas o GS (grau de saturação) a diferença também é de 166,4% (Figura 10).

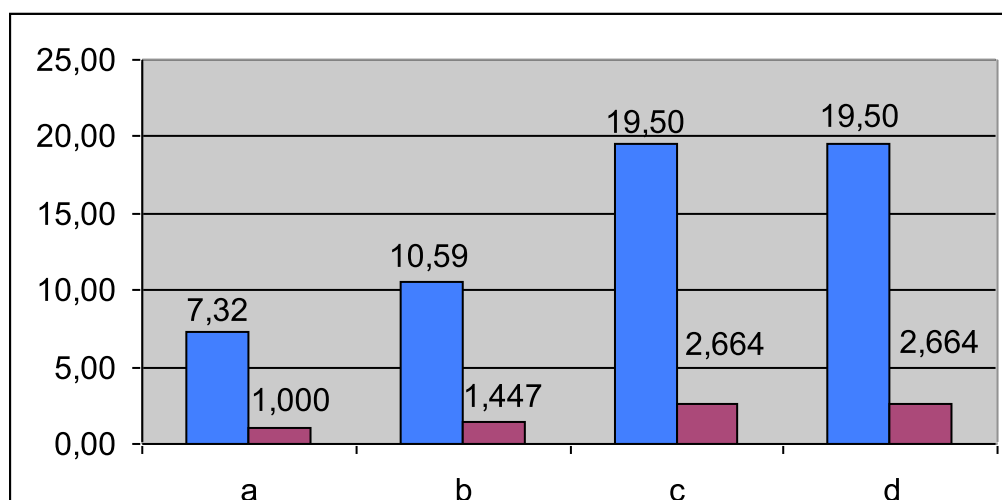


Figura 10- Coeficiente de penetração de íons cloretos – $K(\text{mm.ano}^{-1/2})$ – Ponto EI - a)Medido: obtido através da curva teórica por regressão;b)Modelo: considerando o modelo com os fatores (fck – variação da resistência; Cimento – tipo de cimento; T – variação da temperatura; GS – variação do Grau de saturação; SE – posição da superfície exposta a superfície de concretagem);c) Não considerando SE e GS; d)Não considerando somente GS

4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para os todos os pontos pesquisados (PS, EI e ES) o modelo apresentou uma grande redução na estimativa da profundidade de ataque quando considerado os fatores grau de saturação (GS) e posição da superfície exposta em relação a superfície de concretagem (SE), sendo que o GS apresentou uma influência bem maior.

5. CONCLUSÕES

Através da estrutura pesquisa foi observado que utilizando o modelo apresentado por GUIMARÃES [4] obteve-se uma significativa melhora na precisão quanto da consideração do GS do concreto, comprovando que o grau de saturação (GS) é um importante fator no processo de difusão de íons cloreto, portanto é fundamental sua consideração nos modelos de penetração de íons cloreto em ambiente marítimo. Salienta-se que o modelo foi utilizado em concretos com mesmo tipo de cimento mas em três micros ambientes diferentes.

Esse estudo deve ter continuidade verificando a influência do GS sobre a difusão de íons cloreto em diversos tipos e traços de concreto.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FPESP pelo apoio indispensável a realização desta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

1. ANDRADE, M. C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Trad. e Adap. de Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini, 1992.
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. FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P.R.L. **Assim caminha a corrosão**. *Téchne*, v.10, p. 28-33, maio/jun. São Paulo, Pini, 1994.
4. GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. São Paulo, 2000. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo - PCC/USP, Engenharia Civil.
5. GUIMARÃES, A.T.C.; TULA, L.; HELENE, P.R.L. Performance of surface concrete elements. In: II INTERNATINAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE

CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, Gramado, 1999. **Anais**. CD

6. HELENE, P. R. L. **Contribuição à normalização: A resistência sob carga mantida e a idade de estimativa da resistência característica; Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado**. São Paulo, 1994. (Monografias. EPUSP).
7. HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese (Livre Docente), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.
8. HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo, Pini, 1986.
9. ISAIA, G.C.; HELENE, P.R.L. Durabilidade de concreto de alto desempenho com pozolanas. In: SEMINÁRIO NORIE-UFRGS: QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, Porto Alegre, 1993. **Anais**. Porto Alegre, s.ed., dez. 1993.p. 13-33.
10. MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, Pini, 1994.
11. NIELSEN, E.P.; GEIKER, M. R. **Chloride diffusion in partially saturated cementitious material**. *Cement and Concrete Research*, v 33, p. 133-138, 2003.
12. PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. **Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes**. *Cement and Concrete Research*, v.11, p.395-406, USA, Pergamon Press, Lt, jan..1981.