

Penetração de cloretos em estruturas com secagem e molhagem em zona de névoa

Roger Castagno Jr¹, André. T. C. Guimarães² & Paulo R. L. Helene³

¹Mestrando do Curso de Engenharia Oceânica – FURG, Rio Grande, RS – castagno@terra.com

²Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – atcg@mikrus.com.br

³Departamento de Construção Civil PCC/USP, São Paulo, SP – helene@pcc.usp.br

RESUMO: GUIMARÃES [3] obteve em sua pesquisa modelo da influência do grau de saturação (GS) do concreto sobre a difusão de íons cloreto, e desenvolveu método para medir o GS em estruturas de concreto em serviço. Nesse trabalho são aplicados estes conhecimentos em uma estrutura de concreto, localizada em ambiente marítimo. Após é comparada a previsão de profundidade de ataque na idade referente a data dessa pesquisa, obtida com o modelo proposto por GUIMARÃES [3], com a profundidade de ataque real, obtida por perfil de penetração de íons cloreto na mesma data, sendo assim verificada a precisão do modelo. Na estrutura pesquisada, observou-se uma grande melhora na precisão da estimativa da profundidade de ataque por cloretos, quando considerado o GS do concreto no modelo desenvolvido por GUIMARÃES [3], sendo que este fator apresenta uma grande influência sobre o coeficiente de difusão dos íons cloreto.

PALAVRAS-CHAVE: durabilidade, cloreto, vida útil, concreto

1. INTRODUÇÃO

Algumas pesquisas realizadas nos últimos anos [2, 3, 6] demonstram uma significativa influência do grau de saturação do concreto na penetração de íons cloreto.

GUIMARÃES [3] obteve em sua pesquisa modelo da influência desse fator sobre a difusão de íons cloreto, correlacionando a variação do coeficiente de difusão com a variação do GS em relação ao coeficiente de difusão máximo que ocorre para GS de 100%, conforme Figura 01.

GUIMARÃES [3] também desenvolveu método para medir o GS em estruturas de concreto em serviço.

Nesse trabalho são aplicados estes conhecimentos em uma estrutura de concreto, localizada em ambiente marítimo. Após são comparadas a previsão de profundidade de ataque na idade referente a data dessa pesquisa, obtida com o modelo proposto por GUIMARÃES [3], com a profundidade de ataque real, obtida por perfil de penetração de íons cloreto na mesma data, sendo assim verificada a precisão do modelo.

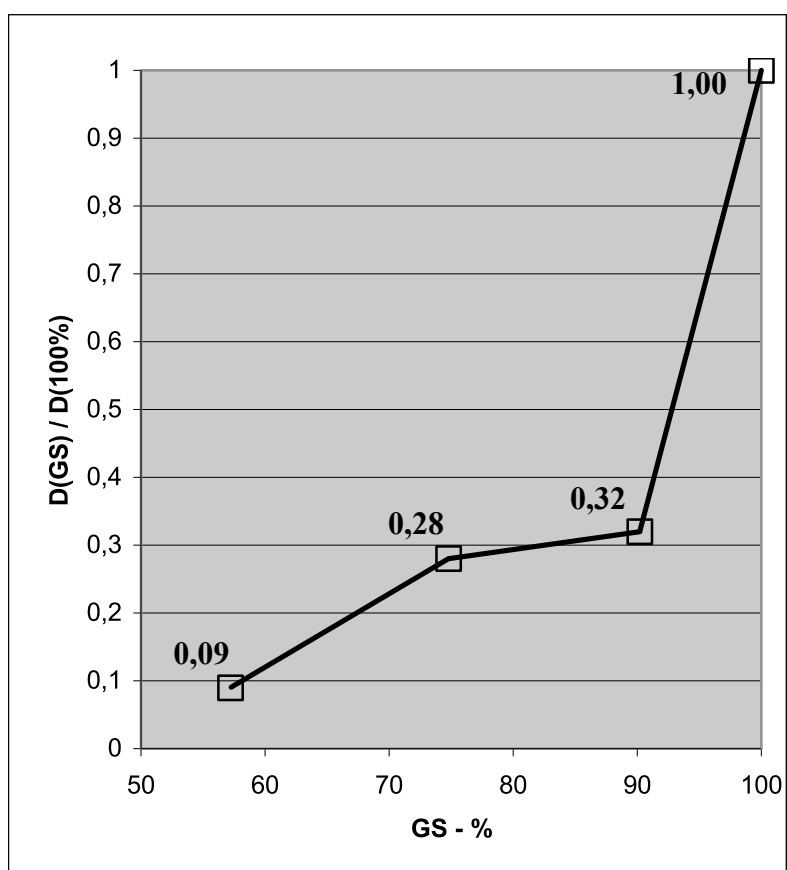


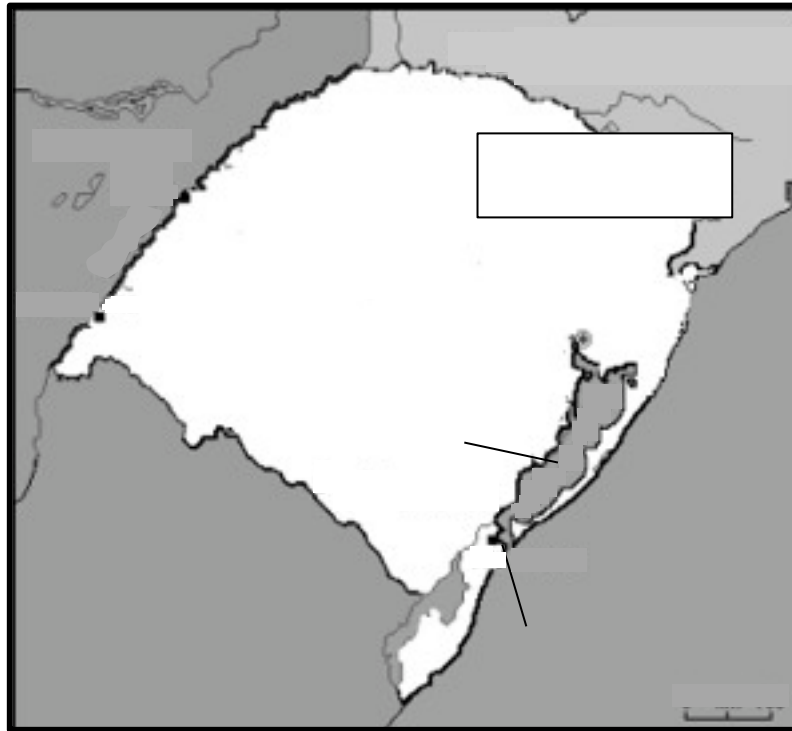
Figura 01 – Curva de influência do grau de saturação (GS) do concreto sobre o coeficiente de difusão de íons cloreto [3]

2. ESTUDO DE CASO

2.1. Meio ambiente

O elemento estrutural utilizado nesta pesquisa é a torre de telecomunicações de concreto armado localizada na Praça Tamandaré da cidade do Rio Grande (Figuras 02/03).

A torre possui 62 metros de altura de forma cilíndrica, com acesso ao topo por escada interna.(Figura 04). Foram pesquisados quatro pontos a 40 metros de altura situados ao norte, sul, leste e oeste da torre.



0 km 100

Figura 02 – Localização da cidade do Rio Grande

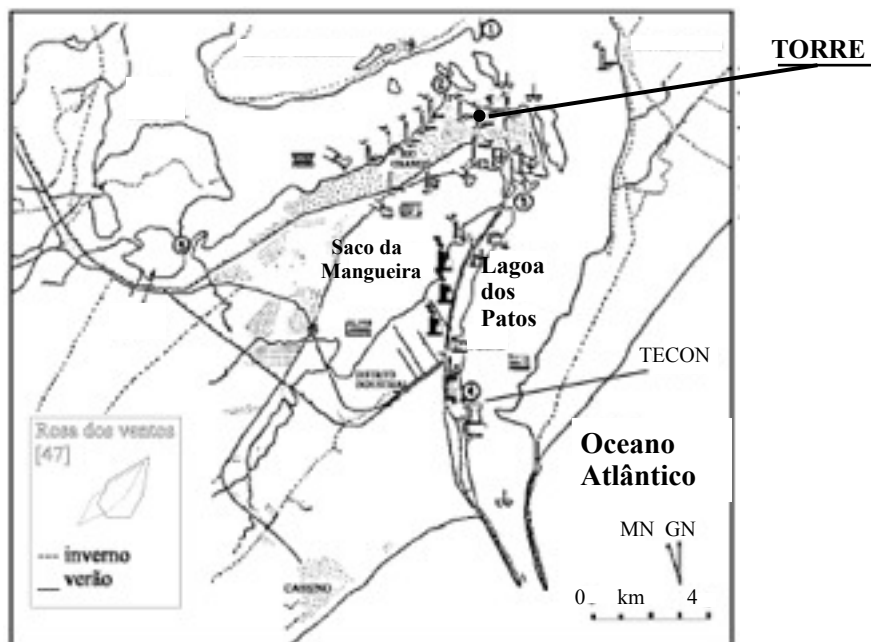


Figura 03 – Localização da Torre de telecomunicações

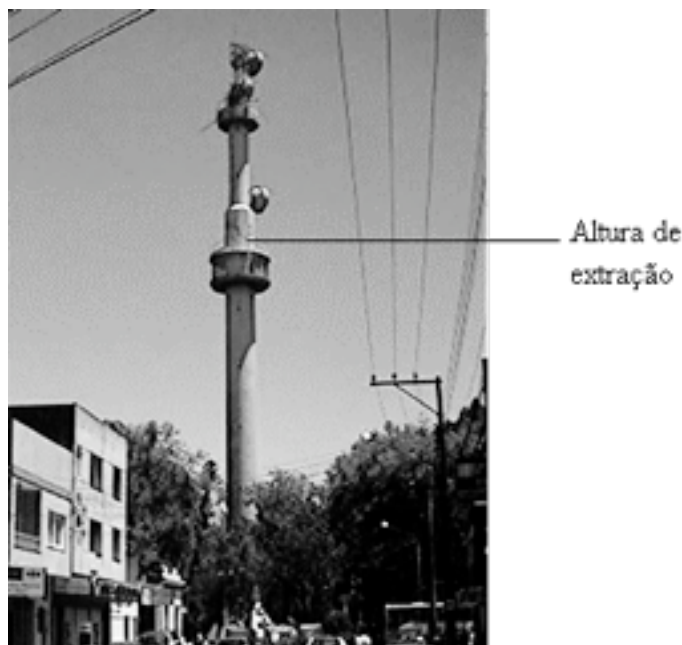


Figura 04 – Torre de telecomunicações.

2.2. Características do concreto

Foram extraídos testemunhos, conforme ASTM C 42-94 - Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete, e realizados ensaios de caracterização, além dos dados obtidos em relatórios de execução da obra.

O concreto da estrutura foi executado com sistema de fôrmas deslizantes utilizando cimento Portland comum. A resistência a compressão de projeto é de 15 MPa e a estimada com a extração de testemunhos é de 25,4 MPa aos 30 anos (idade da extração) e 21,2 MPa aos 28 dias (conforme NBR 7680-83 - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto). Com 30 anos de uso apresentou massa específica de 2345 kg/m³ e absorção por imersão após fervura de 3,45% conforme ASTM C 642-90 - Standard test method for specific gravity, absorption, and voids in hardened concrete.

Obteve-se o perfil do teor de cloretos com material extraído com furadeira a cada 5 mm de profundidade (25 furos em cada um dos quatro pontos pesquisados). Nos quatro pontos pesquisados os perfis foram obtidos por medições de teor de cloretos solúveis em água, já que esse é que provoca a despassivação do aço. No lado leste também foi obtido o perfil de cloretos solúveis em ácido. Esses perfis são mostrados nas Figuras 05 / 06 / 07 / 08 / 09. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Química dos Materiais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT.

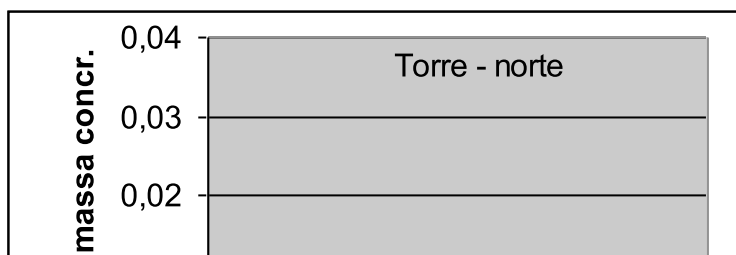


Figura 05 – Perfil de cloretos solúveis em água na torre de telecomunicações – lado norte

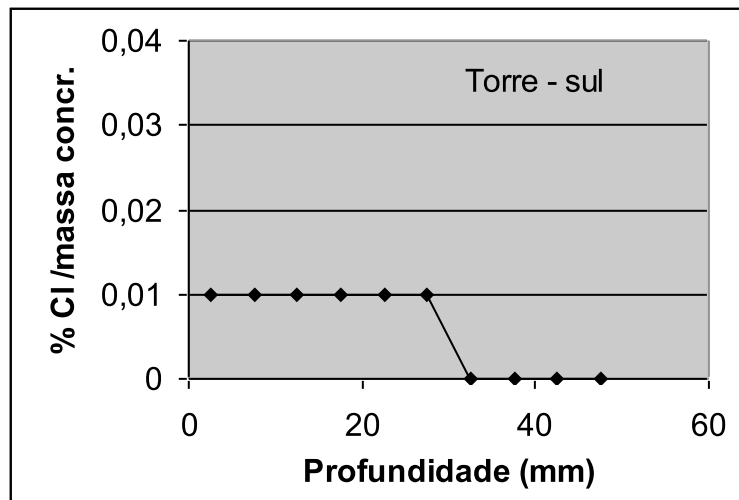


Figura 06 – Perfil de cloretos solúveis em água na torre de telecomunicações – lado sul

Figura 07 – Perfil de cloretos solúveis em água na torre de telecomunicações – lado oeste

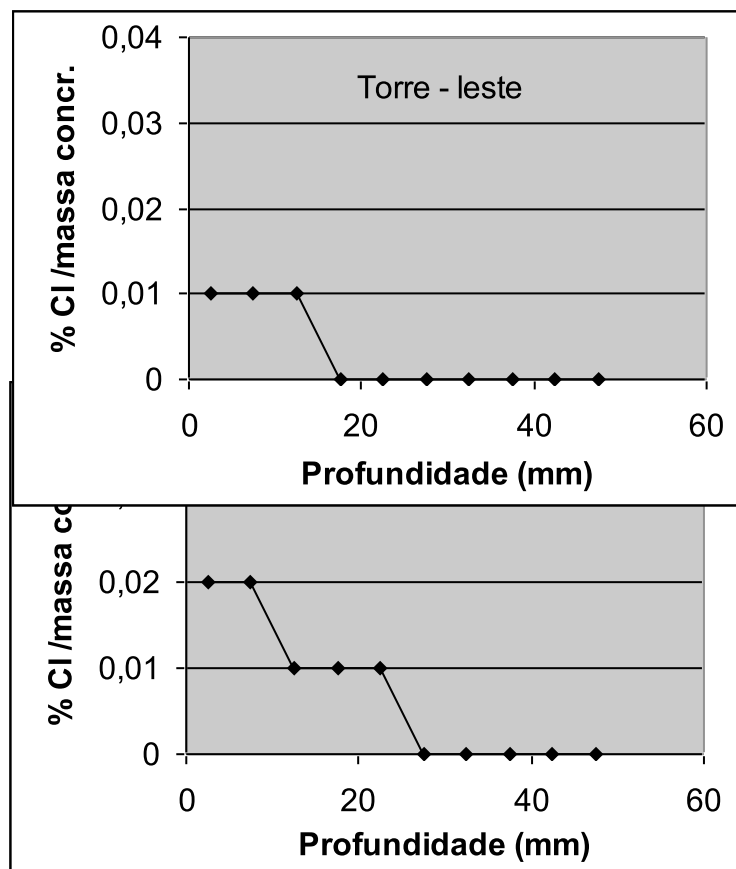


Figura 08 – Perfil de cloretos solúveis em água na torre de telecomunicações – lado leste

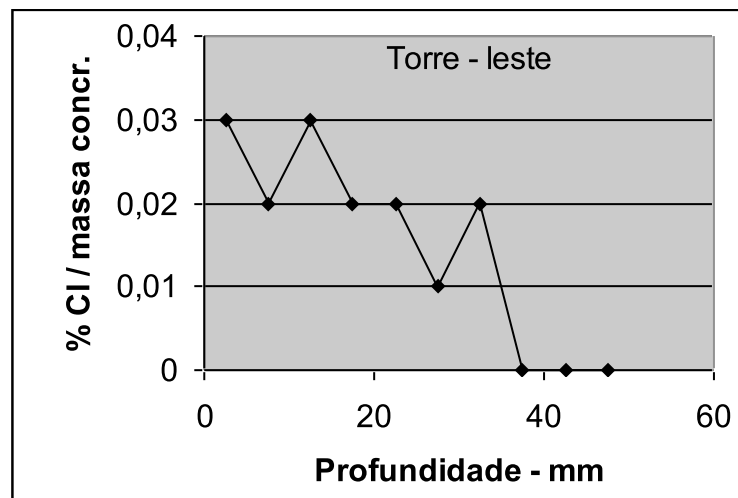


Figura 09 – Perfil de cloretos solúveis em ácido na torre de telecomunicações – lado leste

Embora o lado leste tenha sofrido um menor ataque quando comparados os perfis de cloretos solúveis em água, o perfil melhor definido é o do lado leste referente a cloretos solúveis em ácido.

2.3. Ensaio de variação sazonal do grau de saturação na torre de telecomunicações

2.3.1. Ensaio

Para medir a variação do GS do concreto foram extraídos testemunhos da torre e preparados conforme método descrito por GUIMARÃES [3]: 9,4 cm de diâmetro e 4 cm de espessura, todos revestidos com silicone em todos os lados, com exceção de uma superfície de topo. Esses testemunhos foram colocados junto aos pontos de extração de material pulverizado para ensaio químico.

A Tabela 01 mostra os valores médios obtidos no inverno e verão.

Tabela 01 – Valores médios do GS em testemunhos colocados na torre

Posição na torre	Inverno		Verão	
	GS (%)	Desvio padrão (%)	GS (%)	Desvio padrão (%)
Sul	58,71	0,70	53,16	0,55
Oeste	62,81	2,33	56,76	1,13
Leste	65,5	1,55	59,99	0,59

2.3.2. Interpretação dos resultados

Os valores de GS foram maiores no inverno, comparados com os valores de GS do verão, conforme esperado.

O desvio padrão das medições de todos testemunhos foi maior no inverno, da mesma forma que os ensaio realizado por GUIMARÃES [3], confirmando que esse fato se deve as chuvas mais intensas, intercaladas por períodos sem chuva, quando ocorre uma secagem mais rápida devido ao maior GS.

2.4. Aplicação dos resultados

2.4.1. Cálculo do coeficiente de penetração de cloretos utilizando os teores medidos

O ponto utilizado para verificar a influência do GS na difusão de cloretos é o localizado a leste da torre, sendo o perfil escolhido o de cloretos solúveis em ácido, visto que esse apresenta uma melhor definição.

Para utilizar esse perfil, que apresenta um pico no teor de cloretos, é preciso fazer algumas considerações.

Conforme NILSSON et al. [7] e ANDRADE et al. [1], o comportamento da penetração de cloretos após a formação do pico, continua com um comportamento similar a solução da segunda lei de Fick, considerando o valor do teor de cloretos no pico constante (Figura 10).

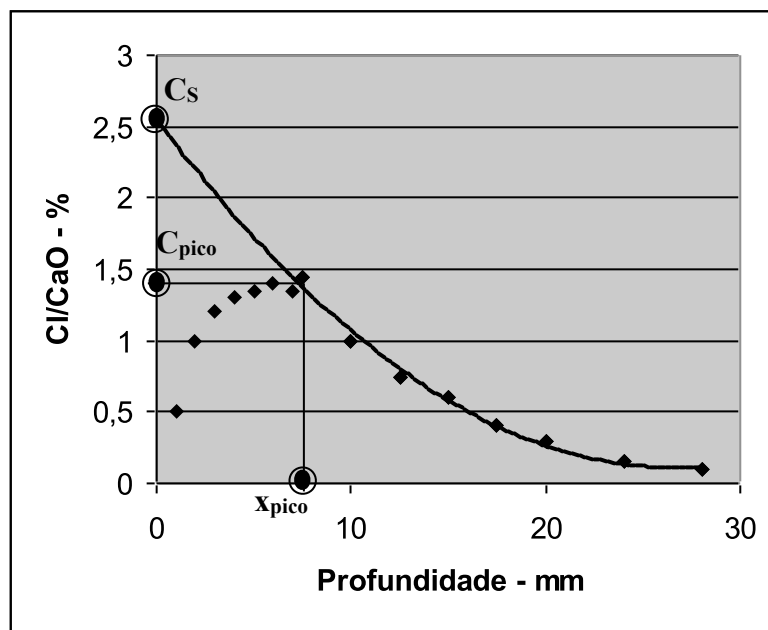


Figura 10 – Perfil teórico quando o perfil real apresenta pico [7]

Considera-se uma curva de regressão com uma boa definição para valores de correlação superior a 95% entre a curva obtida e os valores utilizados na regressão. Para facilitar foi considerado como incógnitas os valores de C_s e $(D_{const} \cdot t)^{1/2}$ nas equações que representam a solução da segunda lei de Fick considerando o coeficiente de difusão constante:

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

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,

$$\text{erf}(z) = 1 - (C_{cCl} - C_0) / (C_s - C_0) \quad (2)$$

Na Fig. 11 é mostrada a curva com os teores de cloretos medidos e a curva com os valores teóricos, sendo que os valores de C_s e $(D_{\text{const}} \cdot t)^{1/2}$ são 0,045% e 18,63 mm respectivamente. A correlação obtida (72%) foi baixa para os cinco valores a partir do pico. Essa correlação é de 94,60% para os quatro primeiros valores a partir do pico. Considerando que a precisão do ensaio de teor de cloreto é de 0,005%, a baixa correlação considerando esse quinto ponto, pode ser causada pelo erro que pode ser de até 0,005%. Os valores extremamente baixos de contaminação dificultam a avaliação do perfil.

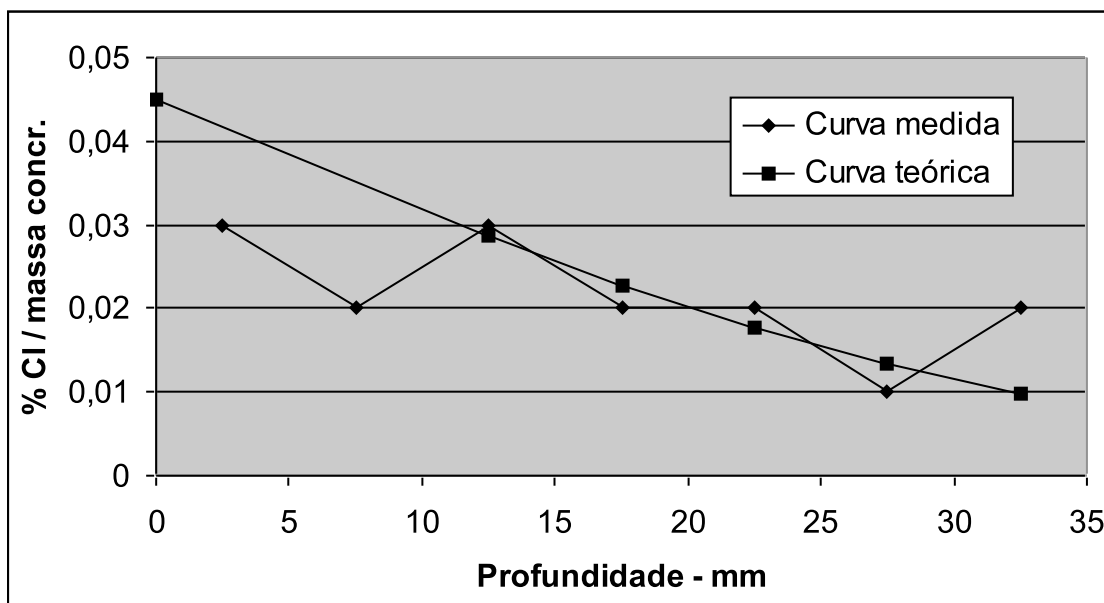


Figura 11 – Perfil dos valores medidos e teóricos de teor de cloreto solúvel em ácido para o ponto leste da torre – C_s teórico = 0,045 % / massa concr.; $(D_{\text{const}} \cdot t)^{1/2} = 18,63$ mm; erro médio = 23,03% e correlação de 72,00%

Assim, considerando a curva teórica dos valores medidos e considerando uma frente de contaminação de 0,01%, obteremos o valor de K para no modelo $c_{Cl} = K (t)^{1/2}$.

Considerando:

t = 30 anos;

$(D_{\text{const}} \cdot t)^{1/2} = 18,63$ mm; obtemos:

$D_{\text{const}} = 11,57 \text{ mm}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$

Conforme a segunda lei de Fick, para:

$C_{cCl} = 0,01\%$ - 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;

$C_S = 0,045\%$ - concentração teórica de cloretos na superfície do elemento estrutural, admitida constante;

Portanto $\text{erf}(z) = 0,7778$ e obtém-se $z = 0,8653$ e

$$c_{Cl} = 2 \cdot (0,8653) \cdot (11,57 \text{ mm}^2 \cdot \text{ano}^{-1} \cdot t)^{1/2}$$

$$c_{Cl} = 5,8864 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2} \cdot (t)^{1/2}$$

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

$$K = 5,8864 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$$

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

Para o cálculo do coeficiente de penetração de cloretos considerando o coeficiente de difusão medido em laboratório e os fatores de influência é utilizada a solução da segunda lei de Fick, conforme Equações 1 e 2.

A resistência a ruptura média em testemunhos extraídos da torre foi de 33,9 MPa. Considerando um f_{ck} aos 30 anos de 25,4 MPa e considerando um aumento de resistência de 20% da idade de 28 dias aos dois anos, obtém-se um f_{ck} aos 28 dias de 21,3 MPa.

O valor de $D_{\text{const.Cl}^-}$ é estimado através dos estudos de HELENE [5], obtendo-se $D_{\text{const.Cl}^-}$ para concreto C20 e C25, executado com cimento Portland comum, igual a $840 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $705 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ respectivamente.

Para obter-se uma média ponderada do coeficiente de difusão foi considerada a média de dois anos, obtendo-se um f_{ck} de 23,3 MPa, equivalendo a um coeficiente de difusão de $760 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e um coeficiente de difusão dos dois anos aos 30 anos de $705 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Dessa forma obtém-se uma média ponderada do coeficiente de difusão de $709 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

GUIMARÃES [3] 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 aplicando coeficientes de redução R_C , R_T , R_{GS} , R_{SC} respectivamente:

$$D_{\text{const.Cl}^- (\text{ef})} = D_{\text{const.Cl}^- (\text{lab.})} \cdot R_C \cdot R_T \cdot R_{GS} \cdot R_{SC} \quad \text{sendo:} \quad (3)$$

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

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

O coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido ao tipo de cimento (R_C) é de 1,00, pois o concreto da torre foi executado com cimento Portland comum, conforme GUIMARÃES [3].

A influência da temperatura é obtida pela equação de Arrhenius:

$$D_T = D_0 \cdot e^{-k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad \text{onde:} \quad (4)$$

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. [8] realizaram ensaios de difusão de cloretos com variação da temperatura. Com esses dados obtém-se valores de k de 5511 e 3806 para relação a/c de 0,5 e 0,6 respectivamente. Para relação a/c de 0,57 é considerado o valor de k igual a 4313. Considerando a temperatura T_0 de 22,5°C, como temperatura em ambiente de laboratório e a temperatura média por estação do ano, obtém-se um coeficiente médio anual de diminuição do coeficiente de difusão (R_T), conforme Tabela 02. 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.

Tabela 02 – Valores médios de R_T

To = 22,5 oC = 295,5 K				Média
k = 4313				
Meses	Ti (°C)	Ti (K)	R_T^*	0,83
Verão	23,4	296,4	1,04	
Outono	16,46	289,46	0,74	
Inverno	14,37	287,37	0,66	
Primavera	20,33	293,33	0,90	

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

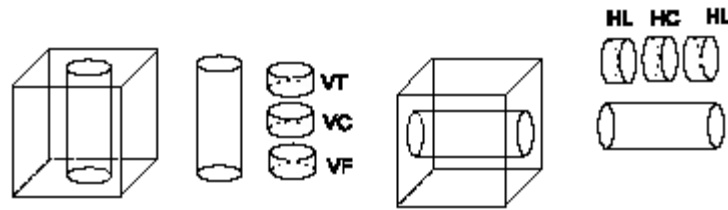
O coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido a variação do GS (R_{GS}) é calculado para GS's médios medidos durante as estações de inverno e verão, utilizando a relação entre os valores obtidos por GUIMARÃES [3] na Figura 01. O GS na primavera e outono são considerados como o valor médio entre os GS's médios de inverno e verão. Os resultados são apresentados na Tabela 03.

Tabela 03 - Valores médios de R_{GS}

Estação	GS médio (%)	R_{GS}	R_{GS} médio
Verão	60,0	0,120	0,149
Outono	62,7	0,149	
Inverno	65,5	0,180	
Primavera	62,7	0,149	

GUIMARÃES et al. [4] pesquisaram o efeito da superfície de ataque em relação à superfície de concretagem. Concluíram que a superfície lateral em relação superfície de concretagem (HL) tem um ataque menos intenso em relação a superfície de amostras obtidas

do interior do concreto (HC) (Figura 12), conforme ensaio de carga passante (ASTM 1202-94 - Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion



penetration), para concreto preparado com abatimento de tronco cônico de 10cm.

Figura 12 – Posição de extração das amostras [4]

O concreto pesquisado na Torre localiza-se em superfície lateral em relação a superfície de concretagem e obteve na época de sua execução um abatimento de tronco cônico de 8 ± 1 cm. O coeficiente de redução devido a diferença na posição de extração (R_{SC}), considerando que ensaios de laboratório normalmente utilizam amostras do interior do concreto, foi calculado para média de quatro valores de carga passante com resultado de R_{SC} igual a 0,74.

Assim calcula-se o coeficiente de difusão efetivo considerando as condições do concreto do elemento estrutural pesquisado em seu micro ambiente e o tipo de cimento utilizado, em função do coeficiente de difusão obtido em laboratório para concreto executado com cimento Portland, utilizando a Equação 3:

$$D_{const.Cl-(ef)} = 709 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 1 \cdot 0,83 \cdot 0,149 \cdot 0,74 = 64,88 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Para $C_s = 0,045\%$ e $C_{Cl} = 0,01\%$ obtém-se $\text{erf}(z) = 0,7779$

Portanto:

$$z = 0,8653$$

$$c_{Cl} = 2 \cdot (0,8653) \cdot (64,88 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot t)^{1/2}$$

$$c_{Cl} = (7,72 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}) \cdot (t)^{1/2}$$

2.4.3. Discussão dos resultados

Observa-se que o valor de $7,72 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$, correspondente ao coeficiente de penetração de íons cloreto, e que para esse mesmo ponto o coeficiente de penetração de íons cloreto calculado a partir do perfil de íons cloreto é de $5,89 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1/2}$. Os valores apresentam uma diferença de 31% a mais do obtido com as considerações acima, em relação ao obtido com o perfil de cloretos medido na estrutura (Fig. 13).

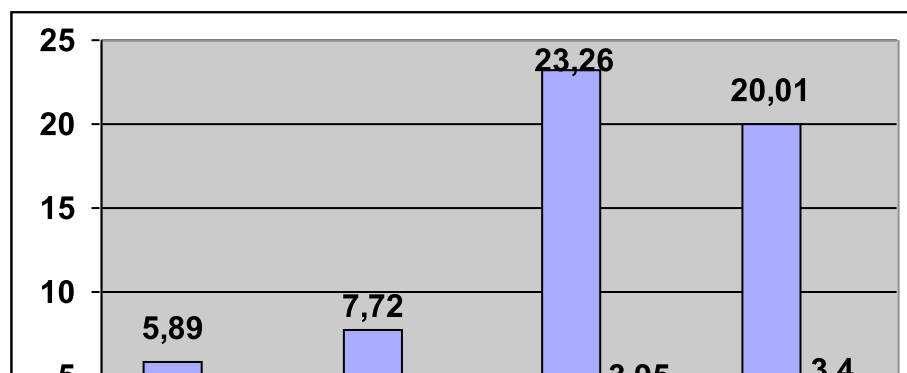


Figura 13 – Coeficiente de penetração de íons cloreto - K ($\text{mm.ano}^{-1/2}$) da torre de telecomunicações - zona de névoa - Medido: obtido através do perfil de cloreto medido na obra; Modelo: previsto considerando os fatores indicados (fck – variação da resistência; cim. – tipo de cimento; T – variação da temperatura; GS – variação do GS; SE – posição da superfície exposta em relação a superfície de concretagem)

Caso não seja considerada a variação do GS (R_{GS}) e a posição da superfície exposta em relação a superfície de concretagem (R_{SC}), essa diferença seria de 295%, pois o coeficiente de penetração de íons cloreto seria de $23,26 \text{ mm.ano}^{-1/2}$, sendo a variação do GS, (R_{GS}) o fator mais significativo. Caso não fosse considerada apenas a variação do GS a diferença aumentaria de 31% para 240% (Figura 13).

3. CONCLUSÕES

O ataque por cloretos foi muito baixo em todas as faces, sendo significativamente menor na face leste, onde há alta insolação e ventos predominantes, sendo que nem mesmo os maiores teores atingem concentrações capazes de despassivar o aço, que se situam entre 0,05% e 0,1% de massa de cloretos em relação à massa de concreto.

Na estrutura pesquisada, observou-se uma grande melhora na precisão da estimativa da profundidade de ataque por cloretos, quando considerado o GS do concreto no modelo desenvolvido por GUIMARÃES [3], sendo que este fator apresenta uma grande influência sobre o coeficiente de difusão dos íons cloreto.

Portanto, a que influência do GS na difusão de íons cloreto deve ser considerada nos modelos de vida útil do concreto.

Outras estruturas de concreto devem ser pesquisadas, com o objetivo de melhorar o conhecimento dos fatores que influenciam na difusão de íons cloreto, obtendo assim, modelos mais precisos de vida útil em ambiente marítimo.

AGRADECIMENTO

Agradecemos a FAPESP pelo auxílio à pesquisa, o qual viabilizou a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

1. ANDRADE, C.; SAGRERA, J. L.; SANJUÁN, M. A. Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water. In: SECOND INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELLING THE CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE, Paris, 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. 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.

4. GUIMARÃES, A.T.C.; TULA, L.; HELENE, P.R.L. Performance of surface concrete elements. In: II INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, Gramado, 1999.
5. 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).
6. NIELSEN, P. E.; GEIKER, M. R. Chloride diffusion in partially cementitious material. *Cement and Concrete Research*, v33, p. 133-138, 2003.
7. NILSSON, L.; ANDERSEN, A.; LUPING, T.; UTGENANT, P. Chloride ingress data from field exposure in a swedish road environment. In: SECOND INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELLING THE CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE, Paris, 2000.
8. 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.