

## Environmental variables in the concrete saturation degree modelling

### *Variáveis ambientais na modelagem do grau de saturação do concreto*



M. G. T. PERAÇA<sup>a</sup>  
gperaca@hotmail.com

A. T. C. GUIMARÃES<sup>b</sup>  
atcg@vetorial.net

H. C. PICCOLI<sup>c</sup>  
piccoli@dmc.furg.br

#### Abstract

Mathematical models that do not take into account local measurements were developed to make the calculation of the concrete saturation degree easier, which is assumed to be an important factor in the diffusion coefficient of chloride ions inside concrete. Many studies have already proven the influence of the saturation degree in the diffusion coefficient, and a proposed model enables the calculation of the ion diffusion coefficient, considering the variations of the saturation degree for each type of concrete. The models were developed based on a statistical analysis of the environmental variables affecting the variation of the saturation degree. As a conclusion of this study, fifteen models were developed based on the multiple linear regression, which estimate the seasonal average saturation degree of each type of concrete, leading to a maximum percentage error lower than 5%.

**Keywords:** diffusion coefficient, linear regression, models, maximum temperature.

#### Resumo

Com o objetivo de facilitar o cálculo do grau de saturação do concreto, visto que é um fator influente no coeficiente de difusão de íons cloreto no interior do concreto, foram elaborados modelos matemáticos que dispensam medições locais. Pesquisas concluídas comprovam a influência do grau de saturação no coeficiente de difusão, e um modelo proposto viabiliza o cálculo do coeficiente de difusão de íons, considerando as variações do grau de saturação para cada tipo de concreto. Os modelos foram elaborados através de análises estatísticas de variáveis ambientais que influenciam na variação do grau de saturação. Como conclusão da pesquisa elaborou-se quinze modelos obtidos pela regressão linear múltipla, que estimam o grau de saturação médio sazonal de cada tipo de concreto, gerando um erro percentual máximo, inferior a 5%.

**Palavras-chave:** coeficiente de difusão, regressão linear, modelos, temperatura máxima.

<sup>a</sup> Sul-rio-grandense Federal Institute, Mathematics Coordinaton Office, gperaca@hotmail.com, Rua Maestro Bandeira 377, Bairro jardim – 96.055-650, Pelotas-RS, Brazil;

<sup>b</sup> Federal University of Rio Grande, Department of Materials and Construction, Oceanic Engineering Post-Graduate Programme, atcg@vetorial.net, Rua João Manoel 38, apto 701 - Bairro Cidade - 96.211-060, Rio Grande-RS, Brazil.

<sup>c</sup> Federal University of Rio Grande, Department of Materials and Construction, Oceanic Engineering Post-Graduate Programme, piccoli@dmc.furg.br, Rua Paulo Sérgio Pegas, 362, Cassino – 96.208-470, Rio Grande-RS, Brazil.

## 1. Introdução

Muitos estudos têm sido realizados para o aperfeiçoamento de técnicas e materiais utilizados em construções de concreto. Alguns séculos atrás se acreditava que o concreto seria eterno, que uma obra construída com esse material jamais tombaria ou sofreria abalos da natureza. Porém essa crença teve fim quando os primeiros problemas relacionados à corrosão começaram a resultar em fissuras e problemas de deterioração que necessitaram de reparos ou até mesmo provocaram perda parcial ou total de grandes estruturas. Desde então, engenheiros empenham-se em estudar esse processo de deterioração do concreto.

Com as pesquisas já realizadas é possível prever, através de modelo derivado da segunda Lei de Fick, Crank [2], em quanto tempo a armadura de uma estrutura de concreto começará a ser atacada por íons cloreto e assim, poder utilizar métodos de prevenção que dificultem esse ataque.

Neste estudo, tratou-se de concretos que se encontram em zona de névoa e, por esse motivo são bastante atingidas pelo ataque de íons cloreto contido nas gotículas de água.

Para que se consigam melhores resultados no modelo citado acima, é necessário medir as variações sazonais do grau de saturação (GS) para relacioná-las com o coeficiente de difusão utilizado no modelo. (Guimarães [3], Climent et al. [1], Nielsen e Geiker [10])

Dois trabalhos realizados tornaram possíveis essas medições e levantaram dados que possibilitaram os estudos sobre os fatores que influenciam na variação do GS.

Guimarães [3] desenvolveu um método de medição do grau de saturação em estruturas de concreto e Souza [11] determinou, estatisticamente, a periodicidade mínima para as medições.

O GS é um dos fatores mais decisivos na intensidade de pene-

tração de íons cloreto em estruturas de concreto. (Guimarães [3]) Estudos recentes comprovam a importância de se levar em consideração a sua influência na difusão de cloretos em estruturas de concreto situadas em ambientes marítimos.

De acordo com Guimarães e Helene [6] e Guimarães [9], foram encontradas grandes diferenças entre a profundidade de penetração do cloreto prevista por modelos determinísticos e o real valor encontrado em estruturas no sul do Brasil, quando não considerado o GS.

Na busca por modelos que permitam obter aproximações para os valores do GS, sem a necessidade de medições periódicas, estudou-se a influência das variáveis ambientais em sua estimativa e obteve-se um conjunto de modelos matemáticos que tomaram possíveis essas aproximações.

Assim, após as conclusões de Souza [11], continuou-se medindo, semanalmente, o GS dos testemunhos utilizados em sua pesquisa por mais quatro anos, o que possibilitou a formulação de modelos que reproduzissem seus valores, sem a necessidade de medições. O GS é uma medida relacionada ao teor de umidade do concreto. Essa umidade tem início em sua camada mais externa, evoluindo para seu interior. Conforme ocorrem variações climáticas, dá-se início a um processo de molhagem e secagem do concreto. Pela camada externa do concreto, penetram os agentes que o atacam, como o cloreto, por exemplo. Uma vez no interior do concreto, o cloreto tende a difundir-se até atingir a barra de aço, despassivando-a. A partir daí, começa o processo de deterioração do concreto. Por definição, o GS é o percentual do volume de solução de poro em relação ao volume total de poros. O GS é definido pelo percentual de teor de umidade da massa do corpo de prova em relação à absorção de água após imersão e fervura. (Guimarães [7]) Pesquisas anteriores comprovaram a influência direta do GS do

**Tabela 1 - Granulometria do agregado miúdo**

Peneiras Número	Abertura (mm)	Peso (g)	% retido	% acumulado	NBR 7211	
					Ótima	Utilizável
3/8"	9,5	-	0,00	0,00	-	-
4	4,8	1,90	0,19	0,19	3 - 5.	0 - 3
8	2,4	34,50	3,45	3,64	29 - 43	13 - 29
16	1,2	166,70	16,67	20,31	49 - 64	23 - 49
30	0,6	360,20	36,02	56,33	68 - 83	42 - 68
50	0,3	353,00	35,30	91,63	83 - 94	73 - 83
100	0,15	73,30	7,33	98,96	93 - 98	88 - 93
200	0,075	8,90	0,89	99,85	< 3%	< 5%
Residue	-	1,50	0,15	100,00	-	-
Sum	-	1000	100	271,06	-	-
Módulo de finura				2,71		

Tabela 2 - Granulometria do agregado graúdo

Peneiras abertura (mm)	Material retido (g)	Porcentagem em peso	
		Retido	Retido acumulado
76,00	0	0,00	0,00
50,00	0	0,00	0,00
38,00	0	0,00	0,00
25,00	0	0,00	0,00
19,00	1064,4	10,64	10,64
9,50	7695,2	76,95	87,60
4,80	1045,1	10,45	98,05
2,40	0	0,00	98,05
1,20	0	0,00	98,05
0,60	0	0,00	98,05
0,30	0	0,00	98,05
0,15	0	0,00	98,05
resíduo	195,3	1,95	-
Totais	10000	100,00	686,52
Peso específico aparente (kg/l)			1,25
Peso específico absoluto (kg/l)			2,62
Diâmetro máximo (mm)			19
Módulo de finura			6,87

concreto na difusão de íons cloreto no interior do concreto. Alguns pesquisadores que detiveram suas pesquisas em temas que contribuíram para conservação e durabilidade do concreto, estudando fatores que induzem a penetração de íons cloreto no interior das estruturas e modelos que prevêem o tempo de vida útil das estruturas de concreto armado, considerando a influência do GS na difusão de cloretos são: Climent et al. [1], Nielsens e Geiker [10], Vicente [13], Guimarães [3], Guimarães e Helene [5 e 6], Guimarães [7], Guimarães e Helene [8], Souza et al. [12], Souza [11], Guimarães [9]. Uma metodologia de cálculo para o GS foi elaborada por Guimarães [7] e foi baseada em medições diárias do GS, efetuadas durante todo o ano de 2004. Souza et al [12] concluiu que apenas uma medição semanal do GS bastava para se conhecer seu comportamento durante uma estação do ano e assim poder estimar sua média sazonal (por estação). Com a média sazonal do GS, pode-se utilizar o modelo proposto por Guimarães [3], para obtenção dos valores médios do coeficiente de difusão por estação e assim, o coeficiente de difusão médio anual em função do GS, ou seja, o coeficiente de difusão considerando a variação sazonal do GS.

A metodologia utilizada na medição do GS é dispendiosa tanto em mão de obra como em custos de materiais. Ela depende da fabricação de testemunhos de concreto, das medições de massa de cada testemunho e ainda de cálculos para se obter o valor do GS. Com a intenção de facilitar e agilizar os cálculos do GS, essa pesquisa teve o objetivo de elaborar modelos matemáticos que calculem o GS de cada tipo de concreto, através de variáveis ambientais que influenciem no GS.

Também por ser difícil o cálculo do GS, modelos que estimam a vida útil do concreto, Crank [2], e que não consideram sua influência no cálculo do coeficiente de difusão de íons, perdem precisão. Esse é outro motivo que objetivou a pesquisa: poder calcular com maior precisão a vida útil de estruturas de concreto ou a espessura de cobertura necessária para que se atinja a vida útil prevista para determinada estrutura.

## 2. Materiais

A seguir são apresentados todos os materiais utilizados no tra-

Tabela 3 - Traços, abatimento de tronco cônico e massa específica do concreto fresco

Concreto	Traço (c : a : b : a/c)*	Abatimento (cm)	Massa específica fresca (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
Mix 1 (1:5:0,54)	1 : 2,12 : 2,88 : 0,54	11	2350	359
Mix 2 (1:4:0,45)	1 : 1,60 : 2,40 : 0,45	11	2285	419
Mix 3 (1:6:0,63)	1 : 2,64 : 3,36 : 0,63	11	2325	304
Mix 4 (1:4:0,54)	1 : 1,60 : 2,40 : 0,54	22	2275	411
Mix 5 (1:6:0,54)	1 : 2,64 : 3,36 : 0,54	1,2	2325	308

\* c: cement, fa: fine aggregate, ca: coarse aggregate, w/c: water to cement ratio

Tabela 4 – Resistência a compressão (MPa)

Traço	Resistência 28 dias	Resistência média 28 dias	Resistência 60 dias
1	29,37 29,90	29,63	35,88
2	32,30 33,40	32,85	38,48
3	27,80 27,80	27,80	30,33
4	28,60 31,50	30,05	36,56
5	33,70 36,00*	33,70	39,16

\* Valor desconsiderado em função dos resultados aos 60 dias

balho, assim como sua caracterização que poderá ser observada nas tabelas 1,2,3 e 4.

Esses parâmetros foram obtidos em pesquisa anterior de Souza

Figura 1 – Preparação dos testemunhos: extração e fatiamento dos cilindros (Souza, (10))

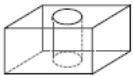

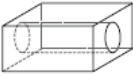
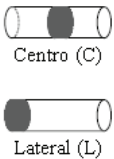
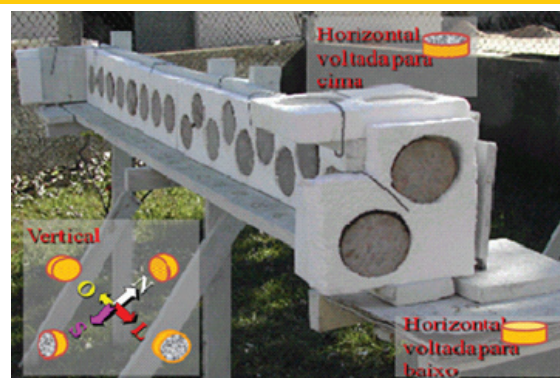
Direção da extração do cilindro *	Testemunhos fatiados *
 <p>Vertical (V)</p>	 <p>Topo (T)</p> <p>Centro (C)</p> <p>Fundo (F)</p>
 <p>Horizontal (H)</p>	 <p>Centro (C)</p> <p>Lateral (L)</p>

Figura 2 – Variação da posição dos testemunhos expostos em ambiente natural (Souza, (10))



[11], onde foram comparados com os valores de GS.

**Cimento** – Tipo CP IV 32 da Votorantin

**Agregado miúdo** – areia quartzosa com granulometria conforme tabela 1.

**Agregado graúdo** - brita granítica com granulometria conforme tabela 2.

**Água** – potável

**Concretos** – foram executados cinco traços de concreto: três traços de igual consistência e variando a relação a/c; e três traços de igual relação a/c e variando a consistência, sendo um dos traços comum as duas famílias de concreto. Todos os traços possuem teor de argamassa seca de 52%. Na tabela 3 são mostrados os traços dos concretos, seus abatimentos de tronco cônico e massa específica do concreto fresco. Na tabela 4 são apresentadas suas resistências à compressão aos 28 dias e 60 dias.

### 3. Metodologia

Com o material, foram executados cinco traços de concreto: três traços de igual consistência e variando a relação a/c; e três traços de igual relação a/c e variando a consistência, sendo um dos traços comum às duas famílias de concreto. Todos os traços possuem teor de argamassa seca de 52%. Na tabela 3 são mostrados os traços dos concretos, seus abatimentos de tronco cônico e massa específica do concreto fresco. Na tabela 4 são apresentadas suas resistências à compressão aos 28 dias e 60 dias.

Foram então construídos trinta testemunhos de concreto, formando quinze famílias de concretos com dois testemunhos cada, fatiados (ver figura 1) de dois cilindros distintos de 10 cm de diâmetro (corpos de provas - CP). Para o fatiamento, foi utilizada uma serra de disco para cortes, geralmente utilizada em laboratório de concreto. Estes testemunhos foram extraídos em duas direções (vertical e horizontal), de blocos de concreto, conforme figura 1. Essas fatias deram origem à trinta cilindros de 10 cm de diâmetro e 4 cm de espessura, aproximadamente igual ao cobrimento das barras de aço. Os testemunhos foram revestidos com duas camadas de silicone, exceto em uma de suas faces, de acordo com a superfície de concretagem do CP. Antes dos revestimentos de silicone,

Tabela 5 – Identificação dos testemunhos analisados

Testemunho	Traço	Direção de extração do cilindro*	Face exposta*	Posição da face exposta	
				Sentido	Direção
1 e 2	1	V	C	V	S
3 e 4	2	V	C	V	S
5 e 6	3	V	C	V	S
7 e 8	4	V	C	V	S
9 e 10	5	V	C	V	S
11 e 12	1	V	T	V	S
13 e 14	1	V	F	V	S
15 e 16	1	H	L	V	S
17 e 18	1	H	C	V	S
19 e 20	1	V	C	H	PARA CIMA
21 e 22	1	V	C	V	L
23 e 24	1	V	C	H	PARA BAIXO
25 e 26	1	V	C	V	N
27 e 28	1	V	C	V	O
29 e 30	1	V	C	V	LAB

Interpretação da tabela. 1: a direção de extração vertical (V) e horizontal (H); a face exposta centro (C), topo (T), fundo (F) e lateral (L); a posição da face exposta – sentido, vertical (V) e horizontal (H); a posição da face exposta – direção, sul (S), leste (L), norte (N), oeste (O) e interior (LAB).

cada testemunho teve sua massa seca registrada, assim como depois de receberem as camadas. Feito a escolha do ambiente de exposição dos testemunhos, confeccionou-se um suporte de madeira e isopor, de modo a sustentar os testemunhos, garantido que as faces não revestidas ficassem parcialmente expostas ao ambiente natural. As faces em exposição foram determinadas pelos pesquisadores, no início da pesquisa e estão ilustradas na figura 2.

Cada dupla de testemunhos foi instalada junta, no rack (suporte feito de madeira para exposição dos testemunhos) sendo um testemunho com teor de umidade bastante baixo e outro bastante alto. As medições do GS só foram consideradas quando os dois testemunhos apresentaram um valor de GS aproximadamente igual, estando em equilíbrio com o ambiente.

Dos trinta testemunhos, dois a dois foram extraídos de CP's de mesma direção, para que se pudessem calcular suas variações médias de GS. Ao total, foram analisadas quinze famílias de testemunhos, com variações na posição de extração, no traço e na exposição em ambiente natural. As medições foram realizadas em datas e horários pré-determinados, mesmo em dias de chuva.

A tabela 5 resume a identificação dos testemunhos por família. Uma vez por semana, cada testemunho teve sua massa diária medida através de uma balança digital, conforme figura 3. Cada testemunho teve também sua massa seca inicial medida. Guimarães [7], estabeleceu uma metodologia para medição do GS do concreto, conforme equações 1 e 2.

$$GS = \frac{A_d}{A_{máx}} \times 100 \quad (1)$$

$$A_d = \frac{M_d - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

$A_d$  = absorção diária  
 $A_{máx}$  = absorção máxima  
 $M_d$  = massa diária  
 $M_s$  = massa seca

A importância de se calcular o GS do concreto é o fato de ele influenciar na variação do coeficiente de difusão de íons cloreto no interior do concreto. O coeficiente de difusão de íons, por sua vez, é uma variável na equação que estima a vida útil de estruturas de concreto. Crank [2] apresenta a seguinte solução para a segunda lei de Fick, que estima a vida útil do concreto, considerando o coeficiente de difusão constante:

$$C_{cl} = 2(z) \sqrt{D_{const.CI} \times t} \quad (3)$$

**Figura 3 – Variação da posição dos testemunhos expostos em ambiente natural (Souza, (10))**



Onde:

$C_{cl}$ : espessura em cm;

$D_{const.Cl}^-$ : coeficiente efetivo de difusão ou difusividade do concreto em questão, em  $cm^2/ano$ ;

$t$ : vida útil, em anos;

$z$ : valor da função erro de Gauss.

O fato de o modelo de Crank [2] não considerar alguns fatores que influenciam no coeficiente de difusão, implica em erro no seu resultado, com perda de precisão em sua estimativa. O fator GS é pouco utilizado em modelos de vida útil. Visto que já se tem conhecimento de sua importância, esse trabalho trata de facilitar seu cálculo para viabilizar sua consideração no modelo de Crank [2]. Para isso será considerado o cálculo do coeficiente de difusão, conforme proposto por Guimarães [3] que pondera a influência do tipo de cimento ( $R_c$ ), da temperatura média por estação do ano ( $R_T$ ), do grau de saturação ( $R_{GS}$ ) e da posição da superfície de ataque em relação à superfície de concretagem ( $R_{SC}$ ), sobre o coeficiente de difusão do cloreto.

$$D_{const.Cl}^-(est) = D_{const.Cl}^-(lab) R_c R_T R_{GS} R_{SC} \quad (4)$$

Sendo:

$D_{const.Cl}^-(est)$ : 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%).

O objetivo do trabalho é estimar o GS através de variáveis ambientais. Para isso considerou-se, por hipótese, que toda variável ambiental interfere de maneira mais ou menos significativa no GS do concreto. Para que fossem dispensadas as variáveis menos significativas, fez-se um estudo estatístico medindo os coeficientes de correlação linear entre as variáveis estudadas e o GS. As variáveis estudadas foram: pressão atmosférica, temperatura do ar seco, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, taxa de precipitação, taxa de evaporação interna (Pichê), temperatura de ar úmido, horas de insolação, nebulosidade, visibilidade e taxa de evaporação externa.

Na primeira análise estatística, pôde-se verificar que a variável que manteve a mais alta correlação foi a temperatura máxima (TM), exceto para a família 2122 (família dos testemunhos 21 e 22), embora a TM tenha sido a segunda mais alta correlação. A tabela 6 mostra o resultado dessa análise para todas as famílias de concreto.

No modelo proposto por Guimarães [3] para o cálculo do coeficiente de difusão de íons cloreto, é considerado a média sazonal do GS de cada família de concreto. Para tanto, visto que a correlação linear é alta para a variável TM, elaboraram-se modelos de regressão linear simples para todas essas famílias, em função da TM média de cada estação. O modelo obtido retorna o GS médio sazonal de cada família de concreto.

A tabela 7 apresenta os modelos elaborados pela regressão linear simples e os respectivos coeficientes de correlação (R).

Para analisar o comportamento do modelo em relação à resposta do GS, analisaram-se medições de uma nova amostra de GS (média sazonal das medições) com os valores obtidos nos modelos. Para dar continuidade à pesquisa, analisou-se a significância de outras variáveis ambientais para elaboração de modelos obtidos através da regressão linear múltipla. Cabe salientar que uma variável é dita significativa no modelo, se o valor de  $p$  (teste de significância) é inferior a 5% (0,05).

A modelagem foi elaborada através de programas matemáticos que calculam os coeficientes das variáveis independentes, o coeficiente de intercepto e as significâncias das variáveis utilizadas em relação ao GS. Os resultados são modelos matriciais que envolvem adição e multiplicação de matrizes.

#### 4. Resultados e discussões

O maior erro absoluto encontrado, no modelo de regressão linear simples, foi de 2,73 unidades, correspondendo a um erro percentual de 4,24% em relação à medição local, para a família 1920 (família dos testemunhos 19 e 20).

Os resultados de uma segunda análise, com o modelo de regressão linear múltipla, indicaram que mais uma variável, na maioria dos casos a umidade relativa – UR, fortalece o coeficiente de correlação dos modelos, ajudando a explicar os valores de GS obtidos nos modelos.

A tabela 8 traz os modelos obtidos pela regressão linear múltipla, os valores do coeficiente de correlação (R) e o resultado do teste de significância ( $p$ ) para cada variável utilizada no modelo.

É importante observar, que para a família 1516 (família dos testemunhos 15 e 16), as variáveis independentes utilizadas foram a TM e a taxa de evaporação interna (TEI), para a família 2930 (família dos testemunhos 29 e 30) foram a TM e a temperatura de ar úmido (TAU) e para as demais famílias foram a TM e a UR.

A mesma análise de comportamento dos modelos efetuada para a regressão linear simples foi efetuada para os modelos de regressão linear múltipla. O maior erro absoluto calculado foi de 2,47 unidades correspondendo a um erro percentual de 3,83% para a família 1920 (família dos testemunhos 19 e 20).

O fato de uma segunda variável ter aumentado o coeficiente de correlação no modelo, o que pode ser verificado comparando as tabelas 7 e 8, indica que a regressão linear múltipla se ajustou melhor ao objetivo proposto, gerando um erro percentual máximo, menor que 5%. Os menores coeficientes de correlações calculados referem-se aos testemunhos que foram expostos com a face voltada para cima, lateral,

Tabela 6 - Correlações das famílias de concreto com as variáveis ambientais

Variável/GS	Média das correlações de 2004-2007							
	GS 12	GS 34	GS 56	GS 78	GS 910	GS 1112	GS 1314	GS 1516
Pressão atmosférica	0,44	0,44	0,43	0,42	0,40	0,40	0,41	0,39
Temperatura ar seco	-0,70	-0,67	-0,68	-0,67	-0,66	-0,65	-0,60	-0,63
Temperatura máxima	-0,74	-0,70	-0,73	-0,72	-0,72	-0,70	-0,62	-0,68
Temperatura mínima	-0,64	-0,61	-0,61	-0,61	-0,59	-0,58	-0,54	-0,57
UR	0,52	0,51	0,42	0,38	0,43	0,41	0,58	0,35
Taxa de precipitação interna	0,33	0,24	0,27	0,28	0,28	0,29	0,17	0,25
Taxa de evaporação	-0,68	-0,66	-0,67	-0,67	-0,69	-0,69	-0,57	-0,64
Temperatura ar úmido	-0,65	-0,62	-0,65	-0,65	-0,62	-0,62	-0,52	-0,61
Insolação	-0,48	-0,44	-0,45	-0,45	-0,50	-0,50	-0,40	-0,44
Nebulosidade	0,33	0,28	0,32	0,32	0,35	0,36	0,25	0,31
Visibilidade	-0,28	-0,26	-0,29	-0,29	-0,36	-0,34	-0,21	-0,30
Taxa de evaporação externa	-0,38	-0,41	-0,38	-0,37	-0,39	-0,38	-0,39	-0,36

Variável/GS	Média das correlações de 2004-2007						
	GS 1718	GS 1920	GS 2122	GS 2324	GS 2526	GS 2728	GS 2930
Pressão atmosférica	0,43	0,41	0,36	0,27	0,33	0,46	0,12
Temperatura ar seco	-0,65	-0,60	-0,53	-0,42	-0,57	-0,66	-0,23
Temperatura máxima	-0,69	-0,63	-0,55	-0,47	-0,63	-0,70	-0,30
Temperatura mínima	-0,59	-0,53	-0,49	-0,36	-0,50	-0,60	-0,18
UR	0,46	0,57	0,62	0,44	0,40	0,47	0,18
Taxa de precipitação interna	0,25	0,27	0,15	0,09	0,28	0,23	0,03
Taxa de evaporação	-0,64	-0,63	-0,51	-0,45	-0,57	-0,63	-0,27
Temperatura ar úmido	-0,61	-0,54	-0,45	-0,35	-0,53	-0,62	-0,20
Insolação	-0,43	-0,54	-0,38	-0,31	-0,41	-0,40	-0,14
Nebulosidade	0,29	0,40	0,23	0,22	0,31	0,27	0,13
Visibilidade	-0,25	-0,10	-0,29	-0,25	-0,32	-0,28	-0,18
Taxa de evaporação externa	-0,37	-0,38	-0,39	-0,32	-0,29	-0,36	-0,18

para baixo ou os testemunhos expostos em laboratório. Ainda assim, o modelo de regressão linear múltipla gerou melhores resultados.

Para a elaboração dos modelos, foi analisada a possível defasagem de tempo do GS em resposta às variáveis ambientais. Verificando que não houve uma defasagem maior do que vinte e quatro horas, não foram necessários ajustes de tempo nos modelos.

Visto que o modelo de regressão linear múltipla se ajustou melhor ao objetivo proposto, ele foi utilizado como padrão para um guia que pode ser consultado no cálculo do GS em cada tipo de estrutura de concreto. A tabela 9 mostra esse guia.

Não foi possível comparar os resultados obtidos com outras pesquisas, pois não foram encontradas referências de modelos para

o cálculo do GS através de variáveis ambientais. Novos modelos estão sendo estudados para concretos de alta resistência inicial possibilitando assim, uma futura comparação de resultados.

## 5. Conclusões

A principal conclusão dessa pesquisa foi a possibilidade de ajustar dois modelos, um originado de uma regressão linear simples e outro de uma regressão linear múltipla, para obter com boa precisão, os valores do GS médio nas estações sazonais, para o concreto elaborado com cimento pozolânico em estruturas localizadas em zona de maré, no sul do Brasil.

Tudo indica que com a utilização dos modelos, podem-se reduzir custos de mão de obra e materiais gastos nas medições locais do GS.

Definido o tipo de concreto utilizado numa estrutura, assim como sua posição em relação à face de exposição, pode-se escolher entre os modelos, o mais adequado para o cálculo do GS médio nas quatro estações. Depois de efetuado esse cálculo, utiliza-se o resultado obtido no modelo proposto por Guimarães [3], para determinar o correspondente coeficiente de difusão. O coeficiente encontrado, assim como os valores de outras variáveis, é dado de entrada no modelo de Crank [2] estabelecido a partir da segunda Lei de Fick para obter uma estimativa de vida útil da estrutura de concreto.

Pode-se, também, concluir que não há defasagem maior que vinte e quatro horas na resposta do GS à temperatura máxima, à umidade relativa, à taxa de evaporação interna e à temperatura de ar úmido.

Finalmente, pode-se utilizar a tabela 9, como um guia de modelos que pode ser consultado para o cálculo do GS em cada tipo de estrutura de concreto, na região da pesquisa.

Essa pesquisa teve seus limites no Sul do Brasil, em zona de névoa, garantindo apenas resultados locais, sendo necessário um novo estudo para que se possam utilizar os mesmos modelos noutras regiões.

## 6. Agradecimentos

À Universidade Federal do Rio Grande, por oferecer estrutura e profissionais competentes para elaboração de projetos e trabalhos em diversas áreas do conhecimento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, pelo profissionalismo e compromisso com o trabalho proposto e realizado.

À CAPES, pela ajuda financeira e incentivo à pesquisa.

À Prof. Natália Pereira, pela liberação de acesso ao banco de dados meteorológicos utilizados na pesquisa.

## 7. Referências bibliográficas

- [01] CLIMENT, M.A. et al. Transport of Chlorides Through non Saturated Concrete After an Initial Limited Chloride Supply. *In: Workshop of RILEM Testing and Modelling Chloride Ingress into Concrete*. Paris, 2002.
- [02] CRANK, J. The mathematics of diffusion. New York, Oxford University Press, 1975.
- [03] GUIMARÃES, André T.C. Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado em Ambiente Marítimo. São Paulo, SP, Maio de 2000. 57-75,181-224. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). USP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [04] GUIMARÃES, André T.C. e HELENE, Paulo R.L. Difusão de Cloretos e a Influência do Grau de Saturação do Concreto: ensaio em laboratório e medição de obra de uso. *In: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. São Paulo, SP, 2000.
- [05] GUIMARÃES, André T.C. e HELENE, Paulo R.L. Chloride Diffusion and the influence of the saturation degree on the concrete. *In: Workshop TC 178 TMC Chlorides 56th RILEM Annual Week2002, 2002-a, Madrid. Workshop TC 178*. Paris: RILEM, 2002. v. 1. p.47-56.
- [06] GUIMARÃES, André T.C. e HELENE, Paulo R.L. Influence of the Saturation Degree of Concrete on Chloride Diffusion: Laboratory and Field Tests in Marine Structure 22-Year-old.

**Tabela 7 - Modelos obtidos pela regressão linear simples**

$$Gs_{12} = -0,7122TM + 76,138$$

$$R = 0,7351$$

$$Gs_{34} = -0,6124TM + 74,50$$

$$R = 0,7039$$

$$Gs_{56} = -0,7861TM + 78,906$$

$$R = 0,7262$$

$$Gs_{78} = -0,7461TM + 81,244$$

$$R = 0,7178$$

$$Gs_{910} = -0,6623TM + 70,901$$

$$R = 0,7171$$

$$Gs_{1112} = -0,6736TM + 71,899$$

$$R = 0,7048$$

$$Gs_{1314} = -0,3999TM + 61,701$$

$$R = 0,6220$$

$$Gs_{1516} = -0,7536TM + 78,466$$

$$R = 0,6761$$

$$Gs_{1718} = -0,6432TM + 78,270$$

$$R = 0,6867$$

$$Gs_{1920} = -0,6104TM + 73,579$$

$$R = 0,6337$$

$$Gs_{2021} = -0,6190TM + 73,655$$

$$R = 0,5531$$

$$Gs_{2324} = -0,2236TM + 52,195$$

$$R = 0,4747$$

$$Gs_{2526} = -0,5519TM + 73,595$$

$$R = 0,6331$$

$$Gs_{2728} = -0,7793TM + 74,031$$

$$R = 0,7039$$

$$Gs_{2930} = -0,1126TM + 46,664$$

$$R = 0,2970$$



In: High-Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structure, 2002, Recife. Third International Conference. Recife: V.M. Malhotra, Paulo Helene, Enio Figueiredo, Armando Carneiro,

2002-b. p. 169-192.  
[07] GUIMARÃES, André T.C. Grau de Saturação: Sua Variação com o Tipo de Concreto e sua Influência na Difusão de Íons Cloreto. São Paulo, SP,

Tabela 8 - Modelos obtidos pela regressão linear múltipla

$M_{12} = [59,648] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,60695 \\ 0,17501 \end{bmatrix}$ $R = 0,7797; p_{TM}=2,75E-26; p_{UR}=6,9E-08$	$M_{1718} = [65,29077] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,56039 \\ 0,13775 \end{bmatrix}$ $R = 0,7188; p_{TM}=3,47E-21; p_{UR}=5,643-05$
$M_{34} = [59,794] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,51848 \\ 0,15607 \end{bmatrix}$ $R = 0,7499; p_{TM}=1,21E-22; p_{UR}=3,52E-07$	$M_{1920} = [51,659] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,47042 \\ 0,23264 \end{bmatrix}$ $R = 0,7231; p_{TM}=8,47E-16; p_{UR}=1,3E-10$
$M_{56} = [68,207] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,71778 \\ 0,11355 \end{bmatrix}$ $R = 0,7417; p_{TM}=7,49E-26; p_{UR}=0,0026$	$M_{2122} = [41,01789] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,41065 \\ 0,34638 \end{bmatrix}$ $R = 0,7104; p_{TM}=7,1E-10; p_{UR}=4,18E-15$
$M_{78} = [73,47328] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,69650 \\ 0,08247 \end{bmatrix}$ $R = 0,7269; p_{TM}=2,23E-25; p_{UR}=0,025$	$M_{2324} = [43,45735] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,16777 \\ 0,092734 \end{bmatrix}$ $R = 0,5529; p_{TM}=2,78E-07; p_{UR}=7,67E-06$
$M_{910} = [60,82999] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,59804 \\ 0,10689 \end{bmatrix}$ $R = 0,7363; p_{TM}=1,09E-24; p_{UR}=0,001$	$M_{2526} = [63,78509] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,48927 \\ 0,10411 \end{bmatrix}$ $R = 0,6560; p_{TM}=4,76E-17; p_{UR}=0,002$
$M_{1112} = [62,71975] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,61501 \\ 0,09742 \end{bmatrix}$ $R = 0,7198; p_{TM}=1,36E-23; p_{UR}=0,0047$	$M_{2728} = [58,42597] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,67968 \\ 0,16561 \end{bmatrix}$ $R = 0,7362; p_{TM}=7,18E-2; p_{UR}=2,67E-05$
$M_{1314} = [46,10837] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,30037 \\ 0,16548 \end{bmatrix}$ $R = 0,7242; p_{TM}=8,46E-15; p_{UR}=9,72E-12$	$M_{2930} = [47,74959] + [TM \ TAU] \times \begin{bmatrix} -0,46501 \\ 0,42559 \end{bmatrix}$ $R = 0,4086; p_{TM}=4,13E-07; p_{TAU}=4,91E-05$
$M_{1516} = [76,05208] + [TM \ TEI] \times \begin{bmatrix} -0,49714 \\ -0,99674 \end{bmatrix}$ $R = 0,7098; p_{TM}=2,07E-08; p_{TEI}=5,09E-05$	

- abril de 2005. Monografia (Pós-Doutorado em Engenharia Civil). USP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [08] GUIMARÃES, André T.C. e HELENE, Paulo R.L. Models of Variation of Chloride Ion Diffusion as a Function of Changes in the Saturation Degree (SD) of Concrete Mixes Prepared With Pozzolanic Cement. *In: International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures*. Guimarães: RILEM Publications S.A.R.L, 5-6 de Novembro de 2007.
- [09] GUIMARÃES, André T.C. "Transporte de íons cloreto no concreto: influência do grau de saturação." *PATORREB: 3º Encontro sobre Patologia e reabilitação de edifícios/3º Congresso de Patologia y Rehabilitación de Edifícios*. Porto, 2009. 27-32.
- [10] NIELSEN, Erik P. e GEIKER, Mette R. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. *In: Cement and Concrete Research*, 2003: 133-138.
- [11] SOUZA, Karen N. "Estudo Experimental e Probabilístico da Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado Situadas em Ambiente Marítimo: Influência do Grau de Saturação do Concreto sobre a Difusividade de Cloretos." Rio Grande, RS. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). FURG - Universidade Federal do Rio Grande.

Tabela 9 - Guia de modelos apropriados para cada tipo de estrutura de concreto

Estruturas	Tipo de concreto (Pozolânico)	Modelo
Sujeitas às intempéries	Traço 1, com face exposta na direção sul e a/c 0.54	$M_{12} = [59,648] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,60695 \\ 0,17501 \end{bmatrix}$
	Traço 2, com face exposta na direção sul e a/c 0.45	$M_{34} = [59,794] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,51848 \\ 0,15607 \end{bmatrix}$
	Traço 3, com face exposta na direção sul e a/c 0.63	$M_{56} = [68,207] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,71778 \\ 0,11355 \end{bmatrix}$
	Traço 4, com face exposta na direção sul e a/c 0.54	$M_{78} = [73,47328] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,69650 \\ 0,08247 \end{bmatrix}$
	Traço 5, com face exposta na direção sul e a/c 0.54	$M_{910} = [60,82999] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,59804 \\ 0,10689 \end{bmatrix}$
	Traço 1, com face de exposição voltada para cima e a/c 0.54	$M_{1920} = [51,659] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,47042 \\ 0,23264 \end{bmatrix}$
	Traço 1, com face de exposição voltada para o leste e a/c 0.54	$M_{2122} = [41,01789] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,41065 \\ 0,34638 \end{bmatrix}$
	Traço 1, com face de exposição voltada para o norte e a/c 0.54	$M_{2526} = [63,78509] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,48927 \\ 0,10411 \end{bmatrix}$
	Traço 1, com face de exposição voltada para o oeste e a/c 0.54	$M_{2728} = [58,42597] + [TM \ UR] \times \begin{bmatrix} -0,67968 \\ 0,16561 \end{bmatrix}$
	Cobertas e abertas	Traço 1, com face de exposição voltada para baixo e a/c 0.54
Interiores secos	Traço 1 e a/c 0.54	$M_{2930} = [47,74959] + [TM \ TAU] \times \begin{bmatrix} -0,46501 \\ 0,42559 \end{bmatrix}$

- [12] SOUZA, Karen N., GUIMARÃES André T.C., ALMEIDA, Tabajara L. e HELENE, Paulo R.L. Um Método de Medição do Grau de Saturação em Estruturas de Concreto. *In: Teoria e Prática na Engenharia Civil*, 2005: 53-57.
- [13] VICENTE, F.J.M. Difusividad del ión cloruro a través de morteros. Alicante, julho de 2007: 139-140. Projeto final de graduação (Graduação em Engenharia Técnica de Obras Públicas). UA - Universidade de Alicante.