

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ALGUNS FATORES QUE INFLUENCIAM NA VARIAÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO DO CONCRETO

M^a da Graça T. Peraça¹, André T.C. Guimarães² & Humberto Camargo Piccoli³

¹Mestranda do Curso de Engenharia Oceânica – FURG, Rio Grande, RS –
gperaca@uol.com.br

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

³Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS –
piccoli@dmc.furg.br

RESUMO: Estudos recentes comprovam a influência do Grau de Saturação (GS) na difusão de cloretos de íons em estruturas de concreto situadas em ambientes marítimos. Alguns pesquisadores encontraram 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. Um método de medição do GS já foi estabelecido e verificado. A utilização desse método durante quatro anos, para 15 famílias de testemunhos de concreto, e análise estatística referente às medidas do GS e medidas de alguns fatores naturais permitiu algumas conclusões sobre a influência desses fatores na variação do GS. Dentre os fatores estudados: umidade relativa, temperatura máxima e mínima, taxa de precipitação, pressão atmosférica e taxa de evaporação, concluiu-se que temperatura máxima e taxa de evaporação são fatores decisivos na variação do GS.

PALAVRAS-CHAVE: difusão, grau de saturação, modelos, fatores naturais.

ABSTRACT: Recent studies show the importance of considering the influence of the Saturation Degree (SD) in the diffusion of chloride ions in the concrete structures in marine environments. Some researchers have found large differences between the depth of penetration of chloride provided by models and deterministic real value found in the pier structures in southern Brazil. A method of measuring the GS has been established. The use of this method over four years, to 15 families of concrete evidence, statistical analysis and measures concerning the GS and measures of some natural factors enabled some conclusions about the influence of these factors change in the GS. Among the factors studied: relative humidity, maximum and minimum temperature, rate of rainfall, air pressure and rate of evaporation, it was concluded that maximum temperature and evaporation rate are decisive factors in the change of GS.

KEYWORDS: diffusion, saturation degree, models, natural factors.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância do GS na penetração de íons cloreto nas estruturas de concreto

O grau de saturação é um dos fatores mais decisivos na intensidade de penetração de íons cloreto em estruturas de concreto.

Estudos recentes [3,4,5,6], 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 alguns pesquisadores, 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.

1.2. Modelo determinístico utilizado para prever o avanço da frente de ataque de cloretos em estruturas de concreto

O modelo a seguir é bastante utilizado para prever o avanço da frente de ataque de cloretos em estruturas de concreto, porém um coeficiente bastante influente no resultado do modelo, o coeficiente de difusão, é considerado como uma constante:

$$C_{cl} = 2 \cdot (z) \sqrt{(D_{const.Cl^-} \cdot t)}$$

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, sendo:

$$erf(z) = 1 - \frac{(C_{ecl} - C_o)}{(C_s - C_o)}$$

C_{ecl} : concentração de cloretos na profundidade ecl, no tempo t ;

C_o : concentração inicial de cloretos no interior do concreto do componente estrutural;

C_s : concentração de cloretos na superfície do componente estrutural de concreto, admitida constante;

$erf(z)$: função erro de Gauss.

Um dos motivos porque ocorre erro na previsão feita pelo modelo acima é, justamente, o fato de o coeficiente de difusão ser considerado constante e assim, não serem considerados os fatores que interferem diretamente na variação do coeficiente de difusão.

1.3. Coeficiente de difusão do cloreto

1.3.1 Difusão

Entende-se por difusão o transporte de massas de moléculas individuais por uma barreira ou espaço livre, que ocorre segundo um processo aleatório, e que depende de um gradiente de concentração, no caso, o gradiente de concentração de íons cloreto.

1.3.2 Coeficiente de difusão

É a constante de proporcionalidade entre o fluxo de átomos e o gradiente de concentração.

1.4. Fatores que influenciam no coeficiente de difusão

Os principais fatores que influenciam diretamente no valor do coeficiente de difusão de cloretos são: grau de hidratação do cimento, relação água/cimento, tipo de cimento, variação da temperatura, direção do vento, insolação e GS.

Neste trabalho, será abordado o grau de saturação e os fatores que influenciam em sua variação.

1.5. Grau de saturação (GS)

O grau de saturação é definido pelo percentual de teor de umidade da massa do corpo de prova em relação à absorção de água após imersão e fervura. O cálculo do GS é dado pela fórmula:

$$GS = \frac{A_d}{A_{máx}} \times 100 \quad \text{onde} \quad A_d = \frac{M_d - M_s}{M_s} \times 100$$

A_d = absorção diária $A_{máx}$ = absorção máxima

M_d = massa diária M_s = massa seca

1.5.1 Medição do GS

Visto que o GS é um fator decisivo no cálculo do coeficiente de difusão, é preciso que este seja medido. Dois trabalhos realizados, tornaram possíveis essas medições e levantaram dados que possibilitaram os estudos em andamento sobre os fatores que influenciam na variação do GS.

Existem alguns parâmetros relacionados ao concreto e ao meio ambiente que exercem uma grande influência na penetração de íons cloreto... Em relação às condições ambientais, os principais fatores que afetam a vida útil são a umidade relativa e a temperatura de exposição.[1]

Devido às dificuldades de se realizar experimentos para obtenção de valores do coeficiente de difusão em estado não estacionário, GUIMARÃES [3] desenvolveu um método de medição do grau de saturação em estruturas de concreto, em seguida, SOUZA [7] determinou, estatisticamente, a periodicidade mínima para as medições.

...foi realizada uma investigação experimental sobre a variabilidade do GS, visando fornecer dados suficientes e com um nível de informação satisfatório para avaliar o comportamento real do GS na pasta de cimento endurecida. No entanto, percebeu-se que a metodologia aplicada em tal experimento, de certa forma, tornava-se inviável na prática da engenharia devido à dificuldade de coletar dados diários, o que disponibilizaria de tempo e custos extras, sem mencionar as condições de exposição da estrutura a ser pesquisada que poderia agravar ainda mais o processo. Para tanto, foi desenvolvido um método de medição do GS, avaliando estatisticamente períodos de medição necessários para caracterizar a

variação de tal parâmetro. Ficou evidente que apenas uma medição por semana foi suficiente para caracterizar uma estação do ano durante o período dessa pesquisa. [7]

2. EXPERIMENTO

2.1 Testemunhos utilizados

Para o experimento, foram utilizados testemunhos extraídos de corpos de prova de concreto. Estes testemunhos foram extraídos em duas direções: vertical e horizontal. Depois de extraídos, foram fatiados (figura 1) e dispostos em ambiente natural (figura 2), combinando tipo de concreto, direção e sentido das faces fatiadas de modo a formarem 15 famílias de testemunhos (tabela 1).

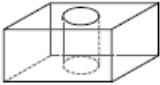



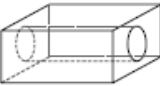


Direção da extração do cilindro *	Testemunhos fatiados *
 Vertical (V)	 Topo (T)  Centro (C)  Fundo (F)
 Horizontal (H)	 Centro (C)  Lateral (L)

Figura 1: preparação dos testemunhos - extração e fatiamento dos cilindros

(SOUZA, 2005)

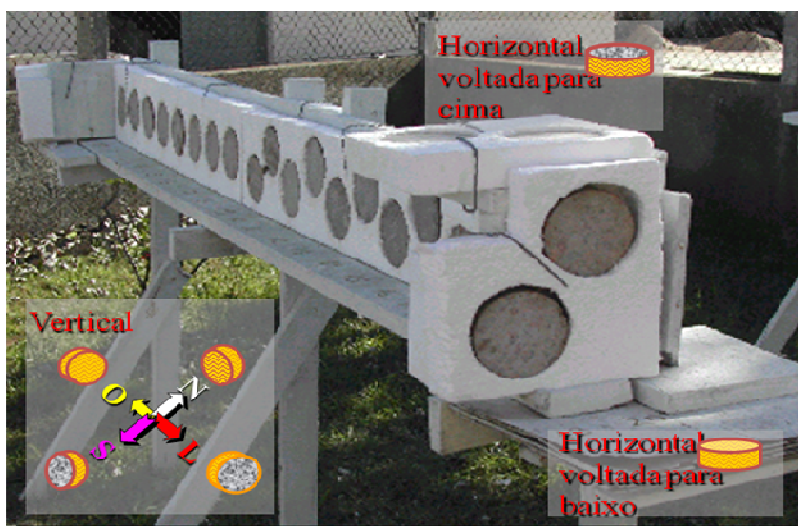


Figura 2: variação da posição dos testemunhos (SOUZA, 2005)

Tabela 1 - Identificação dos testemunhos analisados

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

*em relação à superfície de concretagem do CP.

2.2 Coleta de dados

Durante quatro anos, de 2004 a 2007, foi medido, semanalmente, de acordo com pesquisas realizadas por SOUZA [7], o GS dos testemunhos tabelados na página anterior. Esses valores foram dispostos em planilhas e então, digitalizados conforme exemplo da figura 3.

O devido cadastro e então possível acesso ao banco de dados meteorológicos, permitiu o levantamento dos valores de alguns fatores que atuam na variação do GS. Como esses dados são dispostos mensal ou diariamente e o GS medido semanalmente, foi necessário calcular a média semanal dos valores exemplificados na Tabela 2.

Posição	VS				
Testemunho	Denominação	Abs. Máx.	M. seca	M. silicone 1	M. silicone 2
1	1VCa	5,18	760,60	7,19	2,80
Estação	Data	Massa dia	Abs. Dia	GS	
INVERNO	23/06/2005	794,70	3,17	61,19	
	30/06/2005	794,10	3,09	59,67	
	07/07/2005	795,70	3,30	63,73	
	14/07/2005	794,60	3,16	60,94	
	21/07/2005	795,40	3,26	62,97	
	28/07/2005	794,60	3,16	60,94	
	04/08/2005	793,60	3,03	58,40	
	11/08/2005	793,80	3,05	58,91	
	18/08/2005	793,90	3,06	59,16	
	25/08/2005	793,50	3,01	58,15	
	01/09/05*	797,20	3,50	67,54	
	08/09/2005	794,80	3,18	61,45	
	15/09/2005	795,60	3,29	63,48	
	22/09/2005	795,10	3,22	62,21	

Figura 3: Dados referentes ao testemunho 1 - inverno de 2005

Tabela 2 - Valores fornecidos pelo Banco de dados meteorológicos

Data	Pressão Atmosférica hPa	Temperatura do ar seco °C	Temperatura Máxima °C	Temperatura Mínima °C	Umidade Relativa %	Taxa de Precipitação mm	Taxa de Evaporação mm	Temperatura do ar úmido °C	Horas de Insolação	Nebulosidade	Visibilidade
01/01/04	1.018,40	15,98	21,80	10,70	77,50	0,00	8,90	14,53	11,30	2,67	7,00
02/01/04	1.018,23	18,46	23,60	9,70	65,75	0,00	2,70	16,70	12,80	0,00	7,00
03/01/04	1.016,33	21,08	27,50	14,10	79,50	0,00	5,50	20,00	12,50	1,00	7,00
04/01/04	1.013,07	23,46	29,20	19,50	81,50	0,00	8,00	21,83	12,80	3,33	7,00
05/01/04	1.010,23	24,88	31,00	20,80	81,25	0,00	7,50	23,40	9,50	3,00	7,00
06/01/04	1.010,53	24,98	31,00	21,30	84,00	0,00	5,50	23,46	11,40	3,33	7,00
07/01/04	1.011,87	25,18	30,60	22,20	87,25	0,00	4,90	23,90	8,90	5,67	7,00
MÉDIA	1.014,09	22,00	27,81	16,90	79,54	0,00	6,14	20,55	11,31	2,71	7,00
08/01/04	1.008,60	26,36	32,00	29,00	91,00	0,00	4,20	23,53	2,30	8,67	66,67
09/01/04	1.008,17	25,14	30,00	22,70	88,00	0,20	3,90	23,93	7,20	5,33	7,00
10/01/04	1.008,20	24,20	28,60	22,60	86,25	0,00	4,70	22,73	5,20	5,67	7,00
11/01/04	1.008,37	22,76	26,00	21,00	88,50	0,40	5,20	21,67	1,20	10,00	7,00
12/01/04	1.011,47	22,48	26,40	19,80	80,00	18,80	3,20	20,87	9,80	4,67	7,00
13/01/04	1.011,50	22,14	26,40	18,50	74,00	0,00	3,90	19,67	11,60	4,67	7,00
14/01/04	1.006,93	21,76	27,40	15,20	79,25	0,00	7,00	20,50	12,30	1,67	7,00
MÉDIA	1.009,03	23,55	28,11	21,26	83,86	2,77	4,59	21,84	7,09	5,81	15,52
15/01/04	1.008,87	22,16	27,00	19,40	79,75	0,00	5,20	20,27	1,70	8,33	7,00
16/01/04	1.015,13	22,62	27,70	20,00	75,50	0,00	5,40	19,43	4,60	5,67	7,00
17/01/04	1.016,40	22,76	25,40	20,20	83,00	0,00	9,20	20,83	2,50	8,67	7,00
18/01/04	1.014,13	23,58	27,60	21,20	83,25	0,30	6,90	21,87	6,80	5,33	7,00
19/01/04	1.014,83	22,78	25,30	21,40	82,50	1,10	7,30	20,67	0,00	10,00	7,00
20/01/04	1.011,27	23,94	28,80	21,80	82,75	0,00	7,90	21,93	1,00	8,67	7,00
21/01/04	1.010,73	22,84	26,60	21,80	91,75	0,00	6,30	22,07	4,40	5,33	7,00
MÉDIA	1.013,05	22,95	26,91	20,83	82,64	0,20	6,89	21,01	3,00	7,43	7,00

3. LEVANTAMENTO ESTATÍSTICO

Os valores do GS, observados durante esses quatro anos, receberam tratamento estatístico: média por estação, média anual, média por par de testemunhos, gráficos para comparação entre o GS de famílias distintas, etc. Em seguida, os dados meteorológicos foram comparados com as médias semanais do GS dos quinze pares de famílias de testemunhos. Todos os dados foram correlacionados (figura 4).

		CORRELAÇÕES			
		2004	2005	2006	2007
CP1E2	CORREL ENTRE GS E P.ATM	0,501873	0,433571	0,331129	0,599303
	CORREL ENTRE GS E TEMP. AR SECO	-0,87047	-0,7429	-0,58793	-0,773342
	CORREL ENTRE GS E TEMP. MÁXIMA	-0,90288	-0,79412	-0,61378	-0,815716
	CORREL ENTRE GS E TEMP. MÍNIMA	-0,80135	-0,65659	-0,56119	-0,714758
	CORREL ENTRE GS E UMIDADE RELATIVA	0,322114	0,687527	0,254642	0,604764
	CORREL ENTRE GS E TAXA DE PRECIPITAÇÃO	0,333357	0,504712	0,115187	0,34121
	CORREL ENTRE GS E TAXA DE EVAPORAÇÃO	-0,80421	-0,76559	-0,61078	-0,770636
	CORREL ENTRE GS E TEMP. AR ÚMIDO	-0,85526	-0,65559	-0,54571	-0,736929
	CORREL ENTRE GS E HORAS DE INSOLAÇÃO	-0,39288	-0,71507	-0,52625	-0,590008
	CORREL ENTRE GS E NEBULOSIDADE	0,289762	0,531603	0,309051	0,377279
	CORREL ENTRE GS E VISIBILIDADE	-0,23706	-0,56217	-0,51999	-0,679925

Figura 4: Dados meteorológicos correlacionados com o GS de dois pares de testemunhos

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS / CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos, pôde-se concluir que os fatores que mais diretamente influenciam na variação do grau de saturação são *temperatura do ar seco*, *temperatura máxima*, *taxa de evaporação* e *temperatura de ar úmido*. Conclui-se também, que alguns fatores são menos importantes, podendo, talvez, serem omitidos na elaboração de um futuro modelo matemático/estatístico.

Por hora, percebe-se que esses quatro fatores, temperatura de ar seco, temperatura máxima, taxa de evaporação e temperatura de ar úmido, tem muito a contribuir para elaboração de um modelo matemático que chegue a valores do GS. O gráfico abaixo mostra a relação entre o GS e a temperatura máxima em 2004.

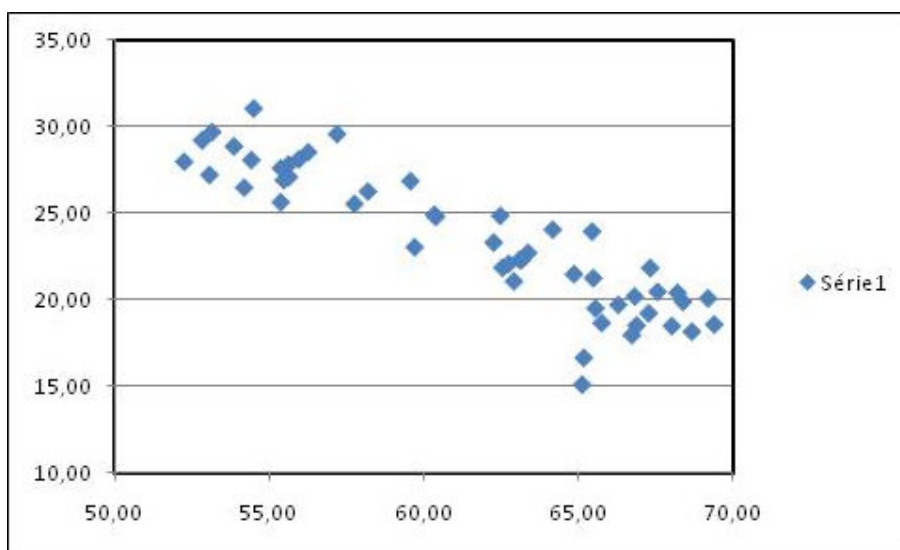


Figura 5: Relação entre o GS e temperatura máxima em 2004

O estudo sobre os fatores que influenciam na variação do GS ainda está em andamento e tem como objetivo desenvolver um modelo matemático para previsão do GS de estruturas de concreto, considerando as variações no traço, na relação água/cimento, na consistência, na posição e na superfície do concreto em questão.

Um modelo matemático que dependa de variáveis temporais, pode facilitar o cálculo do GS já que não depende de medições diretas sobre a estrutura. Ainda que essas medições possam ser realizadas semanalmente, existe o desperdício de tempo e custo com mão de obra.

O estudo deste modelo conta com a colaboração do professor Humberto Camargo Piccoli do Departamento de Materiais e Construção desta Universidade.

5. BIBLIOGRAFIA

1. ANDRADE, J. J. Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos. Porto Alegre, 2001. 256

2. CLIMENT, M.A et all. *Transport of chlorides through non-saturated concrete after an initial limited chloride supply.*
3. GUIMARÃES, A. T. C. *Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos.* São Paulo, 2000. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Engenharia Civil.
4. GUIMARÃES, A.T; HELENE P. *Difusão de cloretos e a influência do grau de saturação do concreto: ensaio em laboratório e medição de obra de uso.* Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2000.
5. GUIMARÃES, A.T; HELENE P. *Diffusion of chloride ions in unsaturated concrete: forecast of service life in a wet-dry environment.* Quality of concrete structures and recent advances in concrete materials and testing – An international conference Honoring V. Mohan Malhotra. ACI, 2005.
6. GUIMARÃES, A.T; HELENE P. *Models of variation of chloride ion diffusion as a function of changes in the saturation degree (SD) of concrete mixes prepared with pozzolanic cement.* International RILEM Workshop on Integral Service Life Modelling of Concrete Structures. Portugal, 2007.
7. SOUZA, K. et all. *Um método de medição do grau de saturação em estruturas de concreto.* Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.6, p.53-57, Março, 2005.