

Estudo probabilístico da durabilidade das estruturas de concreto armado em ambiente marítimo

Karen N. Souza¹, André. T. C. Guimarães² & Mauro Real³

¹Mestranda do Curso de Engenharia Oceânica – FURG, Rio Grande, RS – karen.n.souza@bol.com.br

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

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

Curso de Pós-graduação em Engenharia Oceânica
Fundação Universidade Federal do Rio Grande
Rio Grande – RS

RESUMO: Vários modelos de durabilidade do concreto armado em ambiente marítimo utilizam o método de Monte Carlo sem considerar a influência do grau de saturação. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise probabilística da durabilidade dessas estruturas situadas em ambiente marítimo utilizando o método de Monte Carlo, baseado na segunda lei de Fick e considerando a influência do grau de saturação. Diversos parâmetros envolvidos neste modelo são na realidade variáveis aleatórias, sendo que neste estudo, admitiu-se apenas o grau de saturação sob esta condição. Depois de realizadas inúmeras simulações de Monte Carlo, é feita uma análise estatística dos resultados obtidos. Através desta análise é possível determinar o valor esperado da vida útil da estrutura, sua variância e a probabilidade da vida útil ser inferior a um determinado valor especificado em projeto.

PALAVRAS-CHAVE: durabilidade de estruturas de concreto armado - segunda lei de Fick - grau de saturação – Monte Carlo

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância e justificativa do tema

Resultados de ensaios realizados mostraram a importância de se considerar o teor de umidade do concreto na estimativa do coeficiente de difusão dos íons cloreto no mesmo. Esta influência levanta a necessidade de se aprofundar os estudos neste sentido, visto que até então, não se tem muito relato sobre o assunto. A importância é dada principalmente pelo fato do grau de saturação estar diretamente relacionado à durabilidade de estruturas de concreto armado em ambiente marítimo.

LEA [16] e BICZÓK [7] relatam que no século passado o bom desempenho das estruturas de concreto já era pesquisado e desejado e as primeiras obras a serem estudadas foram aquelas em ambiente marítimo, visto que essas apresentaram mais cedo problemas de deterioração devido ao meio altamente agressivo.

1.2 Histórico

Em estudos sobre a vida útil de estruturas de concreto armado, passou-se a perceber a importância de se analisar algumas variáveis referentes ao assunto:

- HEDENBLAND [14] demonstrou teoricamente a influência do teor de umidade na difusão de cloretos, mostrando uma maior influência do grau de hidratação do cimento do que do GS.
- MARTYS [17] simulou com programa computacional a difusão de íons em poros médios (rede interligada) cheios com dois fluidos, sendo um predominantemente molhável, como por exemplo, a água e o ar.
- GUIMARÃES [12] desenvolveu uma pesquisa para avaliar a durabilidade de uma estrutura marinha de concreto armado, comparando seu desempenho com modelos de vida útil e normas existentes; alguns fatores observados nesta pesquisa merecem atenção especial, pois além de não serem considerados nos modelos atuais, parece atuar de forma decisiva no ataque por íons cloreto. Um destes fatores vem a ser a umidade no concreto e o outro é a posição da superfície de ataque quando da concretagem do elemento estrutural.

1.3 Objetivo

Vários modelos de durabilidade do concreto armado em ambiente marítimo utilizam o método de Monte Carlo sem considerar a influência do grau de saturação, tais como ANDRADE [1], ENRIGHT [8], FRANGOPOL [9], entre outros.

Este experimento tem como principais objetivos:

- Fazer uma análise probabilística de vida útil de uma estrutura de concreto armado, através do método de Monte Carlo;
- Verificar resultados existentes de vida útil de uma estrutura, considerando a variação do grau de saturação.

2 IMPORTÂNCIA DO GRAU DE SATURAÇÃO NA DIFUSÃO DE ÍONS

Grau de saturação (GS) - percentual de teor de umidade da massa do corpo de prova em relação à absorção de água após imersão e fervura, conforme ref.[5].

De acordo com GUIMARÃES [12], diversos ensaios de penetração de íons cloreto são utilizados atualmente, tais como PAGE et al. [19]; PRUDÊNCIO [20]; ANDRADE [2]; GJØRV et al. [10], mas quase todos encontrados na literatura pesquisada são realizados na condição de corpos de prova saturados em água. Somente ensaio que correlaciona o sentido do vapor da água com o coeficiente de difusão, conforme estudos experimentais descritos por MEHTA et al. [18], é em condição não saturado.

O que se observa na realidade, é uma variação do teor de umidade do concreto na sua camada mais externa (processo de molhagem e secagem), sendo que é por essa camada que penetram os agentes externos que atacam o concreto, no caso do cloreto, até atingir a barra de aço, despassivando-a.

3 2ª LEI DE FICK

A previsão da vida útil das estruturas de concreto é realizada através da medição dos teores de íons cloreto a profundidades especificadas no elemento estrutural, em um determinado tempo:

$$C(x,t) = C_s \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4tD}} \right) \right] \quad (1)$$

Onde:

$C(x,t)$ = concentração de íons cloretos em relação à massa de cimento na profundidade x a partir da superfície do concreto em um dado tempo t (%)

C_s = concentração superficial de cloretos (admitida como sendo constante) (%)

x = profundidade (cm)

D = coeficiente de difusão de cloretos (cm²/ano)

t = tempo (anos)

erfc = função complementar do erro de Gauss

Dado que [12]:

$$D_{Const.Cl^-(real)} = D_{Const.Cl^-(lab)} \times R_C \times R_T \times R_{GS} \times R_{SC} \quad (2)$$

Sendo:

$D_{Const.Cl^-(real)}$ = Coeficiente de difusão real dos íons cloreto

$D_{Const.Cl^-(lab)}$ = Coeficiente de difusão constante obtido em laboratório

R_C = Coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido ao concreto

R_T = Coeficiente médio anual de diminuição do coeficiente de difusão devido à temperatura

R_{GS} = Coeficiente de redução do coeficiente de difusão efetivo devido à variação do GS

R_{SC} = Coeficiente de redução devido à diferença da posição da superfície exposta em relação a concretagem

Podemos também escrever:

$$\frac{C(x,t)}{C_s} = 1 - \operatorname{erf}(z) \quad (3)$$

Onde:

$\operatorname{erf}(z)$ = função de erro de Gauss

z = valor da função de erro de Gauss

Algumas condições de contorno foram estabelecidas para uma adequada aplicação do modelo proposto, tais como:

- Admite-se que o concreto é um material homogêneo e isotrópico;
- Considera-se que o único mecanismo de transporte atuante é a difusão;
- Admite-se que não ocorrem interações entre os cloretos e os componentes do concreto no momento da penetração;
- Tanto o coeficiente de difusão quanto à concentração superficial de cloretos são constantes ao longo do tempo, isto é, o coeficiente de difusão é completamente independente da concentração superficial.

4 SIMULAÇÕES – O MÉTODO DE MONTE CARLO

ANG e TANG [3] definem simulação como o processo de tentar reproduzir o mundo real com base em um conjunto de hipóteses e modelos idealizados da realidade. Para fins de engenharia, a simulação pode ser aplicada para prever ou estudar a resposta de um sistema. Através de repetidas simulações, a sensibilidade da resposta do sistema à variação dos parâmetros de entrada pode ser avaliada. Para problemas envolvendo variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecida (ou suposta), emprega-se a técnica de simulação de Monte Carlo.

Segundo REAL [21], o princípio do método de Monte Carlo é desenvolver um modelo analítico, baseado em um programa de computador, capaz de reproduzir o comportamento do sistema. Sendo um ou mais parâmetros variáveis aleatórias, a análise do sistema é realizada várias vezes. Cada análise (chamada de ciclo de simulação ou tentativa) é baseada em um conjunto de parâmetros de entrada, obtidos de forma aleatória, de acordo com as distribuições de probabilidade que lhes foram atribuídas. Como resultado, diversas previsões de comportamento do sistema são obtidas. Então, métodos estatísticos são empregados para determinar os momentos e os tipos de distribuição de probabilidade das variáveis da resposta, que representam o comportamento do sistema.

A Fig. 1, adaptada por GRANT, L.H. et al. [13], esquematiza o funcionamento do método de Monte Carlo:

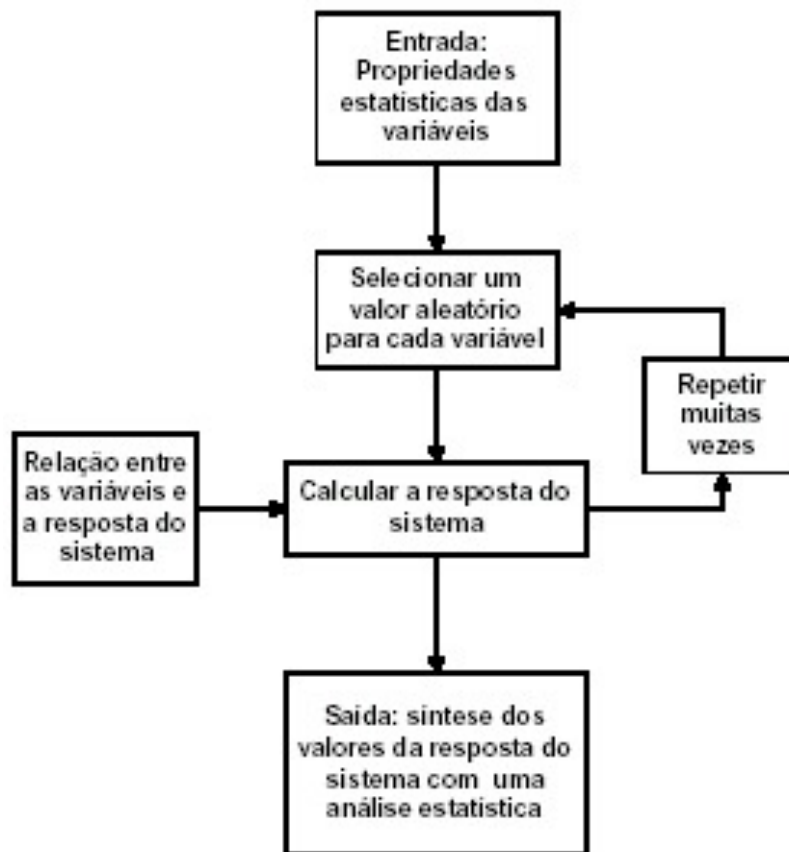


FIGURA 1 – Esquema do funcionamento do método de Monte Carlo [21]

As etapas analíticas e computacionais que são necessárias para a realização de simulações de Monte Carlo são definidas por AYYUB e MCCUEN [6]:

- Definição do sistema;
- Geração das variáveis aleatórias de entrada do sistema;
- Realização da análise do sistema através do modelo matemático elaborado;
- Análise estatística da resposta obtida;
- Estudo da eficiência e da convergência do método.

A definição do sistema deve incluir a definição de suas condições de contorno, parâmetros de entrada, parâmetros da resposta e o modelo que relaciona os dados de entrada com os resultados. A definição dos dados de entrada do sistema deve incluir suas características probabilísticas, isto é, o conhecimento de seus momentos estatísticos e o tipo de suas distribuições de probabilidade. Os parâmetros de entrada são, então, gerados e fornecidos ao modelo para a obtenção dos parâmetros da resposta. Através da repetição do processo n vezes, n conjuntos de parâmetros de resposta são obtidos. Métodos estatísticos podem ser agora empregados para determinar, por exemplo, o valor esperado (média), a variância, ou o tipo de distribuição de probabilidade dos parâmetros da resposta do sistema.

Neste trabalho, a previsão da vida útil de uma estrutura é uma função de vários parâmetros, onde a variável aleatória (grau de saturação) tem distribuição de probabilidade Lognormal

(visto que a distribuição normal logarítmica é útil de ser empregada quando os valores da variável aleatória forem sempre positivos).

Os parâmetros de entrada do sistema são: média e desvio padrão correspondentes a cada estação do ano (verão, outono, inverno, primavera), valor de z da função erro de Gauss, tempo (t), coeficiente de difusão constante obtido em laboratório ($D_{Const.Cl^-(lab)}$) e o cobrimento da armadura (c).

O parâmetro da resposta é a margem (M), ou seja, a diferença entre o cobrimento da armadura e a profundidade de ataque por íons cloreto (X).

$$M = c - X$$

(4)

Sempre que:

$$M \leq 0 \rightarrow \text{Ocorre uma falha}$$

O modelo utilizado para representar o comportamento da estrutura de concreto está descrito no item 3.

Após a realização das simulações, é possível determinar-se para o parâmetro da resposta, cujos valores obtidos durante as n simulações são armazenados, o valor esperado (média), o desvio padrão, o coeficiente de variação, a convergência do valor esperado e do desvio padrão com o aumento do tamanho da amostra, o intervalo de confiança com uma certa probabilidade de ocorrência, além de outras características estatísticas da resposta.

5 DEFINIÇÃO DO ÍNDICE DE CONFIABILIDADE

A definição do valor do índice de confiabilidade (β) depende de uma série de fatores, onde o mais importante deles é o que diz respeito aos níveis de desempenho definidos para a estrutura. Estes devem ser previamente especificados pelo projetista, a fim de separar claramente os limites entre os estados de falha e segurança estabelecidos.

- Estados limites últimos, que se referem a eventos que apresentam consequências irreversíveis, geralmente associados com elevados prejuízos financeiros e/ou perdas humanas;
- Estados limites de serviços, que estão relacionados a eventos que restringem de alguma forma a adequada utilização da estrutura. Neste caso em particular, os prejuízos de ordem econômica são restritos e as perdas humanas não são esperadas.

De acordo com REAL [21], quanto maior for o índice de confiabilidade de uma estrutura, em relação a um certo Estado Limite, menor será a sua probabilidade de falha em relação a este. Este parâmetro é útil para poder comparar o nível de segurança atingido no projeto de diversas estruturas com relação a um determinado Estado Limite.

6 APLICAÇÃO DO MÉTODO

6.1 Metodologia

Para a realização deste estudo foram utilizados dados de entrada estabelecidos por GUIMARÃES [12], assim como, parâmetros de saída (descritos nos itens seguintes), com o intuito de reavaliar resultados já existentes e obter maior precisão para tais, utilizando o método de Monte Carlo na previsão da vida útil de uma estrutura.

6.2 Localização da obra pesquisada

A pesquisa de desempenho do concreto em ambiente marinho realizou-se no Terminal de Contêineres – TECON, no complexo portuário da cidade do Rio Grande, localizado na região sul do estado do Rio Grande de Sul. Esse terminal foi construído na margem oeste do canal de acesso ao Porto do Rio Grande.

6.3 Dados utilizados

Como já fora feito referência anteriormente, um dos modelos mais utilizados para a previsão da vida útil de uma estrutura de concreto armado em ambiente marítimo, basea-se na segunda lei de Fick. No entanto, alguns parâmetros envolvidos neste modelo são na realidade variáveis aleatórias e outros são considerados como dados fixos, segundo bibliografias pesquisadas.

A seguir são descritos os parâmetros tomados de entrada para a realização do estudo estatístico que é proposto neste trabalho.

6.3.1 Aplicação dos fatores de influência na difusão de íons cloreto

Parâmetro considerado como variável aleatória:

- Coeficiente de redução do coeficiente de difusão efetivo devido à variação do GS (R_{GS})

Através de ensaio difusão de íons cloreto em pasta de cimento endurecida com diferentes teores de umidade, realizado por GUIMARÃES [12], obteve-se os seguintes resultados:

TABELA 1 – Valores do coeficiente de difusão efetivo em função dos GS's [12]

Grupo	Def - cm ² /s	GS - %
I	1,84E-09	57,2 ± 9,8

II	5,66E-09	74,8 ± 9,8
III	6,51E-09	90,2 ± 9,8
IV	2,04E-08	97,7 ± 9,8

Esses resultados são representados no gráfico da Fig. 2, que mostra a relação entre o maior coeficiente de difusão e os demais valores.

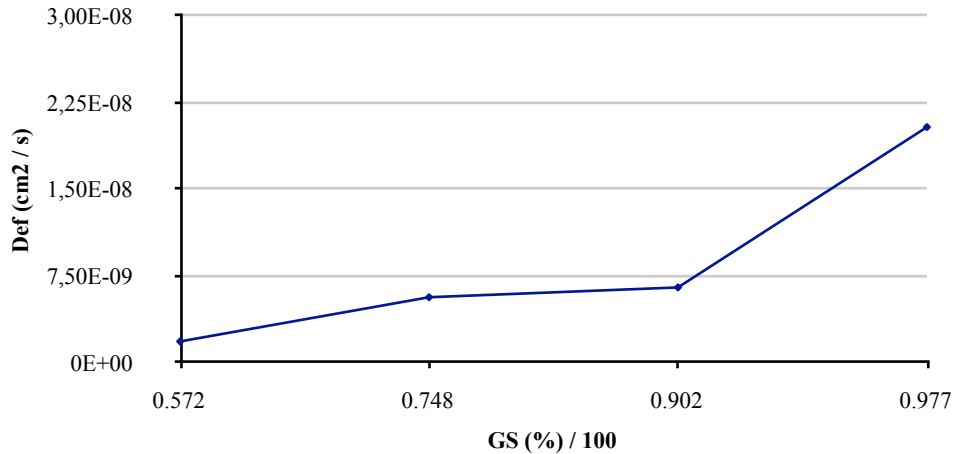


FIGURA 2 - Coeficiente de difusão efetivo em função do GS e a relação entre o maior coeficiente de difusão e os demais valores

A medição do teor de umidade da estrutura em estudo foi realizada por BRETÂNHA, Sônia, mestranda em Engenharia Oceânica (FURG), que realiza estudos em paralelo. Os dados correspondem ao ponto nomeado como PS.

A análise dos resultados foi feita utilizando-se o programa *Statistica for Windows* versão 6 e estão indicadas na Tabela 2.

TABELA 2 – Descrição estatística do Grau de saturação (GS) para cada estação do ano

Estação	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Primavera	38	75,1855	69,6069	84,2333	4,1937
Verão	40	71,4628	67,4414	77,1670	2,8484
Outono	24	74,3084	68,9230	78,0788	2,3369
Inverno	31	77,2078	72,7601	82,7137	3,2479

Onde:

N = total de dados (dias) durante a estação

Os dados da Tabela 1 nos permitem calcular o R_{GS} correspondente a cada estação (através de interpolação) e posteriormente o R_{GS} anual (média entre os quatro valores encontrados).

Parâmetros considerados como dados fixos:

- Coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido ao concreto (R_C)

De acordo com GUIMARÃES [12], o coeficiente de difusão efetivo foi obtido comparando-se o valor da resistência à compressão do concreto com valores obtidos na bibliografia pesquisada, HELENE [15] e GJØRV [10].

Logo, como coeficiente de redução do coeficiente de difusão devido ao concreto tem-se:

$$R_C = 0,64$$

- Coeficiente médio anual de diminuição do coeficiente de difusão devido à temperatura (R_T)

A influência da temperatura é obtida pela equação de Arrhenius:

$$D_T = D_0 \times e^{-k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (5)$$

Onde:

D_T = Difusividade efetiva a temperatura T;

D_0 = Difusividade efetiva a temperatura T_0 ;

k = Constante de reação;

T, T_0 = Temperaturas em $^{\circ}\text{K}$.

Segundo GUIMARÃES [12], PAGE et al. [19] realizaram ensaios de difusão de íons cloreto com variação da temperatura, onde com os resultados, obteve-se o valor k.

Considerando temperaturas médias por estação, calculadas sobre valores de temperatura diária dos anos de 1988 a 1998 (FURG – Instituto Nacional de Meteorologia), e T_0 de $22,5^{\circ}\text{C}$, obtém-se o coeficiente médio anual de diminuição do coeficiente de difusão:

TABELA 3 – Grau de saturação (GS) para cada grupo de CP's [12]

$T_0 = 22,5^{\circ}\text{C} = 295,5\text{ K}$				
$k = 5139,05$				
Meses	$T_i (^{\circ}\text{C})$	$T_i (\text{K})$	R_T	Média
Verão	23,4	296,4	1,05	
Outono	16,46	289,46	0,7	0,81
Inverno	14,37	287,37	0,61	
Primavera	20,33	293,33	0,88	

Onde:

$$R_T = e^{-k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (6)$$

- Coeficiente de redução devido à diferença da posição da superfície exposta em relação a concretagem (R_{SC})

Em pesquisa realizada por GUIMARÃES et al. [11], que verifica o efeito da superfície em relação a superfície de concretagem, relacionando resultados de testemunhos de face lateral com testemunhos extraídos do centro dos CP's, obteve-se o seguinte coeficiente de redução:

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

Assim, em posse desses coeficientes e conforme o ábaco proposto por HELENE [15], onde é estabelecido o coeficiente de difusão considerado constante obtido em laboratório

($D_{Const.Cl^-(lab)}$) igual a 342×10^{-10} , calcula-se o coeficiente de difusão real dos íons cloreto

($D_{Const.Cl^-(real)}$), como descrito na Equação 2.

6.3.2 Tempo (t)

O tempo adotado neste estudo corresponde à idade da estrutura quando analisada por GUIMARÃES [12]:

$$t = 22 \text{ anos}$$

6.3.3 Concentração superficial de cloretos (C_s)

Com o perfil de penetração de cloretos, determina - se o valor da concentração superficial (C_s):

$$C_s = 2,76\%$$

A Tabela 4 caracteriza o perfil de teor de íons cloreto para o traço de concreto utilizado na estrutura:

TABELA 4 – Perfil de teor de íons cloreto

x (mm) [12]	Cx medido (mm) [12]	$\frac{x}{2} \times \sqrt{Dt}$	Cx / Cs	\sqrt{Dt}	Cx teórico
2,5	2,0732	0,1053	0,8816	11,8671	2,4332
7,5	1,8065	0,3160	0,6550	11,8671	1,8077
12,5	1,4677	0,5267	0,4564	11,8671	1,2596
17,5	0,6774	0,7373	0,2971	11,8671	0,8199
22,5	0,5645	0,9480	0,1800	11,8671	0,4969
27,5	0,2823	1,1587	0,1013	11,8671	0,2796
32,5	0,2258	1,3693	0,0528	11,8671	0,1457
37,5	0,0565	1,5800	0,0255	11,8671	0,0703
	0,9829				0,9829

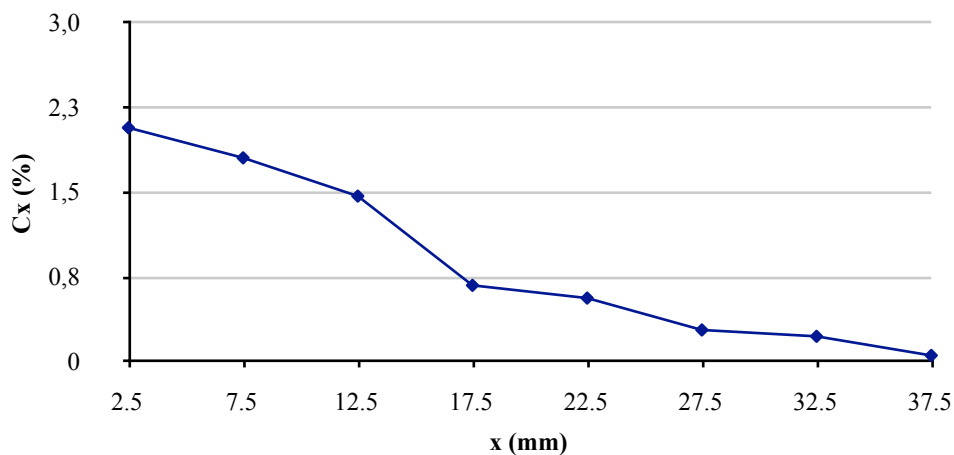


FIGURA 3 – Perfil de teor de íons cloreto

6.3.4 Concentração de íons cloretos livres em relação à massa de cimento na profundidade x a partir da superfície do concreto em um dado tempo ($C(x, t)$)

O teor de íons cloreto livres em relação à massa de cimento que despassiva o aço em um determinado tempo t (C_x, t) foi considerado:

$$C(x, t) = 0,4\%$$

6.3.5 Probabilidade de falha (Pf)

Conforme GUIMARÃES [12], a extração da amostra de concreto para análise química foi realizado com furadeira em camadas de 5 mm até a profundidade de 40 mm. Foi extraído material em seis pontos da estrutura, sendo que em cada ponto foram realizados 20 furos. O material extraído da mesma profundidade foi misturado formando apenas uma amostra para ensaio conforme ref. [4].

Por isso, devido ao método de amostragem, admitiu-se uma probabilidade de falha de 50%.

6.3.6 Valor do z da função erro de Gauss

Para se obter o valor da profundidade da frente de ataque de íons cloreto, deve-se conhecer o valor da função erro de Gauss.

Com os valores de C_s e $C(x,t)$, podemos calcular $erf(z)$, conforme a Equação 3.

Logo:

$$erf(z) = 0,8551$$

O que corresponde à:

$$z = 1,03$$

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após definição das condições de contorno, parâmetros de entrada, parâmetros da resposta e o modelo que relaciona os dados de entrada com os resultados, foram gerados os parâmetros de entrada e fornecidos ao modelo para a obtenção do parâmetro da resposta.

Através da repetição do processo 10000 vezes, foram obtidos resultados para a margem (item 4).

O que se fez foi variar os dados de entrada, mais especificamente o revestimento, até que se alcançasse uma probabilidade de falha igual a 50% ou aproximadamente. O revestimento encontrado foi de 32,1 mm.

Os resultados obtidos foram:

$$\blacksquare Pf_1 = 0,5004 \quad \rightarrow \quad IND = 5004 \quad \rightarrow \quad BETA = -1,002 \text{ E-}003$$

$$\blacksquare X_{MED} = 6,6813\text{E-}003 \quad \rightarrow \quad BETA = 9,5057 \text{ E-}002 \quad \rightarrow \quad Pf_2 = 0,4621$$
$$DP = 7,0287\text{E-}002$$

Onde:

$$Pf_1 = \frac{IND}{N^{\circ} \text{ total de simulações}} \quad (6)$$

Sendo:

IND = N° total de falhas

Este resultado correspondem à um β negativo, o que é explicado pelo fato da Pf_1 ser maior que 50%.

Métodos estatísticos podem ser agora empregados para determinar, por exemplo, o valor esperado (média), a variância, ou o tipo de distribuição de probabilidade dos parâmetros da resposta do sistema.

A análise da distribuição da margem mostrou que a mesma não se adapta a uma distribuição normal de probabilidade, cujos parâmetros são o valor esperado e o desvio padrão determinados através das simulações de Monte Carlo.

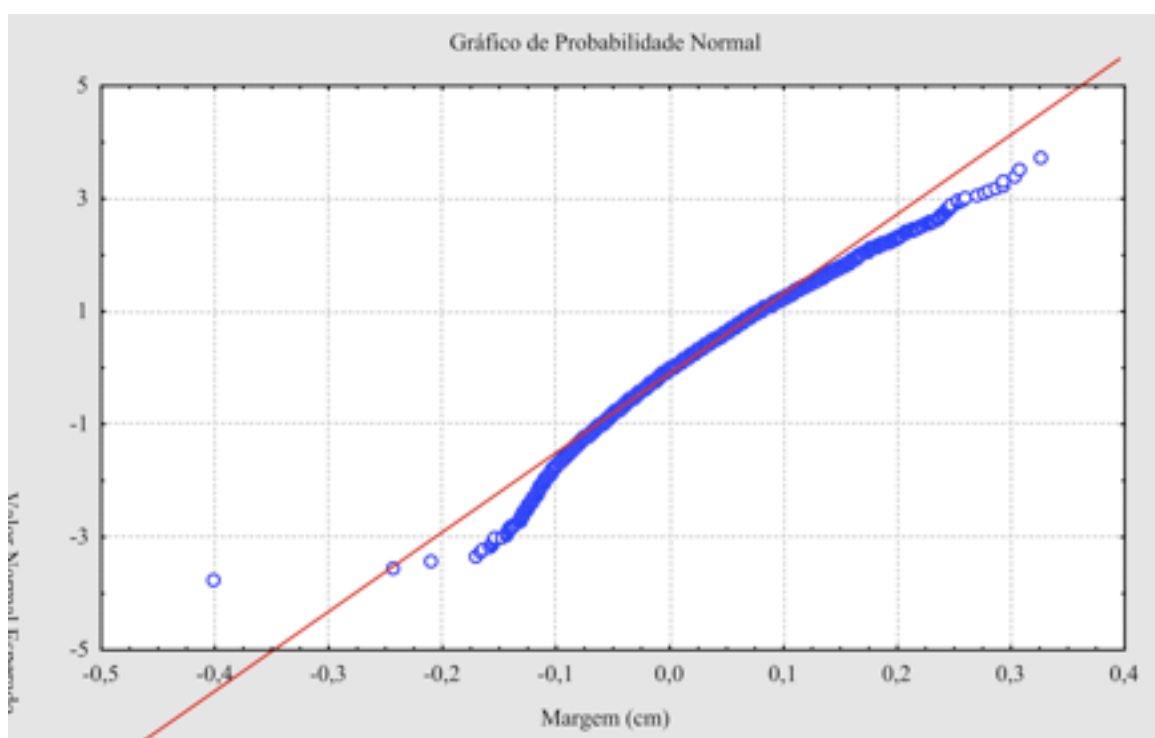


FIGURA 4 – Distribuição dos dados da margem

Desta forma, não é possível realizar o estudo da eficiência e da convergência do método, visto que Pf_2 só pode ser considerado quando os dados do parâmetro se enquadram como uma distribuição normal.

Uma solução seria caracterizar o tipo de distribuição encontrada e assim teríamos como conhecer Pf_2 correspondente aos parâmetros da resposta do sistema, permitindo assim, realizar tal convergência, efetuando o número ideal de simulações.

No entanto, ficaremos apenas com os resultados correspondentes à Pf_1 , o que já nos dá resultados de total confiança.

Portanto, o valor 32,1 mm que corresponde à profundidade de penetração de íons cloretos em 22 anos, com probabilidade de falha de 50%, apresentou uma diferença de 26% a mais em relação ao obtido com o perfil de cloretos medido na estrutura, que é de 25,4 mm (através do perfil de teor de íons cloreto para o traço de concreto utilizado na estrutura, descrito na Tabela

4, chega-se por interpolação no valor da profundidade de penetração correspondente para o teor de 0,4% de cloretos livres em relação à massa de cimento).

GUIMARÃES [12] ao aplicar seu modelo de durabilidade, encontrou uma diferença de 17%, porém, usou como C_s o valor de C_x para uma profundidade de 2,5 mm.

8 CONCLUSÕES

Dentro dos objetivos deste trabalho que são fazer uma análise probabilística de vida útil de uma estrutura de concreto armado através do método de Monte Carlo e verificar resultados existentes de vida útil de uma estrutura considerando a variação do grau de saturação, pode-se verificar que:

- O uso do método de Monte Carlo para a previsão da vida útil de estruturas mostrou-se bastante eficiente, visto que, comparado os resultados obtidos com os de outros modelos, mostrou-se bem próximo da realidade;
- O GS tem grande influência sobre a difusão de cloretos, sendo que esse fator deve ser considerado em modelos de vida útil de concreto armado;
- Em trabalhos futuros, o método de Monte Carlo deve ser considerado também para os outros fatores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANDRADE, J.J.O.; **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**, Porto Alegre, 2001. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia.
- 2 ANDRADE, M.C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from Ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v.23, p.724-742. USA, Pergamon Press Ltd. , 1993.
- 3 ANG, A. H-S.; TANG, W. H.. **Probability concepts in engineering planning and design. Volume I: basic principles**. New York, John Wiley & Sons, 1975.
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete - ASTM C 1218-92. In: **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia, 1993.
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e concreto endurecidos-Determinação da absorção de água por imersão-Índice de vazios e massa específica - NBR-9778**. 1987.
- 6 AYYUB, B.M.; MCCUEN, R.H. Simulation-based reliability methods. In: SUNDARARAJAN, C. (Ed.). **Probabilistic structural mechanics handbook**; theory and industrial applications. New York, Chapman & Hall, 1995. Cap. 4, p. 53-69.
- 7 BICZÓK, I. **Corrosion y proteccion del hormigon**. Trad. Emilio J. Dócon Asensi. Bilbao, Ediciones Urmo, 1972.
- 8 ENRIGHT, M.; FRANGOPOL, D. Probabilistic Analysis of Resistance Degradation of Reinforced Concrete Bridge Beams Under Corrosion. **Engineering Structures**, v. 20, nº 11, 1998. p. 960-971.

- 9 FRANGOPOL, D.; LIN, K.; ESTES, A. Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures. *Journal of Structural Engineering*. v. 123, nº 10, 1997. 1390-1401.
- 10 GJØRV, O.E.; TAN, K.; ZHANG, M. Diffusivity of chlorides from seawater into highstrength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v.91, sep./oct, p.447-52. USA, ACI, 1994.
- 11 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.
- 12 GUIMARÃES, A.T.C.; **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**, São Paulo, 2000. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Engenharia Civil.
- 13 GRANT, L.H.; MIRZA, S.A.; MacGREGOR, J.G. Monte Carlo study of strength of concrete columns. *ACI Journal*, v. 75, p. 348-358, Aug. 1978
- 14 HEDENBLAND, G. Influence of moisture and carbonation on the transport of chlorides in concrete - some ideas. In: CORROSION OF REINFORCEMENT - FIELD AND LABORATORY STUDIES FOR MODELLING AND SERVICE LIFE, Lund, Feb/1995. **Proceedings**. Lund, Kyösti Tuutti, 1995. p. 227-37.
- 15 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).
- 16 LEA, F.M. **The chemistry of cement and concrete**. Great Britain, Edward Arnold Ltd, 1970.
- 17 MARTYS, N. S. Diffusion in partially-saturated porous materials. **Materials and Structures**, v.32, p.555-62, 1999.
- 18 MEHTA, P. K.; SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. Performance and Durability of Concrete Systems. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 9., New Delhi, Nov. /1992. **Proceedings**.
- 19 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.

- 20 PRUDÊNCIO JR., L.R.. **Contribuição à dosagem do concreto projetado**. São Paulo, 1993(a). Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.
- _____. Durabilidade de concreto frente ao ataque de cloretos e sulfatos. In: SEMINÁRIO NORIE-UFRGS: QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, Porto Alegre, 1993. **Anais**. Porto Alegre, s.ed., dez. 1993(b). p. 1-12.
- 21 REAL, M.V.; **Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos**, Porto Alegre, 2000. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia.