

ESTUDO DE CASO :PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO EM AMBIENTE MARINHO POR MEIO DE ANÁLISE DE MONTE CARLO

Félix Krolow Sell Junior¹, Gustavo Bosel Wally², Cristian da Conceição Gomes³, Fernando Ritiéle Teixeira⁴, Fábio Costa Magalhães⁵, Mauro de Vasconcellos Real⁶

Resumo

O concreto é o material de construção mais utilizado na construção de estruturas marinhas. Porém estas estruturas estão sujeitas a ação de íons cloreto, que quando rompem a camada de passivação do concreto podem iniciar o processo de corrosão das armaduras. A corrosão de armaduras induzida pela ação de cloretos é a maior ameaça a durabilidade de estruturas de concreto armado. Devido aos problemas de corrosão em armaduras e durabilidade das estruturas, foram desenvolvidos métodos de previsão de vida útil de estruturas. Estes métodos de previsão de vida útil se baseiam em simulações, que buscam representar o comportamento de um determinado sistema. Assim este trabalho, teve como objetivo avaliar a vida útil de uma estrutura de um molhe de concreto armado localizado na Suécia, por meio de simulação de Monte Carlo com base na segunda lei de difusão de Fick. Para tanto, verificou-se o cobrimento de concreto necessário da estrutura para uma vida útil de projeto nas idades de 50, 100 e 150 anos, considerando uma probabilidade máxima de falha de 10%. Como esperado se obteve como resultado um aumento da espessura de cobrimento de concreto com o aumento da vida útil projetada.

Palavras-chave: Concreto; vida útil; simulação de Monte Carlo.

Abstract

Concrete is the building material most commonly used in the construction of marine structures. However, these structures are subject to the action of chloride ions, which when breaking the passivation layer of the concrete can initiate the process of corrosion of the reinforcement. The corrosion of reinforcements induced by the action of chlorides is the greatest threat to the durability of reinforced concrete structures. Due to the problems of corrosion in reinforcement and durability of structures, methods of predicting the useful life of structures have been developed. These life-prediction methods are based on simulations, which seek to represent the behavior of a given system. The aim of this work was to evaluate the useful life of a structure of a reinforced concrete jetty located in Sweden by means of Monte Carlo simulation based on the second Fick diffusion law. For this, the necessary concrete cover of the structure was verified for a project lifetime at the ages of 50, 100 and 150 years, considering a maximum

¹ Mestrando pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: felixsell@gmail.com.

² Mestrando pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: gustavo.wally@gmail.com.

³ Mestrando pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: cristianconceicao8@gmail.com.

⁴ Mestrando em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Pelotas-UFPEL, técnico de Laboratório/Edificações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul-IFRS, campus Rio Grande. E-mail: fernandoteixeira5400@gmail.com.

⁵ Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, professor e responsável pelo Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil – LEMCC do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul-IFRS, campus Rio Grande. E-mail: fabiocmagalhaes@gmail.com.

⁶ Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, professor titular da Escola de Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: mvrealgm@gmail.com.

probability of failure of 10%. As expected, an increase in the thickness of concrete cover with the increase in the projected life was obtained.

Keywords: Concrete; useful life; Monte Carlo simulation.

Introdução

O concreto é o material de construção estrutural mais utilizado na construção de estruturas marinhas. Isto se deve a alguns fatores como grande resistência a água, facilidade com que os elementos de concreto estruturais podem ser formados em uma variedade de formas e tamanhos, baixo custo e fácil disponibilidade de materiais componentes. (MEHTA, 2005).

Porém vários processos de deterioração podem afetar a durabilidade e o desempenho de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. Alguns processos de deterioração do concreto como as relações álcali-agregados, gelo e degelo, assim como ataques químicos representam um grande potencial de ameaça a estruturas de concreto. Porém a mais grave ameaça a durabilidade e ao desempenho de muitas estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras induzidas por cloretos. (GJØRV, 2015).

Sendo os íons cloreto os principais agentes causadores da deterioração de estruturas de concreto armado por meio da corrosão das armaduras. Segundo o comitê 222 do ACI (1991) os íons cloreto são o agente motivador da maior ocorrência precoce de corrosão do aço. Ainda segundo o comitê a corrosão induzida por cloretos se distingue da corrosão por carbonatação por ser mais rápida e mais comum.

Deste modo o mecanismo de penetração tem forte influência no desenvolvimento da corrosão no concreto armado. Os íons de cloreto que penetram no interior do concreto são responsáveis pelo aumento da condutividade elétrica do eletrólito facilitando a corrosão das armaduras. A taxa de penetração de cloreto através do concreto depende de diversos fatores, que incluem o local onde a estrutura de concreto está exposta (incluindo o microclima e a situação de contato com o cloreto), a água e o oxigênio. (MEDEIRO; HELENE, 2003).

Porém o concreto possui uma elevada capacidade de proteger armaduras contra a corrosão, o que se deve principalmente a passivação eletroquímica das armaduras na solução altamente alcalina presente nos poros do concreto. Porém, a corrosão pode iniciar no momento em que a passivação é rompida parcialmente ou completamente, seja devido a carbonatação ou a ação de cloretos. Quando há corrosão, o potencial eletroquímico da armadura se torna mais negativo, e acaba formando áreas anódicas, enquanto que outras porções do aço, aonde o potencial passivo está intacto, atuarão como áreas de captação de oxigênio e formarão áreas catódicas. Se a resistência iônica do concreto estiver suficientemente baixa, o sistema de atividade das células de corrosão do tipo galvânico desenvolve-se ao longo da armadura. Nas

células galvânicas ocorre um fluxo de corrente, em que a intensidade determina a taxa de corrosão. O tamanho e geometria das áreas anódica e catódica nas células galvanizadas são fatores importantes, a taxa de corrosão é controlada principalmente pela resistividade iônica do concreto e pela disponibilidade de oxigênio para o processo catódico. (GJØRV, 2015).

A corrosão das armaduras de concreto armado depende de alguns fatores como o ambiente aonde está exposta a estruturas, concentração superficial de cloretos, espessura de cobertura da armadura, resistência do concreto a penetração de cloretos, disponibilidade de oxigênio, temperatura, umidade relativa.

No território nacional o problema relacionado a deterioração de estruturas de concreto armado, devido a corrosão de armaduras se estende por todo o país. Em zonas costeiras este problema desperta maior preocupação. (MEIRA, 2017).

O impacto financeiro da corrosão das armaduras de concreto sob a economia do país é tão grande que segundo a professora Joseanne Dotto (2012), em uma pesquisa realizada na cidade de Recife constatou-se que 64% das patologias em estruturas de concreto estão relacionadas à corrosão por íons de cloreto. A problemática da corrosão de armaduras como resultante do ataque de cloretos é tão alarmante que segundo essa professora o gasto em obras públicas para recuperar as estruturas danificadas pela ação de cloretos gira em torno 800 milhões por ano. Já nos Estados Unidos, mais de 1/3 do investimento na construção civil é destinado as obras de recuperação (CARMONA FILHO; CARMONA, 2009).

Devido aos problemas de corrosão em armaduras e durabilidade de estruturas e com a grande evolução que vem ocorrendo nos últimos anos nas mais diversas áreas do conhecimento, a previsão da vida útil das estruturas de concreto armado relativa à etapa de iniciação do processo corrosivo pode ser estimada minimizando-se a incerteza implícita nos resultados. (ANDRADE, 2001).

Estas estimativas podem ser realizadas por meio de modelos para projetos de durabilidade de estruturas de concreto por meio de probabilidade, sendo a simulação de Monte Carlo um dos modelos bastante utilizados para resolver estes problemas.

A simulação é um processo de reprodução do comportamento de um determinado fenômeno no mundo natural, aonde esse modelo se baseia em assertivas determinadas a partir da observação. (ANG; TANG, 1984).

Em engenharia o conceito simulação está relacionado ao estudo do desenvolvimento e ou respostas de um determinado sistema. Neste sistema são adotados valores específicos para as variáveis que influenciam no projeto, assim obtendo-se uma determinada resposta para o

sistema. Através da realização de simulações sucessivas é possível avaliar o comportamento do sistema em função da variação dos parâmetros intervenientes.

Segundo Ang e Tang (1984) o processo de simulações é um procedimento bastante útil no sentido de otimizar um determinado projeto. O processo de simulação representa ainda uma excelente ferramenta para se modelar o comportamento de um determinado sistema. Este método foi empregado por Krakovski (1995) para avaliar o controle de qualidade do concreto.

De acordo com Real (2000) o método de Monte Carlo tem como objetivo desenvolver um modelo analítico, baseado em um programa de computador, capaz de reproduzir o comportamento de um sistema. Considerando uma 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, obtêm-se diversas previsões de comportamento do sistema. Então, são empregados métodos estatísticos para determinar os momentos e os tipos de distribuição de probabilidade das variáveis da resposta, que representam o comportamento do sistema.

E nesse contexto, a partir de uma simulação de Monte Carlo este trabalho analisa a durabilidade de uma estrutura de concreto armado localizada em ambiente marinho sujeito ao ataque de íons cloretos. Neste estudo foi realizada uma previsão da vida útil de um molhe de concreto armado localizado na Suécia, para descrever a penetração de íons cloretos no concreto, com base na segunda lei de difusão de Fick.

A segunda lei de difusão de Fick é geralmente utilizada para realizar o cálculo da penetração de íons cloretos no concreto. A partir desta lei é possível estabelecer a vida útil de estruturas de concreto armado por meio do coeficiente de difusão do concreto, espessura de cobertura, concentração de cloretos, fator de envelhecimento da estrutura e temperatura de exposição. (JUSTNES, 2016).

1 Metodologia

1.1 Cálculo da concentração de cloretos

Existem diferentes modelos de previsões empíricas para o ingresso de cloretos no concreto (DURACRETE, 1998). No entanto, todos são baseados na segunda lei de Fick, mas podem exigir dados de entrada diferentes. A solução desta equação diferencial pode ser dada de acordo com a Eq. 1. (MARKESET, 2000).

$$C(x, t) = C_0 + (C_S - C_0) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D(t) \cdot t}}\right) \quad (1)$$

Onde:

$C(x,t)$ = concentração de cloretos na profundidade X ;

C_0 = concentração inicial de cloretos no concreto;

C_s = concentração de cloretos na superfície exposta (valor de ajuste obtido e não o valor real da superfície);

t = tempo de exposição;

X = profundidade de cobrimento;

Erfc = complemento da função de erro de Gauss;

$D(t)$ = Coeficiente de difusão;

Nesta equação, a concentração calculada de cloreto de superfície C_s representa a carga ambiental e o coeficiente de difusão de cloreto, $D(t)$, caracteriza a capacidade do material em suportar a entrada de cloretos.

As soluções originais da equação diferencial trataram esses parâmetros como independentes do tempo. Pesquisas mais recentes indicam que ambos os parâmetros têm alguma variação no tempo. No entanto, para um tempo de exposição maior que 2 a 5 anos, uma precisão suficiente pode ser alcançada tratando a concentração de cloreto de superfície como independente do tempo. (MARKESET, 2000).

A concentração calculada de cloreto na superfície depende do microclima, como distância à água do mar, efeitos de sotavento e disposição geométrica, resultando em diferenças locais na acumulação de íons cloreto (por exemplo, zonas de respingo). (HOFSTØY, 1999).

O coeficiente de difusão de cloreto deve, por outro lado, ser tratado como dependente do tempo. Foi confirmado tanto em testes de laboratório como por testes in-situ que esta resistência é melhorada ao longo do tempo. Uma expressão comumente usada para determinar o coeficiente de difusão dependente do tempo é dada de acordo com a Eq. 2. (MARKESET, 2000).

$$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (2)$$

Onde D_0 é um coeficiente de difusão de referência medido na idade t_0 . O expoente determina a rapidez com que o coeficiente de difusão é melhorado ao longo do tempo. A diminuição do coeficiente de difusão com a idade é devido a um efeito combinado de hidratação do cimento e todos os outros mecanismos que atuam no campo, como a troca iônica ocorre entre o concreto e a água do mar.

O fator de envelhecimento é comprovadamente um parâmetro que rege a predição da vida útil. No entanto, os dados para esse parâmetro são escassos. Um fator de 0,3 é indicado para

concreto com relação água/cimento menor que 0,6. Valores um pouco mais altos são relatados para cimento de escória de alto forno. O valor de α maior também é encontrado na parte submersa da estrutura do que na zona de maré e de respingos. (DURACRETE, 2000).

Numa fase de concepção, a maior resistência contra a penetração de cloretos deve ser medida no laboratório, por exemplo um teste de difusão começou aos 28 dias e durou 35 dias. Mas aqui a transição das condições do laboratório para a condição in situ deve ser incluída. Este problema pode ser resolvido pela introdução de um parâmetro de transição, k_{tm} , dando que, $D_0 = k_{tm} \cdot D_{tm}$, onde D_{tm} é o coeficiente de difusão de cloreto laboratorial medido pelo procedimento selecionado (DuraCrete 1998 e 2000). O parâmetro k_{tm} será então obviamente dependente do procedimento de medição, do microambiente para o componente estrutural atual, da cura e da composição do concreto. Incorporando isto na Eq. 2 se obtém Eq. 3.

$$D(t) = k_{tm} \cdot D_{tm} \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (3)$$

1.2 Início do processo de corrosão - Valor limite de cloretos

O início do processo de corrosão das armaduras presentes no concreto armado tem início quando a concentração de cloretos no nível da armadura é maior do que um valor crítico, C_{cr} , como demonstrado na Eq. 4.

$$C(x, t) \geq C_{CR} \quad (4)$$

Este nível de limiar para cloretos é determinado por uma interação complexa de vários fatores como:

- Consequências das incertezas nos parâmetros do modelo;
- Fonte de contaminação (interna / externa);
- Condição do aço e da zona interfacial de aço/concreto;
- Composição do concreto (tipo de cimento, teor de argamassa, relação água/aglomerante, etc);
- Profundidade de cobrimento;
- Trincas (não induzidas por corrosão);
- Ambiente de exposição (disponibilidade de umidade e oxigênio, temperatura, carbonatação, sulfatos).

1.3 Análise de Monte Carlo

Para realização deste estudo foi adotada a utilização de uma simulação de Monte Carlo a fim de obter a probabilidade de falha da estrutura um molhe de concreto armado localizado na Suécia. Para a realização das simulações foram adotadas as variáveis básicas que compõem os

modelos estabelecidos nos itens 1.1 e 1.2. Considerando a quantidade de variáveis envolvidas e o fato de cada uma apresentar seus próprios parâmetros estatísticos, o cálculo da concentração de cloretos foi realizado por meio de uma combinação das Eq. 1, Eq. 2 e Eq. 3 com a simulação de Monte Carlo. Para isso, é necessário que todos os parâmetros de entrada envolvidos como uma função de densidade de probabilidade (ANG e TANG, 1990). Os valores médios assim como os coeficientes de variação (COV) adotados foram baseados em um estudo realizado por Markeset (2000). Os valores dos parâmetros adotados são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados para realização da simulação.

Variável	Unidade	Distribuição	Média	COV
C- eficiente de difusão D_0	m ² /s	Normal	7,00x10 ⁻¹²	0,15
Cobrimento Nominal (X_c)	mm	Normal	Váriavel ¹	0,10
Concentração Superficial de cloretos (C_s)	% ²	Normal	0,40	0,60
Temperatura (T)	C	Normal	20,00	0,15
Influência da idade (α)	-	Normal	0,60	0,10
Concentração Crítica (C_{cr})	% ²	Normal	0,10	0,10

Fonte: Os autores.

¹ Cobrimento variável para encontrar a probabilidade de falha máxima estabelecida.

² Em relação a quantidade de cimento.

Para cada cenário foram realizadas 50000 simulações de Monte Carlo. Um modelo proposto por Haldar e Mahadevan (2000) relaciona o número de simulações de Monte Carlo necessária para uma representação realística do fenômeno estudado e a probabilidade de falha admissível. O modelo é apresentado de acordo com a Eq. 5.

$$\varepsilon\% = \sqrt{\frac{(1-P_f)}{(N \times P_f)}} \times 200\% \quad (5)$$

Aonde:

$\varepsilon\%$ = percentual de erro admitido;

P_f = probabilidade de falha;

N = número de simulações realizadas.

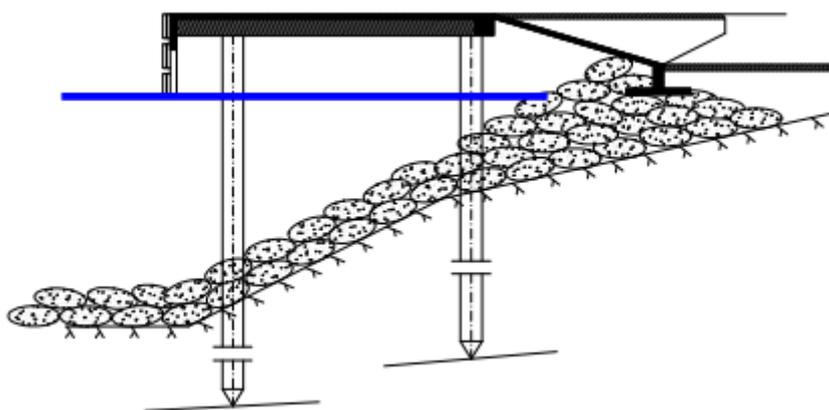
Neste sentido o número de 50000 simulações realizadas se mostra suficiente para a determinação da probabilidade de falha máxima de 10%.

1.4 Considerações do molhe de concreto

A aplicação da metodologia probabilística descrita acima é relevante para estruturas em ambiente marinho que deveriam ter o período da vida útil especificados em casos como pontes e molhes. Neste trabalho um grande molhe localizado na Suécia é utilizado como exemplo.

A estrutura deve ser projetada para uma vida útil mínima de 50 anos, conforme estabelece a ABNT NBR 15575-1 (2013), que estabelece este período como o período de vida útil mínima para projetos estruturais. A vida útil é definida como o tempo até o início do processo de corrosão. Com base nesta definição, um limite de aceitação para o início de corrosão é definido neste caso em 10%. O sistema estrutural do molhe é uma solução com vigas e laje sobre estacas de concreto apoiadas sobre a superfície de uma rocha, como ilustrado na Fig. 1.

Figura 1 - Esquema da estrutura do molhe de concreto



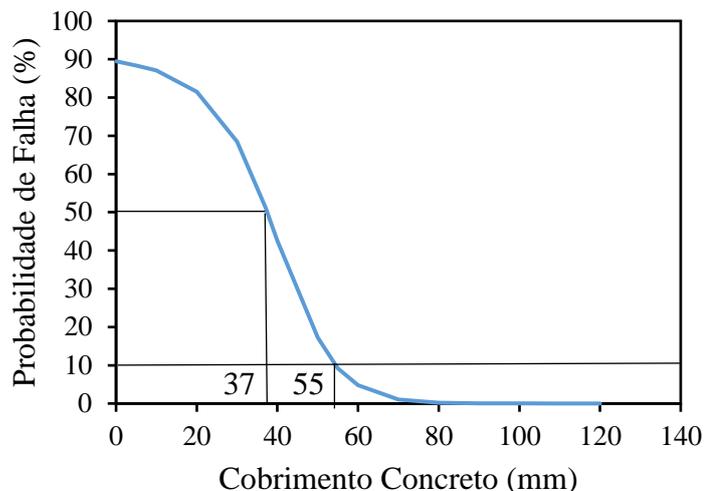
Fonte: Markeset (2000).

2 Análise dos resultados

Neste estudo foram realizadas várias simulações de Monte Carlo afim de se obter a probabilidade máxima de falha da estrutura de concreto armado de um molhe. Neste sentido o cobrimento de concreto foi o parâmetro que sofreu variação em cada idade analisada afim de se atingir a probabilidade máxima de falha, as idades de vida útil estudadas foram de 50, 100 e 150 anos.

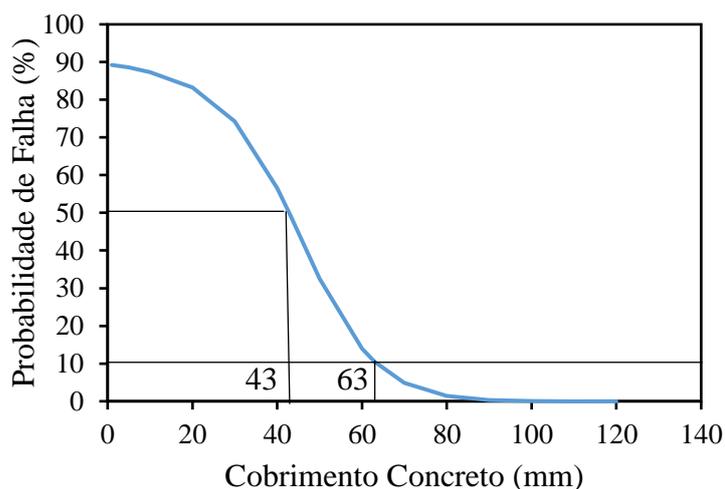
O resultado obtido nas simulações de Monte Carlo para uma estrutura projetada para uma vida útil de 50 anos pode ser analisada de acordo com a Fig. 2. Para durabilidade de vida útil de 50 anos e probabilidade de falha máxima de 10% é necessário um cobrimento da armadura de 55 mm. Se a probabilidade de falha máxima fosse de 50% seria necessário um cobrimento de 37 mm.

Figura 2 - Cobrimento de concreto necessário para a vida útil de 50 anos.



Fonte: Autor.

Figura 3 - Cobrimento de concreto necessário para a vida útil de 100 anos

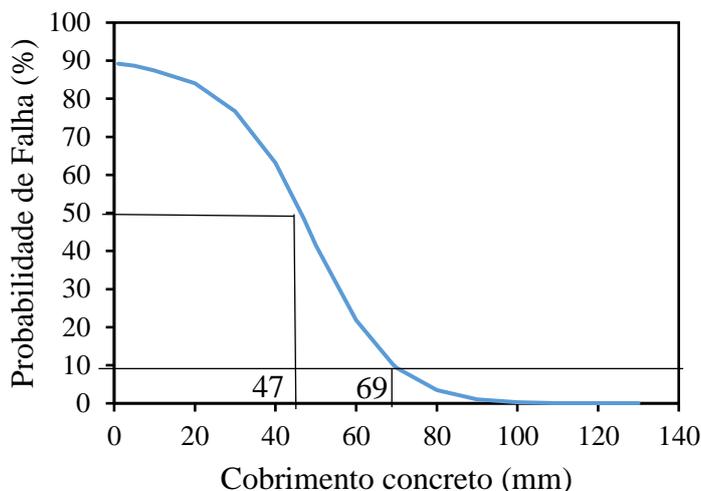


Fonte: Autor.

O resultado obtido nas simulações para a vida útil nas idades de 100 e 150 anos pode ser analisado de acordo com a Fig. 3 e Fig. 4. Aonde para a idade de 100 anos é preciso de um cobrimento de 63 mm e para a idade de 150 é necessário cobrimento de 69 anos para atingir a vida útil da estrutura nestas idades. Se a probabilidade de falha fosse de 50 % para a idade de 100 e 150 seria necessário um cobrimento de 43 mm e 47 mm respectivamente.

A idade denominada como de vida útil da estrutura é compreendido como período de início do processo de corrosão das armaduras presentes no concreto armado.

Figura 4 - Cobrimento de concreto necessário para a vida útil de 150 anos.



Fonte: Autor.

2.1 Comparativo do cobrimento necessário para as diferentes idades de vida útil

Na Tab. 2 é possível analisar os valores necessários de cobrimento de concreto para as idades de vida útil de 50, 100 e 150 anos.

Tabela 2 - Cobrimento de concreto necessário para cada vida útil.

Vida útil (anos)	Cobrimento necessário para probabilidade de falha máxima de 10 % (mm)
50	55
100	63
150	69

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados obtidos neste estudo o cobrimento necessário para a atender a vida útil nas idades de 50, 100 e 150 anos, é possível constatar que com o aumento da idade projetada para vida útil do molhe de concreto ocorre um aumento do cobrimento de concreto. Para a vida útil de 50 anos é necessário um cobrimento de 55 mm para a probabilidade de falha de 10 %, e para a vida útil de projeto de 100 anos é necessário cobrimento de 63 mm, representando um aumento de 14,5 % da espessura de cobrimento. Da idade de vida útil de 50 anos para uma vida útil de 150 anos é necessário um aumento da espessura de cobrimento de 25,5 %.

3 Conclusões

A utilização da segunda lei de difusão de fick aplicada na simulação de Monte Carlo se mostra uma importante ferramenta para determinação do período de início de corrosão de

armaduras de estruturas de concreto armado, assim possibilitando a estimativa da vida útil das estruturas.

Nas simulações realizadas neste estudo foi possível descobrir o cobrimento necessário para estruturas de concreto armado em idades de 50, 100 e 150 anos de vida útil até início do processo de corrosão das armaduras, se obtendo respectivamente espessuras de cobrimento de 55, 63 e 69 mm para uma probabilidade máxima de falha de 10%.

Este tipo de estudo é uma importante ferramenta na análise da vida útil e durabilidade de estruturas de concreto armado, sendo possível realizar este tipo de simulação para todos os tipos de estruturas a serem projetadas. A realização deste estudo auxilia na determinação do cobrimento de concreto necessário para a vida útil planejada para estruturas que serão executadas, assim podendo se obter maior segurança quanto a durabilidade da estrutura.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222. **ACI manual of concrete practice**. Detroit, 1991. V.1: corrosion of metals in concrete.

ANG, A. H-S., TANG, W. H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Decision, **Risk and Reliability**, Vol. II, John Wiley and Sons, Inc., New York, EUA, 1990.

ANG, A.; TANG, W. **Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles**. V.1, 1º Ed. Ed. John Wiley and Sons, 1975. 409 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1. **Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro. ABNT, 2013.

CARMONA FILHO, A.; CARMONA, T. G. **Curso de recuperação, reforço e proteção das estruturas de concreto**. Florianópolis: NTT, 2009.

DOTTO, J. M. R.; MÜLLER, I. L. Corrosão do aço induzida por íons cloreto: Influência das pozolanas na corrosão da macrocélula. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54, 2012**, Maceió. Caderno de Resumos do 54 Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012, p.184. Desenvolvimento dos Anais em CD-ROM, 2012. v.1.

DURACRETE. **Modelling of Degradation, The European Union - Brite EuRam III**, Project No. BE95-1347, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, Report No. R4-5, 1998.

DURACRETE. **Statistical quantification of the variables in the limit state functions**. The European Union-Brite EuRam III-Contract BRPR-CT95-0132-Project BE95-1347/R9, 2000.

GJØRV, Odd E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

HOFSTØY, A., SØRENSEN, S.I. & MARKESET, G. **Experience from long term performance of quays and jetties (in Norwegian)**. Report No. 2.2, National R&D Project "Durable Concrete Structures", 1999.

JUSTNES, H. et al. Methodology of calculating required chloride diffusion coefficient for intended service life as function of concrete cover in reinforced marine structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 73, p. 316-323, 2016.

MARKESET, G. Service Life Predictions of Marine Concrete Structures—Consequences of Uncertainties in Model parameters. In: **Proceedings, Nordic Mini Seminar: “Prediction Models for Chloride Ingress and Corrosion Initiation in Concrete Structures”**, Chalmers Institute of Technology, Gothenburg, Sweden, Publikation P-01. 2000.

MEDEIROS, M. H. F., HELENE, P. Migração de íons cloreto no concreto - Influência da consistência, relação água/cimento e consumo de cimento. **Revista IBRACON**, São Paulo, ano XI, n. 32, 53 -65 p., Fev/Mar/Abr 2003.

MEHTA, P. K. **Concrete in the marine environment**. University of California at Berkeley. USA, 2005.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**. João Pessoa: IFBP, 2017.

REAL, M. V. **Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos**. 2000. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 249f.