

# AVALIAÇÃO DE MODELOS PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO LOCALIZADAS EM AMBIENTES COM CLORETOS

Laura Silvestro<sup>1</sup>

[laurasilvestro@ymail.com](mailto:laurasilvestro@ymail.com)

Denise C. C. Dal Molin<sup>2</sup>

[dmolin@ufrgs.br](mailto:dmolin@ufrgs.br)

## ÁREA: VIDA ÚTIL E PATOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES

### Resumo

As estruturas de concreto brasileiras são caracterizadas pela elevada incidência de processos de degradação precoces, principalmente no que diz respeito à corrosão de armadura, conforme evidenciado em diversos levantamentos de manifestações patológicas realizados no país. Neste contexto, é crescente a preocupação mundial com a durabilidade e o atendimento da vida útil de projeto estabelecida pelas normativas. Desta maneira, torna-se fundamental a utilização de modelos representativos dos processos de degradação para uma correta previsão da vida útil de estruturas de concreto. Isto posto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a capacidade de alguns destes modelos em prever adequadamente a penetração de cloretos em estruturas de concreto, sendo estes: a solução da 2ª Lei de Fick, o modelo de Bob (1996) e o modelo de Andrade (2001). Para isto, verificou-se se as profundidades calculadas por tais modelos, associadas à concentração crítica de cloretos, estão próximas daquelas observadas em estruturas de concreto armado expostas em zona de atmosfera marinha. As variáveis de entrada destes modelos também foram analisadas, bem como a dificuldade de obtenção das mesmas. Para o conjunto de dados avaliado, a solução da 2ª Lei de Fick apresentou um erro médio de 8,34%, enquanto que, para os modelos de Bob e de Andrade, este valor foi de 67,40% e 19,27%, respectivamente. Desta forma, constatou-se que a solução da 2ª Lei de Fick e o modelo de Andrade apresentaram uma boa adequação aos dados experimentais, diferentemente do modelo de Bob.

Palavras-chave: Penetração de cloretos  
Modelos de previsão  
Vida útil

---

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil

# EVALUACIÓN DE MODELOS PARA PREVISIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO UBICADAS EN AMBIENTES CON CLORUROS

**Laura Silvestro<sup>3</sup>**

[laurasilvestro@vmail.com](mailto:laurasilvestro@vmail.com)

**Denise C. C. Dal Molin<sup>4</sup>**

[dmolin@ufrgs.br](mailto:dmolin@ufrgs.br)

## ÁREA: VIDA ÚTIL Y PATOLOGÍAS DE LAS EDIFICACIONES

### Resumen

Las estructuras de concreto en el Brasil se caracterizan por la elevada incidencia de procesos de degradación, principalmente en lo que se refiere a la corrosión de la armadura, tal como se ha evidenciado en diversos levantamientos de manifestaciones patológicas realizadas en el país. En este contexto, es creciente la preocupación mundial con la durabilidad y el cumplimiento de la vida útil de proyecto establecida en las normativas. A razón, se vuelve fundamental la utilización de modelos representativos de los procesos de degradación para una correcta previsión de la vida útil de estructuras de hormigón. En este punto, esta investigación tuvo como objetivo evaluar la capacidad que algunos de estos modelos poseen para prever adecuadamente la penetración de cloruros en estructuras de hormigón, siendo estos: la solución de la segunda Ley de Fick, el modelo de Bob (1996) y de Andrade (2001). Para ello, se verificó si las profundidades calculadas por tales modelos, asociadas a la concentración crítica de cloruros, están próximas a aquellas observadas en estructuras de hormigón armado expuestas en zona de atmósfera marina. Las variables de entrada de estos modelos también fueron analizadas, así como la dificultad para obtenerlas. Para el conjunto de datos evaluado, la solución de la 2ª Ley de Fick presentó un error promedio del 8,34%, mientras que para los modelos de Bob y de Andrade, este valor fue del 67,40% y el 19,27%, respectivamente. Así, se constató que la solución de la 2ª Ley de Fick y el modelo de Andrade presentaron una buena adecuación a los datos experimentales, a diferencia del modelo de Bob.

Palabras clave: Penetración de cloruros

Modelos de previsión

Vida útil

---

<sup>3</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil

<sup>4</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil

## Introdução

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, principalmente devido a sua versatilidade e custo relativamente baixo (1). A capacidade deste material de resistir à ação de intemperismos, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração é denominada durabilidade (2), a qual é definida em função de três fatores principais, sendo estes: os materiais constituintes, as etapas de projeto, construção e manutenção da estrutura e as condições ambientais de exposição (3).

Frente aos problemas de degradação observados no concreto, é crescente a preocupação mundial com a durabilidade e à extensão da vida útil de estruturas constituídas por este material. Isto deve-se principalmente ao fato de que os custos com reparos e substituições destas estruturas vem se tornando cada vez mais significativos. Estima-se que em países desenvolvidos cerca de 40% dos recursos investidos na indústria da construção são aplicados no reparo e manutenção de estruturas existentes (4). Em 2004, países como a Inglaterra, França e Alemanha gastaram com manutenções e reparos aproximadamente 50% do total investido na construção (5).

Aliado a isto, as normativas também estão mais exigentes no que se refere à construção de estruturas de concreto mais duráveis, estabelecendo parâmetros mínimos de desempenho ligados à durabilidade, usualmente mensurados através da vida útil, que corresponde ao período de tempo compreendido entre o início da operação e uso de uma edificação até o momento que ela deixa de atender sua finalidade (6)(7)(8)(9).

Dentre os mecanismos de degradação que afetam a vida útil das estruturas de concreto armado, a corrosão de armaduras é um dos mais frequentes (10)(11) e críticos, podendo levar a um comprometimento da segurança estrutural ao longo do tempo. Este processo de degradação desperta maior preocupação em regiões costeiras, em razão da elevada agressividade deste ambiente provocada pela presença de cloretos.

Em grande parte dos estudos que avaliam o comportamento do concreto armado frente à ação de cloretos o processo corrosivo é acelerado aplicando-se uma corrente externa (12)(13)(14) ou adicionando substâncias como o  $CaCl_2$  ou o  $NaCl$  na mistura do concreto (15)(16)(17), uma vez que não se dispõe do tempo necessário para que o fenômeno ocorra de forma natural. Estes ensaios acelerados recebem inúmeras críticas porque são caracterizados pela aplicação de condições bastante agressivas que visam minimizar o tempo para a obtenção dos resultados e que usualmente não condizem com as reais condições de exposição ao fenômeno natural. Em contrapartida, muito estudos vem sendo realizados em ambientes marítimos, com condições de exposição naturais (18)(19)(20), sendo considerados mais adequados para avaliar a penetração de íons cloreto no concreto e para a previsão de vida útil deste tipo de estrutura, apesar de demandarem períodos de exposição superiores aos necessários em ensaios acelerados.

O mecanismo de corrosão de armaduras pode ser representado através do modelo proposto por Tuutti (21), o qual subdivide o processo corrosivo nas etapas de iniciação e propagação. O

período de iniciação, correspondente à vida útil da estrutura, é definido como o tempo em que os agentes agressivos levam para atravessar o revestimento, atingir a armadura e provocar a sua despassivação. Já o período de propagação corresponde ao tempo necessário para a deterioração evoluir até atingir um limite aceitável de dano. Desta forma, parte-se do pressuposto de que, para a previsão da vida útil de estruturas de concreto, tem-se a necessidade de um modelo representativo do fenômeno de degradação que, no caso desta pesquisa, está associado ao período de iniciação da corrosão de armaduras. Neste contexto, existem diversos modelos na literatura para a estimativa da vida útil de estruturas de concreto em relação à corrosão de armaduras desencadeada por cloretos.

## Metodologia

Neste trabalho foram avaliados os seguintes modelos: a solução da 2ª Lei de Fick considerando a concentração superficial de cloretos e o coeficiente de difusão constantes no tempo, o modelo proposto por Bob (22) e o proposto por Andrade (23). Na Tabela 1 são apresentadas as equações destes modelos, bem como a definição de todas as variáveis de entrada.

Tabela 1: Modelos para previsão de vida útil de estruturas de concreto

Modelo	Equação	Variáveis de Entrada
2ª Lei de Fick	$C(x,t) = (C_{sa}) \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4(t-t_{ex})D_a}}$	<p><math>C_{sa}</math> – concentração superficial de cloretos, correspondente ao teor de cloretos ao final do primeiro ano de exposição (%);</p> <p><math>x</math> – profundidade (cm);</p> <p><math>D</math> – coeficiente de difusão de cloretos (cm<sup>2</sup>/ano);</p> <p><math>t</math> – tempo (anos);</p> <p><math>\operatorname{erfc}</math> – função complementar de erro de Gauss.</p>
Bob	$x_m = 150 \left( \frac{c K_1 K_2 d}{f_c} \right) \sqrt{t}$	<p><math>x_m</math> – profundidade da penetração de cloretos;</p> <p><math>f_c</math> – resistência à compressão do concreto;</p> <p><math>t</math> – tempo de exposição;</p> <p><math>c</math> – constante função do tipo de adição no cimento;</p> <p><math>K_1</math> – constante função da temperatura;</p> <p><math>K_2</math> – constante função da umidade relativa;</p> <p><math>d</math> – constante função da relação (<math>r</math>) entre a concentração crítica (0,4% em relação à massa de cimento) e a concentração superficial de cloretos na estrutura;</p>

Andrade	$y = 7,35 \cdot \frac{UR^{0,7} \cdot T^{0,1} \cdot CI^{0,7}}{K_1 \cdot f_{ck} \cdot K_2 \cdot (1 + Ad)^{0,2}} \cdot \sqrt{t}$	<p><math>y</math> - posição da frente de penetração de íons cloreto (teor de cloretos igual a 0,4% em relação à massa de cimento), em mm;</p> <p><math>UR</math> - umidade relativa média do ambiente;</p> <p><math>T</math> - temperatura média do ambiente;</p> <p><math>CI</math> - concentração superficial de cloretos após o primeiro ano de exposição;</p> <p><math>K_1</math> - constante função do tipo de cimento;</p> <p><math>f_{ck}</math> - resistência à compressão do concreto;</p> <p><math>K_2</math> - constante função do tipo de adição utilizada no concreto;</p> <p><math>Ad</math> - teor de adição no concreto;</p> <p><math>t</math> - tempo.</p>
---------	---	---

Como citado anteriormente, pretende-se avaliar se as profundidades de penetração calculadas por tais modelos, associadas à concentração de cloretos crítica que ocasiona a despassivação das armaduras (adotada como 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento), estão próximas daquelas observadas em estruturas de concreto armado expostas em zona de atmosfera marinha. Desta forma, foram coletados alguns dados na literatura referentes à penetração de cloretos em estruturas de concreto. Os dados encontrados estão apresentados nos trabalhos descritos a seguir:

- Costa e Appleton (24)(25) – Os autores avaliaram a concentração de cloretos em painéis de concreto que permaneceram expostos em atmosfera marinha por 3 anos, na Península de Setúbal, em Portugal. Os perfis de cloretos foram determinados para os tempos de exposição de 1,5 e 3 anos;
- Vitali (26) – Foram expostos prismas de concreto em São Francisco do Sul (Santa Catarina), a uma distância de 50 m da praia. O concreto utilizado na moldagem dos prismas era constituído de cimento CP IV e caracterizado por uma relação a/c de 0,57 e resistência à compressão aos 28 dias de 35,2 MPa. O perfil de concentração de cloretos destes prismas foi determinado nos tempos de exposição de 0,5, 0,75 e 1,5 anos;
- Meira (27) – O autor expôs pilaretes de concreto armado em João Pessoa, na Paraíba, a uma distância de 10 m em relação ao mar. Estes prismas foram moldados com cimento CIIIF e CP IV e com relações a/c de 0,50, 0,57 e 0,65. A concentração de cloretos foi avaliada nos períodos correspondentes a um tempo de exposição de 0,5, 0,8, 1,2 e 1,5 anos.

## Resultados

Na Tabela 2 são apresentados os resultados encontrados nesta pesquisa. Nela constam os dados selecionados para a análise dos modelos; as informações relativas às características da estrutura de concreto, bem como às características ambientais do local de exposição destas estruturas; a profundidade da concentração crítica de cloretos observada em diversos períodos; a concentração crítica calculada através dos três modelos citados anteriormente e o erro associado à estimativa fornecida por tais modelos.

É importante destacar que como não existiam dados ambientais prévios da concentração de cloretos nos locais de exposição das estruturas avaliadas nesta pesquisa, utilizou-se a concentração superficial dos dados experimentais como parâmetro de entrada nos três modelos avaliados. Para isto, tal parâmetro foi obtido através de um ajuste a partir da equação da 2ª Lei de Fick por meio do método dos mínimos quadrados.

Verifica-se que o erro médio associado aos dados avaliados nesta pesquisa é de 8,34% para a equação da 2ª Lei de Fick, de 67,40% para o modelo de Bob e 19,27% para o modelo de Andrade. Cita-se ainda que uma pequena variação pode ser considerada aceitável, pois ocorre principalmente devido à variabilidade inerente às características do concreto, às condições ambientais e ao processo de extração de amostras e análise dos resultados.

Tabela 2: Profundidade de penetração da concentração de cloretos crítica (Ccr) calculada pelos modelos apresentados

Dados	Informações	Tempo (anos)	Profundidade Ccr=0,4% (mm)	Profundidade Ccr = 0,4% (mm) - Calculada			Erro (%)		
				2ª Lei de Fick	Bob	Andrade	2ª Lei de Fick	Bob	Andrade
Costa e Appleton	Cimento CEI 32,5 fck = 34 MPa UR = 71% T = 16,8 °C	1,5	20,80	20,88	9,73	12,66	-0,36%	53,24%	39,15%
		3	30,00	29,52	13,75	17,90	1,59%	54,15%	40,34%
Vitali	Cimento CPIV fck = 35,2 MPa UR = 88,9 % T = 20,7 °C	0,75	11,30	10,44	2,60	5,37	7,62%	76,98%	52,46%
		1,5	16,70	14,76	3,68	7,60	11,60%	77,97%	54,51%
Meira	Cimento CP IV fck = 21 MPa UR = 78,3 % T = 26,5 °C	0,8	10,00	7,52	2,84	6,53	24,77%	71,55%	34,74%
		1,2	11,50	9,21	3,48	7,99	19,88%	69,70%	30,49%
		1,5	13,00	10,30	3,90	8,94	20,76%	70,03%	31,26%
Meira	Cimento CP IV fck = 26,9 MPa UR = 78,3 % T = 26,5 °C	0,8	7,50	6,88	2,22	5,72	8,29%	70,39%	23,69%
		1,2	8,50	8,42	2,72	7,01	0,89%	68,00%	17,53%
		1,5	9,50	9,42	3,04	7,84	0,86%	67,99%	17,50%
Meira	Cimento CP IV fck = 32 MPa UR = 78,3 % T = 26,5 °C	0,8	4,00	4,06	1,23	4,04	-1,54%	69,19%	-0,88%
		1,2	6,00	4,97	1,51	4,94	17,10%	74,85%	17,63%
		1,5	7,00	5,56	1,69	5,53	20,55%	75,90%	21,06%
Meira	Cimento CP II - F fck = 20,3 MPa UR = 78,3 % T = 26,5 °C	0,8	9,00	8,73	3,53	9,79	3,05%	60,76%	-8,79%
		1,2	10,80	10,69	4,33	11,99	1,06%	59,95%	-11,04%
		1,5	12,60	11,95	4,84	13,41	5,18%	61,62%	-6,41%
Meira	Cimento CP II - F fck = 27 MPa UR = 78,3 % T = 26,5 °C	1,5	9,00	8,36	2,71	7,79	7,15%	69,89%	13,42%
Meira	Cimento CP II - F fck = 31 MPa UR = 78,3 % T = 26,5 °C	1,5	4,00	3,93	1,56	4,79	1,75%	61,05%	-19,72%
<b>MÉDIA</b>							<b>8,34%</b>	<b>67,40%</b>	<b>19,27%</b>

Constata-se que as previsões com base na 2ª Lei de Fick são as mais precisas, como já era o esperado, por se tratar da equação que descreve a difusão, o fenômeno predominante na penetração de cloretos em estruturas de concreto. Além da variabilidade inerente a todo o processo, parte dos erros verificados está associada à adoção da hipótese de que a concentração superficial de cloretos e o coeficiente de difusão são constantes ao longo do tempo. Entretanto sabe-se que a concentração superficial tende a aumentar com o tempo e, somente após períodos significativamente longos, apresenta uma estabilização (28) e que o coeficiente de difusão diminui ao longo do tempo, em função de três efeitos principais (24):

- hidratação do cimento, que leva a uma redução da porosidade do concreto e, conseqüentemente, uma redução do coeficiente de difusão. Esse efeito tem influência particular nas primeiras idades do concreto;



- formação de uma camada de carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio que colmatam os poros da região superficial do concreto e reduzem o ingresso de cloretos;
- reação entre o aluminato tricálcico, produto da hidratação do cimento, e os íons cloreto formando cloroaluminato de cálcio, também conhecido como sal de Friedel.

A solução da 2ª Lei de Fick possui aplicação voltada para a previsão de vida útil de estruturas de concreto existentes, aonde os dados da concentração superficial de cloretos e coeficiente de difusão são obtidos através de inspeções prévias. Quando se trata da previsão de vida útil de novas estruturas o modelo possui baixa confiabilidade, dado que existem diversos parâmetros envolvidos na análise e que a correlação entre eles é questionável (29).

O modelo de Bob (1996) foi o que apresentou as maiores discrepâncias em relação aos dados observados. Os resultados obtidos indicam a necessidade de um ajuste deste modelo, dado que em todas as situações analisadas gerou estimativas da profundidade da concentração crítica de cloretos bem inferiores às observadas, com erros superiores a 53,24%.

Por fim, constata-se que o modelo de Andrade, no geral, apresentou uma boa estimativa da profundidade da concentração de cloretos crítica frente aos dados observados. Tal formulação é simples e de fácil aplicação e caracteriza-se por variáveis de entrada de fácil obtenção ou obtidas por medições diretas. Outro aspecto que facilita a sua aplicação é o fato de não possuir como dado de entrada o coeficiente de difusão, que no caso de novas estruturas, normalmente é obtido através da realização de ensaios acelerados laboratoriais. Cita-se ainda que o modelo de Andrade leva em consideração a interação entre a estrutura de concreto e o meio ambiente em que está inserida, através das variáveis: temperatura média e umidade relativa média, um aspecto bastante importante a ser considerado, uma vez que as condições ambientais influenciam na penetração de cloretos em estruturas de concreto. Entretanto, como alguns dados usualmente não são coletados durante uma inspeção, como aqueles associados às condições ambientais do local de exposição, tipo de cimento e resistência à compressão aos 28 dias, isso dificulta a aplicação do modelo. Contudo, no que diz respeito ao projeto de novas estruturas, são parâmetros de fácil definição.

## Conclusões

Este trabalho apresenta considerações sobre alguns modelos utilizados para a previsão de vida útil de estruturas de concreto armado. Além da capacidade de prever adequadamente a penetração de cloretos, avaliou-se também os dados de entrada destas formulações, uma vez que modelos complexos, que envolvem diversos parâmetros, possuem baixa aplicabilidade prática. Em relação à estimativa fornecida pelos três modelos avaliados nesta pesquisa cita-se que:

- a solução da 2ª Lei de Fick foi o modelo que apresentou os melhores resultados frente aos dados observados de penetração de cloretos. Entretanto, destaca-se o fato de que possui aplicação voltada para a previsão de vida útil de estruturas existentes, dado que, para a obtenção de algumas variáveis de entrada, como a concentração superficial de cloretos e o coeficiente de difusão, a realização de inspeção preliminar para determinação do perfil de concentração de cloretos é necessária. A aplicação de tal formulação para a previsão de vida útil de novas estruturas é mais complexa, uma vez que a estimativa de ambos os parâmetros citados anteriormente é difícil, e muitas vezes depende da existência de dados prévios de estruturas semelhantes ou, em muitos casos, para o caso do coeficiente de difusão, demanda a realização de ensaios laboratoriais, aonde, usualmente, empregam-se condições para acelerar o processo corrosivo.
- o modelo de Bob (1996) não forneceu uma boa estimativa da profundidade da concentração crítica de cloretos. Sugere-se a utilização dos dados experimentais





levantados nesta pesquisa para o ajuste da formulação e das constantes associadas à temperatura, à umidade relativa e à relação entre a concentração crítica e a concentração superficial de cloretos.

- o modelo de Andrade (2001), no geral, forneceu uma boa estimativa da profundidade da concentração crítica de cloretos frente aos dados experimentais, principalmente levando em consideração a pequena quantidade de dados de entrada e a facilidade de obtenção destes dados. Para estudos futuros, sugere-se a utilização dos dados levantados nesta pesquisa, bem como a obtenção de novos dados de degradação natural, para a calibração dos coeficientes do modelo.

## Referências

- (1) SHI, X.; et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Constr. Build. Mater.**, vol. 30, p. 125–138, 2012.
- (2) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 201.2R-16: Guide to Durable Concrete, 2016.
- (3) APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADAKIS, V. G. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. **Constr. Build. Mater.**, vol. 22, no. 12, p. 2316–2324, 2008.
- (4) MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: Microstructures, Properties, and Materials**. McGraw-Hill, 2014.
- (5) UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Performance-based Standard Specifications for maintenance and Repair of concrete structures in Japan. **Struct. Eng. Int.**, vol. 4, p. 359–366, 2007.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações Habitacionais - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.
- (7) EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1990:2002/A1:2005: Eurocode – Basis of structural design**, 2005.
- (8) INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **Bulletin 34: Model Code for Service Life Design**, 2006.
- (9) AUSTRALIAN STANDARD. **AS 4997: Guidelines for the design of maritime structures**, 2005.
- (10) MUTHULINGAM, B. N.; RAO, S. Consistent models for estimating chloride ingress parameters in fly ash concrete. **J. Build. Eng.**, vol. 3, p. 24–38, 2015.
- (11) WEERDT, K.; *et al.* Towards the understanding of chloride profiles in marine exposed concrete, impact of leaching and moisture content. **Constr. Build. Mater.**, vol. 120, p. 418–431, 2016.
- (12) TORRES-ACOSTA, A. A.; NAVARRO-GUTIERREZ, S.; TERÁN-GUILLÉN, J. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. **Eng. Struct.**, vol. 29, no. 6, p. 1145–1152, 2007.
- (13) YILDRIM, H.; ILICA, T.; SENGUL, O. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. **Constr. Build. Mater.**, vol. 25, no. 3, p. 1282–1288, 2011.
- (14) SPIESZ, P.; Brouwers, H. J. H. The apparent and effective chloride migration coefficients obtained in migration tests. **Cem. Concr. Res.**, vol. 48, p. 116–127, 2013.
- (15) PRUCKNER, F.; GJØRV, O. E. Effect of CaCl<sub>2</sub> and NaCl additions on concrete corrosivity. **Cem. Concr. Res.**, vol. 34, no. 7, p. 1209–1217, 2004.
- (16) XU, J.; et al. Influence of CaCl<sub>2</sub> e NaCl from different sources on chloride threshold value for the corrosion of steel reinforcement concrete. **Constr. Build. Mater.**, v. 25, p. 663-669, 2011.



- (17) OH, B. H.; JANG, S. Y.; SHIN, Y. S. Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures. *Mag. Concr. Res.*, vol. 55, no. 2, p. 117–124, 2005.
- (18) CHALEE, W.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Mar. Struct.*, vol. 22, no. 3, p. 341–353, 2009.
- (19) VALIPOUR, M.; *et al.* In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. *Constr. Build. Mater.*, vol. 46, pp. 63–70, 2013.
- (20) DASAR, A.; HAMADA, H.; SAGAWA, Y. Deterioration progress and performance reduction of 40-year-old reinforced concrete beams in natural corrosion environments. *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, p. 690–704, 2017.
- (21) TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- (22) BOB, C. Probabilistic Assessment of Reinforcement Corrosion in Existing Structures. In: **Concrete Repair, Rehabilitation and Protection**, p. 17-28, 1996.
- (23) ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- (24) COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration. *Mater. Struct.*, vol. 32, p. 252-259, 1999.
- (25) COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment - Part II: Prediction of long term chloride penetration. *Mater. Struct.*, vol. 32, p. 354–359, 1999.
- (26) VITALI, M. R. V. **Efeito do distanciamento ao mar da contaminação do concreto por cloretos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- (27) MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- (28) LUPING, T. **Chloride Ingress in Concrete Exposed to Marine Environment – Field data up to 10 years exposure**. 2003.
- (29) ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments. *Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 2, no. 1, p. 1-6, 2017.