



FATORES INTERVENIENTES NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

SILVESTRO, Laura (1); RUVIARO, Artur Spat (2); LIMA, Geannina Terezinha dos Santos (3)

- (1) Universidade Federal de Santa Catarina, laurasilvestro@ymail.com
(2) Universidade Federal de Santa Catarina, arturspatruviaro@gmail.com
(3) Universidade Federal de Santa Catarina, geanninasantos@hotmail.com

RESUMO

É crescente a preocupação mundial com a durabilidade e o atendimento da vida útil de projeto estabelecida pelas normativas para estruturas de concreto armado. Desta maneira, torna-se fundamental a utilização de modelos representativos dos processos de degradação para uma correta previsão da vida útil deste tipo de estrutura. Para que um modelo de previsão de vida útil seja representativo deve levar em consideração os principais fatores intervenientes na penetração de cloretos em estruturas de concreto. Tais fatores podem ser classificados em intrínsecos, sendo aqueles relacionados às características da matriz cimentícia e em fatores extrínsecos, sendo aqueles associados às condições de exposição da estrutura e do meio ambiente que a circunda. Desta maneira, este artigo, com base em uma revisão de literatura, tem como objetivo apresentar os principais fatores intervenientes na penetração de cloretos em estruturas de concreto, assim como aspectos pertinentes ao tema em questão, a fim de auxiliar no desenvolvimento de novos modelos de previsão de vida útil e na escolha de modelos já existentes para este fim. Com base na revisão de literatura realizada, destaca-se a importância da consideração dos fatores ambientais nos modelos de previsão de vida útil.

Palavras-chave: Corrosão de armaduras, penetração de cloretos, zona de atmosfera marinha.

ABSTRACT

International concern about durability and service life design established by regulations is growing. Therefore, the use of representative models of degradation processes for a correct prediction of service life of reinforced concrete structures become fundamental. For a prediction model to be representative, it must consider the main factors involved in chloride penetration in concrete structures. Such factors can be classified as intrinsic, which are those related to the characteristics of the cementitious matrix and as extrinsic factors that are those associated with the exposure conditions of the structure and the surrounding environment. Thus, this article, based on a literature review, aims to present the main factors intervening in the penetration of chloride in concrete structures, as well as relevant aspects to the subject in question, in order to assist in the development of new models for service life prediction and the definition of existing models for this purpose. Based on the literature review performed, the importance of considering environmental factors is highlighted.

Keywords: Reinforcement corrosion, chloride penetration, marine atmosphere zone.

1 INTRODUÇÃO

Frente aos problemas de degradação observados no concreto, é crescente a preocupação mundial com a durabilidade e extensão da

vida útil de estruturas constituídas por este material (SILVESTRO, 2018; SILVESTRO; DAL MOLIN, 2018). Tal preocupação é decorrente dos elevados gastos com a recuperação e manutenção de estruturas existentes. Estima-se que em países desenvolvidos cerca de 40% dos recursos investidos na indústria da construção são destinados ao reparo e manutenção de estruturas existentes (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Aliado a isto, as normativas (FIB 34, 2006; ABNT NBR 15575:2013) 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 (SILVESTRO, 2018; SILVESTRO; DAL MOLIN, 2018). Contudo, a norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2013), mesmo estabelecendo uma vida útil de projeto mínima de 50 anos para os sistemas estruturais de edificações habitacionais, não fornece modelos de previsão de vida útil para tal finalidade (DAL MOLIN et al., 2016).

Dentre os mecanismos de degradação que afetam a vida útil das estruturas de concreto armado, a corrosão de armaduras é um dos mais frequentes, sendo responsável por grande parte dos danos nestas estruturas. Nesse âmbito, a problemática de degradação de estruturas de concreto armado devido à corrosão de armaduras desperta maior preocupação em regiões costeiras, em razão da elevada agressividade deste ambiente provocada pela presença de cloretos.

Isto posto, para uma correta previsão da vida útil de estrutura de concretos devem ser empregados modelos de previsão representativos que levem em consideração os principais fatores intervenientes na penetração de cloretos em estruturas de concreto. Neste âmbito, visando auxiliar na escolha de modelos de previsão existentes na literatura para esta previsão e na elaboração de novos modelos de previsão de vida útil no que tange à corrosão de armaduras desencadeada por cloretos, este trabalho, com base em uma revisão de literatura, tem por objetivo abordar os principais fatores intrínsecos e extrínsecos a respeito do tema em questão.

2 FATORES INTRÍNSECOS

2.1 Coeficiente de difusão

A difusão é o mecanismo de transporte predominante dos íons cloreto no concreto, o qual é função da diferença de concentração de cloretos entre duas zonas e ocorre da região de maior concentração para a região de menor concentração. No geral, depende de muitos fatores como o tempo, condição de exposição e composição do concreto (POULSEN; MEJLBRO, 2006). É um parâmetro que diminui ao longo do tempo (SUN; LIANG; CHANG, 2012). De acordo com Costa e Appleton (1999) este comportamento é função de três efeitos principais: i) hidratação do cimento, que leva a uma redução da porosidade do

concreto e, conseqüentemente, uma redução do coeficiente de difusão; ii) 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; iii) reação entre o aluminato tricálcico e os íons cloreto formando cloroaluminato de cálcio, também conhecido como sal de Friedel.

2.2 Relação a/c

A relação a/c é um dos parâmetros mais significativos no contexto de durabilidade de estruturas de concreto armado, pelo fato de estar relacionada com a porosidade da matriz cimentícia e, conseqüentemente, associada à penetração de agentes agressivos para o interior do concreto. Diversos pesquisadores observaram um acréscimo na penetração de cloretos com o aumento da relação a/c (CHALEE et al., 2007; MEIRA et al., 2010).

Cheewaket, Jaturapitakkul e Chalee (2012) avaliaram a profundidade de penetração de cloretos em corpos de prova de concreto de cimento Portland e relação a/c de 0,45 e 0,65, que foram expostos por 10 anos em região de variação de maré no Golfo da Tailândia. Tais autores evidenciam que a relação a/c tem um grande efeito na profundidade de penetração dos cloretos em concretos. Para um tempo de exposição de 2 anos, a configuração com relação a/c = 0,45 apresentou uma profundidade de penetração associada à concentração de cloretos limite 7 mm inferior em comparação à configuração de relação a/c=0,65. Para um tempo de exposição de 10 anos esse valor foi 34 mm inferior.

2.3 Grau de saturação do concreto

Guimarães (2000) buscou avaliar a influência do grau de saturação do concreto na difusão de cloretos. Para isto, o autor moldou corpos de prova de pastas de cimento Portland que apresentaram graus de saturação de 55%, 75%, 90% e 100%, os quais foram submetidos a uma capa de contaminação composta por uma pasta de cimento igual à utilizada para a moldagem dos corpos de prova, com a adição de 5% de NaCl em relação à massa de cimento. Em seguida, o autor determinou o coeficiente de difusão para cada valor de grau de saturação avaliado, através da aplicação da 1ª Lei de Fick. Os resultados encontrados por Guimarães (2000) são apresentados na Tabela 1. Estes resultados indicam uma maior penetração de íons cloreto com o aumento do grau de saturação, o que reforça a importância de se considerar tal parâmetro na estimativa do coeficiente de difusão de cloretos e em modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto.

Tabela 1 - Valores de coeficiente de difusão efetivo em função do grau de saturação

Grupos	Grau de saturação previsto (%)	Grau de saturação obtido* (%)	Coeficiente de difusão efetivo (cm ² /s)
I	55	57,2 ± 9,8	18,30E-10
II	75	74,8 ± 9,8	56,60E-10
III	90	90,2 ± 9,8	65,09E-10
IV	100	97,7 ± 9,8	203,81E-10

* Grau de saturação obtido com intervalo de confiança de 95%

Fonte: GUIMARÃES (2000), adaptada pela autora

2.4 Adições minerais

A adição de cinza volante no concreto é considerada uma medida eficaz para mitigar a corrosão de armaduras por cloretos (SHI et al., 2012). Chalee, Ausapanit e Jaturapitakkul (2010) avaliaram a penetração de cloretos em cubos de concreto, com teores de substituição de cinza volante em relação à massa de cimento dentro do intervalo de 15%-50%, que foram expostos por 7 anos em uma zona de variação de maré no Golfo da Tailândia. Os resultados mostram que o aumento do teor de substituição de cinza volante claramente reduz a penetração de cloretos.

Em relação à substituição parcial do cimento por sílica ativa, Selvaraj, Muralidharan e Srinivasan (2003) citam que a incorporação desta adição é responsável pelo refinamento da microestrutura do concreto em função de dois mecanismos principais: a) a reação com o hidróxido de cálcio, formando C-S-H e b) sua ação como fíler, reduzindo a porosidade da matriz cimentícia. Isto contribui para a redução na penetração de cloretos, conforme reportado em estudos prévios (SONG et al., 2007; RAMEZANIANPOUR; REZAEI; SAVOJ, 2015). Algumas pesquisas também reportaram que a utilização de sílica ativa ocasiona uma redução na capacidade de fixação de cloretos da pasta de cimento endurecida (DOUSTI; SHEKARCHI; TADAYON, 2009; THOMAS et al., 2012). Isto, de acordo com Shi et al. (2012), ocorre porque a sílica ativa reduz as fases de aluminatos, as responsáveis por tal fixação. Para Yuan et al. (2009a), a substituição do cimento Portland por sílica ativa pode levar a uma redução do pH, o que impacta no aumento da proporção de cloretos livres. Entretanto, mesmo com uma menor fixação de cloretos, a adição de sílica ativa reduz a difusão da matriz cimentícia aumentando a resistência a penetração de cloretos de concretos e argamassas.

Da mesma forma, a substituição do cimento por metacaulim, em teores entre 10% e 20% em relação à massa do cimento, podem reduzir significativamente a permeabilidade de cloretos. Isto ocorre devido à redução do diâmetro médio dos poros e uma maior uniformidade da distribuição do tamanho destes poros (BADOGIANNIS; TSIVLLIS, 2009). Dado comportamento foi encontrado por Shekarchi et al. (2010); os autores constataram que a substituição do cimento por 15% de metacaulim aumentou em 20% a resistência a compressão de concretos e reduziu a penetração de água e a difusão de íons para o interior destes concretos

em 50% e 47%, respectivamente. Além disso, como possui aluminatos em sua composição química, favorece a fixação dos cloretos livres para a formação do Sal de Friedel.

A adição de escória granulada de alto forno em matrizes cimentícias melhora a resistência à penetração de cloretos quando comparada a concretos com apenas cimento Portland (CHENG et al., 2005). Muitos pesquisadores identificaram que a substituição parcial do cimento por escória de alto forno aumenta a capacidade de fixação de cloretos (LUO et al., 2003; SIDDIQUE; BENNACER, 2012). Para Thomas et al. (2012) esta alta capacidade de fixação é função do elevado teor de alumina das escórias, resultando na formação de uma maior quantidade de sal de Friedel.

2.5 Tipos de cimento

Os cloretos encontram-se presentes no concreto de três formas: quimicamente ligados ao aluminato tricálcico ou ao ferroaluminato tetracálcico, formando o cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel e o cloroferrato de cálcio hidratado; adsorvidos fisicamente na estrutura do C-S-H; e sob a forma de íons livres. Isto posto, apenas os cloretos na forma de íons livres são responsáveis pela despassivação das armaduras e ocasionam prejuízos à durabilidade das estruturas de concreto armado (RIBEIRO et al., 2014). Diversos estudos que investigaram a interação entre os cloretos e os constituintes do cimento apontam que quanto maior o teor de C_3A maior a capacidade de fixação de cloretos de um cimento (OH; JANG, 2005; YUAN et al., 2009).

Rasheeduzzafar, Hussain e Al-Saadoun (1991) avaliaram o efeito do teor de C_3A na capacidade de fixação de cloretos em pastas de cimento. Os autores observaram que, para teores de C_3A de 2,43%, 9,1% e 14%, a concentração de cloretos livre foi de 62%, 40% e 16%, respectivamente. Tais autores mencionam que os cimentos com teores de C_3A mais elevados fixaram uma maior quantidade de cloretos, reduzindo assim a concentração destes íons nos poros. De acordo com Enevoldsen e Hansson (1994), outro aspecto que deve ser levado em consideração, e que influencia a reação entre estes íons e o C_3A , é o teor de gipsita utilizado no cimento, uma vez que o C_3A reage preferencialmente com os sulfatos e não com os cloretos.

Cabe citar que durante a vida útil das estruturas de concreto pode ocorrer uma conversão dos cloretos ligados na forma de sal de Friedel em íons livres. Sabe-se que a estabilidade do sal de Friedel é dependente do pH do concreto e que pequenas reduções do pH são suficientes para a liberação dos cloretos ligados (REDDY et al., 2002). Desta forma, a carbonatação, responsável pela redução do pH do concreto, pode ocasionar essa conversão de cloretos ligados em cloretos livres, contribuindo para o processo corrosivo. Para Zhu et al. (2016), durante a

carbonatação, o sal de Friedel reage com o dióxido de carbono liberando íons cloreto na solução dos poros, o que aumenta significativamente a concentração de cloretos na forma de íons livres.

3 FATORES EXTRÍNSECOS

A atmosfera circundante pode ter grande influência tanto na redução do período de iniciação, contribuindo para a despassivação precoce das armaduras, como na taxa de corrosão durante o período de propagação da corrosão (HELENE, 1993). Nesse âmbito, a seguir serão abordados os principais fatores extrínsecos intervenientes na penetração de cloretos em estruturas de concreto.

3.1 Concentração superficial de cloretos

A concentração superficial de cloretos (C_s) em um elemento de concreto armado tem correlação com vários fatores referentes ao concreto e ao meio ambiente, tais como: concentração de aerossol marinho, temperatura, consumo e capacidade de fixação do tipo de cimento, relação a/c, umidade, direção da estrutura, entre outros (CHEN et al., 2013). Conforme constatado por diversos autores, é um parâmetro que possui tendência de crescimento com o tempo e, após períodos significativamente longos, apresenta uma estabilização (COSTA; APPLETON, 1999; TANG, 2003). Entretanto, Son, Lee e Ann (2008), após avaliarem diversas publicações existentes na literatura a respeito do assunto, constataram que os dados de concentração superficial de cloretos não fornecem uma relação clara com o tempo de exposição. Os autores acreditam que isto é função da existência de vários outros fatores impactantes no transporte de cloretos para o interior do concreto, tais como tipo de aglomerante, relação a/c e condições de cura.

3.2 Distância horizontal em relação ao mar

Segundo Gustafsson e Franzén (1996), a redução da quantidade de cloretos disponíveis na atmosfera em pontos mais distantes do mar está associada à força da gravidade. Esta força causa a deposição das partículas mais pesadas na região próxima ao mar enquanto as partículas menores, por serem mais leves e não sofrerem a influência do efeito gravimétrico, são carregadas para regiões mais afastadas e acabam sendo depositadas por colisão.

Meira et al. (2007) avaliaram a deposição de cloretos pelo método da vela úmida e a concentração de cloretos em corpos de prova de concreto expostos em João Pessoa – PB e localizados a distâncias de 10 m, 100 m, 200 m, 500 m e 1.100 m em relação ao mar. Os corpos de prova ficaram expostos por um período de 18 meses. Constatou-se que há um forte decréscimo da concentração nos primeiros 200 m. Em relação aos corpos de prova de concreto, os autores verificaram que os concretos mais próximos do mar, por estarem em um ambiente com uma maior

disponibilidade de cloretos, apresentaram perfis de cloretos com concentrações superiores.

Borba Junior (2011) selecionou cinco pontos na região metropolitana de Vitória – ES, com distância ao mar de 10 m, 65 m, 120 m, 240 m e 520 m para medir a concentração de aerossol marinho pelo método da vela úmida. O autor também avaliou a concentração de cloretos em corpos de prova de concreto, que ficaram expostos por 10 meses nos últimos três pontos de monitoramento citados. Os resultados mostraram uma baixa correlação entre a deposição de cloretos na atmosfera e a concentração de cloretos no concreto para a região estudada. Além disso, o autor também observou uma queda significativa na deposição de cloretos na atmosfera a partir dos 200 m e uma baixa concentração de cloretos nos corpos de prova de concreto em função do pouco tempo de exposição e da baixa oferta de cloretos na atmosfera.

Vitali (2013) desenvolveu seu estudo em São Francisco do Sul - SC. A autora avaliou a deposição de cloretos através do método de vela úmida e, paralelamente, avaliou o ingresso de cloretos em prismas de concreto que permaneceram expostos por 18 meses nos mesmos locais das velas úmidas, situados em seis estações de monitoramento a distâncias de 50 m, 100 m, 200 m, 400 m, 650 m e 1.100 m em relação ao mar. Os resultados da pesquisa apontaram que a taxa de deposição de cloretos a 50 m do mar é 10 vezes maior que a deposição a 100 m, e 17 vezes maior que a deposição a 200 m. A autora também notou uma significativa redução de cloretos no interior do concreto a 100 m. Campos (2016) avaliou o teor de cloretos no ar atmosférico da cidade de Fortaleza (Ceará) por meio do método da vela úmida. A autora definiu uma malha sobre o mapa da cidade, com 46 pontos de coleta com distâncias em relação ao mar dentro do intervalo de 50 – 8000 m. Estes pontos apresentaram taxas de deposição de cloretos média variando entre 9,56 mg/m².dia e 2081,25 mg/m².dia. Os resultados indicaram que o teor de cloretos decai em função da distância do mar.

3.3 Umidade relativa

A presença de água é uma das condições necessárias para a ocorrência da corrosão e para a mobilidade dos íons no eletrólito. Neste contexto, a umidade que efetivamente influi nos processos corrosivos é aquela contida no interior dos poros do concreto, a qual é função da umidade relativa do ambiente, desde que o concreto não esteja imerso ou saturado. Apenas a existência de uma quantidade mínima de água nos poros irá desencadear a corrosão. Contudo, quando o concreto está completamente saturado, condição característica de regiões de zona submersa, o risco de corrosão cai drasticamente, o que pode ser justificado pelo acesso limitado de oxigênio (RIBEIRO et al., 2014).

De acordo com Andrade (2001), o comportamento acima mencionado representa a influência da umidade na etapa de propagação. O autor

ainda acrescenta que na etapa de iniciação, quanto maior o teor de umidade ambiental maior a quantidade de água no interior dos poros, o que favorece a mobilidade dos íons cloreto para o interior do concreto. Dado comportamento foi encontrado por Nielsen e Geiker (2003). Os autores avaliaram o coeficiente de difusão de argamassas de cimento Portland e relação a/c de 0,5, condicionadas em ambientes de umidade relativa de 65%, 85% e 100%, constatando um aumento deste parâmetro com o acréscimo da umidade relativa do ambiente.

3.4 Precipitação

De acordo com Andrade e Castillo (2003) o comportamento do concreto não protegido da chuva é de um material poroso, ou seja, funciona como uma esponja que retém água em seu interior e perde água por evaporação, principalmente em função de um aumento da temperatura. Já o concreto protegido da chuva absorve pequenas quantidades de água, sendo a umidade no seu interior influenciada pela umidade relativa do ambiente. Isto posto, os autores em questão acreditam que esta condição de protegido ou desprotegido da chuva deve ser levada em consideração nas classificações de exposição em códigos e normativas, uma vez que caracteriza a quantidade de umidade no tocante à corrosão.

A precipitação também tem influência na concentração superficial de cloretos em estruturas de concreto. De acordo com Castro-Borges et al. (2013), a chuva tem um efeito denominado de "lavagem superficial" que tende a lixiviar a camada externa do concreto, reduzindo a concentração superficial de cloretos nesta região. Neste âmbito, Meira (2004) verificou que a C_s apresentou um decréscimo no trecho compreendido entre as medidas realizadas com 14 e 18 meses de exposição, coincidindo com um período de precipitações mais intensas e concentradas, o que leva a crer que a chuva contribuiu para a redução da C_s .

3.5 Temperatura

A temperatura atua aumentando a cinética de reação de grande parte dos processos na natureza. Este comportamento, na penetração de cloretos em estruturas de concreto, fica evidente a partir da Equação de Arrhenius, a qual, dentro de certa faixa de temperatura, postula um aumento progressivo no coeficiente de difusão com o aumento da temperatura (MEDEIROS, 2008). Neste contexto, Xu et al. (2016) avaliaram a influência da temperatura na liberação dos cloretos quimicamente ligados. Os resultados obtidos por tais autores indicam que o aumento da temperatura, no geral, pode liberar parcialmente os cloretos ligados, sendo a quantidade liberada função da relação a/c, da concentração de cloretos total e da faixa de temperatura.

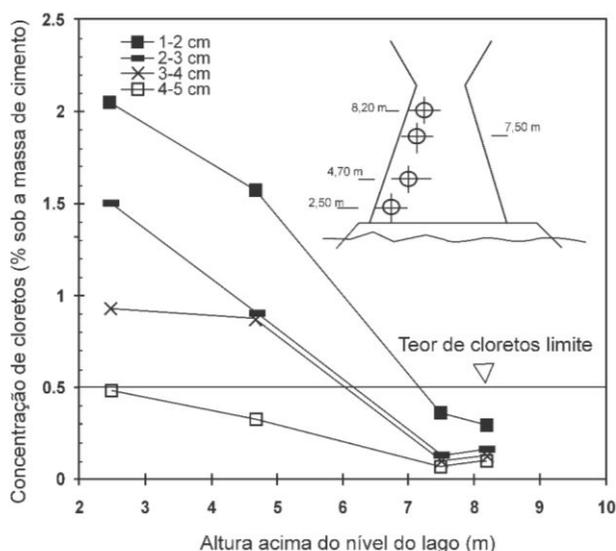
3.6 Velocidade e direção dos ventos

O aumento da velocidade do vento acarreta um aumento no número e no tamanho das partículas de aerossol marinho e, conseqüentemente, um aumento na quantidade de cloretos disponíveis. Este efeito é mais pronunciado em regiões próximas ao mar, sendo caracterizado por uma menor influência com o aumento da distância em relação ao mar (CHEN et al., 2013). Para Morcillo et al. (2000) e O'Dowd et al. (1997) existe uma velocidade crítica dos ventos, acima da qual a concentração de aerossol marinho na atmosfera aumenta notadamente, a qual está dentro do intervalo de 3 – 4 m/s. Outro aspecto que merece destaque diz respeito à direção dos ventos, uma vez que isto determina quais estruturas ou até mesmo quais os elementos de uma mesma estrutura estarão submetidos a uma maior concentração de cloretos. Tal comportamento foi constatado na pesquisa de Garcia et al. (2005), em que os autores verificaram que os elementos estruturais localizados na direção dos ventos predominantes foram mais afetados pela penetração de íons cloretos.

3.7 Altura

Há um consenso na literatura a respeito da variação da concentração de cloretos em relação à altura. Diversos autores constataram que tal concentração decresce à medida que a altura aumenta (BARBOSA et al., 2004; GUIMARÃES; CASTRO; NUNES, 2007). Castro, Rincon e Pazini (2001) determinaram a concentração de cloretos em pontos com altura de 2,5 m, 4,7 m, 7,5 m e 8,2 m na ponte sobre o Lago Maracaibo na Venezuela. Os resultados encontrados pelos autores são apresentados na Figura 1. Pode-se observar que a partir dos 7,5 m há uma redução significativa nas concentrações de cloretos em todas as profundidades avaliadas.

Figura 1 - Concentração de cloretos em pontos com diferentes alturas e profundidades na ponte sobre o Lago Maracaibo



Fonte: CASTRO; RINCON; PAZINI (2001), adaptada pela autora

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na revisão de literatura realizada a respeito dos fatores intervenientes na penetração de cloretos em estruturas de concreto armado localizadas em zona de atmosfera marinha, destaca-se que:

- O coeficiente de difusão apresenta uma tendência de redução ao longo do tempo;
- A capacidade de fixação de um cimento está diretamente relacionada aos teores de aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico;
- Quanto maior o grau de saturação do concreto maior penetração de íons cloreto;
- A utilização de cinza volante, sílica ativa, metacaulim e escória de alto forno são medidas eficazes para mitigar a corrosão de armaduras por cloretos;
- É de fundamental importância considerar fatores ambientais tais como concentração superficial de cloretos, distância em relação ao mar, umidade relativa, precipitação, altura e direção e velocidade dos ventos nos modelos de previsão de vida útil;

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **201.2R-16**: Guide to Durable Concrete, 2016.
- ANDRADE, C.; CASTILLO, A. Evolution of reinforcement corrosion due to climatic variations. **Materials and Corrosion**, v. 54, p. 379 – 386, 2003.
- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão de vida útil de estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. 277 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Parte 1: Desempenho de Edifícios Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.
- BADOGIANNIS, E.; TSIVILLIS, S. Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 128 – 133, 2009.
- BARBOSA, P.; et al. Influência dos ciclos de molhamento e secagem, da altura e do posicionamento dos pilares no teor de íons cloreto presentes no concreto com 30 anos de idade. **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – SEMENGO**. Rio Grande, Furg, 2004.
- BORBA JUNIOR, J. C. **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: Estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste**. 2011. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.
- CAMPOS, A. M. R. **Estudo da agressividade do ar atmosférico de Fortaleza/CE. 2016**. 136 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2016.

- CASTRO-BORGES, P.; et al. Effect of environmental changes on chemical and electrochemical parameters in reinforced concrete. The case of a tropical marine atmosphere. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 8, p. 6204-6211, 2013.
- CASTRO, P.; RINCON, O. T.; PAZINI, E. J. Interpretation of chloride profiles concrete exposed to tropical marine environments. **Cement and Concrete Research**, p. 529 – 537, 2001.
- CHALEE, W.; AUSAPANIT, P.; JATURAPITAKKUL, C. Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design analysis. **Materials and Design**, p. 1242 – 1249, 2010.
- CHALEE, W.; et al. Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment. **Construction and Building Materials**, p. 965 – 971, 2007.
- CHEEWAKET, T.; JATURAPITAKKUL, C.; CHALEE, W. Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. **Construction and Building Materials**, p. 693 – 698, 2012.
- CHENG, A.; et al. Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete. **Materials Chemistry and Physics**, v. 93, p. 404 – 411, 2005.
- CHEN, Y. S., et al. The correlation between air-borne salt and chlorides cumulated on concrete surface in the marina atmosphere zone in north Taiwan. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 21, p. 24-34, 2013.
- COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment – Part I: Main parameters affecting chloride penetration. **Materials and Structures**, v. 32, p. 252-259, 1999.
- DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B.; ANDRADE, J. J. O; POSSAN, E.; MASUERO, J. R.; MENNUCCI, M. M. Contribuição à previsão da vida útil de estruturas de concreto. In: KAZMIERCZAK, C. S.; FABRÍCIO, M. M. **Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: Materiais e Sustentabilidade**, p. 223 - 270. Porto Alegre: ANTAC, 2016.
- DOUSTI, A.; SHEKARCHI, M.; TADAYON, M. Effect of silica fume on chloride binding in concrete. **4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications**, p. 715–720, 2009
- ENEVOLDSEN, J. N.; HANSSON, C. M. Binding of chloride in mortar containing admixed or penetrated chlorides. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 8, p. 1525 – 1533, 1994.
- GARCIA, E. J. P.; et al. Influencia de la dirección del viento en los perfiles de cloruro obtenidos em estructuras cercanas al Mar Caribe. Caso del viaducto Turiguanó-Cayo Coco em Cuba. **Materiales de Construcción**, v. 55, n. 277, p. 75 – 82, 2005.
- GUIMARÃES, A. T. C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. 2000. 289 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, 2000.
- GUIMARÃES, A. T. C.; CASTRO, P.; NUNES, J. Teor de cloretos próximos a superfície do concreto em ambientes marítimos. In: **Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto**, p. 1 – 11, 2007.

- GUSTAFSSON, M. E. R.; FRAZÉN, L. G. Dry deposition and concentration of marine aerosol in a coastal area, SW Sweden. **Atmospheric Environment**, v. 30, p. 977 – 989, 1996.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 248 p. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.
- INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **FIB Bulletin 34: Model Code for Service Life Design**, 2006.
- LUO, R.; et al. Study os chloride binding and diffusion in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1 – 7, 2003.
- MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 2008. 156 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: Microstructures, Properties, and Materials**. McGraw-Hill, 2014.
- MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. 2004. 369 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- MEIRA, G. R., et al. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement and Concrete Composites**, p. 667 – 676, 2007.
- MEIRA, G. R.; et al. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement and Concrete Composites**, p. 427 – 435, 2010.
- MORCILLO, M.; et al. Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site. **Corrosion Science**, p. 91 – 104, 2000.
- NIELSEN, E. P.; GEIKER, M. R. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 133-138, 2003.
- O'DOWD, C. D.; et al. Marine aerosol, sea-salt, and the marine sulphur cycle: a short review. **Atmospheric Environment**, v. 31, p. 73 – 80, 1997.
- OH, B. H.; JANG, S. Y. Experimental investigation on the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures. 18th International **Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology**, Beijing, p. 2389 – 2396, 2005.
- POULSEN, E.; MEJLBRO, L. **Diffusion of chloride in concrete: Theory and Application**, 1. ed., Abingdon, Taylor & Francis, 2006.
- RAMEZANIANPOUR, A. A.; REZAEI, H. R.; SAVOJ, H. R. Influence of silica fume on chloride diffusion and corrosion resistance of concrete – A review. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 301-321, 2015.
- RASHEEDUZZAFAR; HUSSAIN, S. E.; AL-SAADOUN, S. S. Effect of cement composition of chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 777 – 794, 1991.
- REDDY, B.; et al. On the corrosion risk presented by chloride bound in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 1-5, 2002.

- RIBEIRO, D. V. et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado**: Teoria, Controle e Métodos de Análise. Elsevier Brasil, 1 ed, Rio de Janeiro, 2014.
- SELVARAJ, R.; MURALIDHARAN, S.; SRINIVASAN, S. The influence of silica fume on the factors affecting the corrosion of reinforcement in concrete – a review. **Structural Concrete**, n.1, v.4, p. 19-24, 2003.
- SHEKARCHI, M.; et al. Transport properties in metakaolin blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2217 – 2223, 2010.
- SHI, X., et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 125 – 138, 2012.
- SIDDIQUE, R.; BENNACER, R. Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 69, p. 29-34, 2012.
- SILVESTRO, L. **Validação de modelo para a previsão de vida útil de estruturas de concreto armado: iniciação da corrosão por cloretos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- SILVESTRO, L; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação de modelos para a previsão de vida útil de estruturas de concreto armado localizadas em ambientes com cloretos. **6ª Conferência sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios (PATORREB)**, Rio de Janeiro, 2018.
- SONG, H.; et al. An estimation of the diffusivity of silica fume concrete. **Building and Environment**, v. 42, p. 1358-1367, 2007.
- SONG, H.; LEE, C.; ANN, K. Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 113-121, 2008.
- SUN, Y.; LIANG, M.; CHANG, T. Time/depth dependent diffusion and chemical reaction model of chloride transportation in concrete. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, p. 1114-1122, 2012.
- TANG, L. Chloride ingress in concrete exposed to marine environment – Field data up to 10 years exposure. SP Swedish National Testing and Research Institute. **SP REPORT 2003:16**, 2003.
- THOMAS, M. D. A.; et al. The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1-7, 2012.
- VITALI, M. R. V. **Efeito Do Distanciamento Ao Mar Da Contaminação Do Concreto Por Cloretos**. 2013. 208 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- XU, J.; et al. Influence of elevated temperature on release of bound chlorides from chloride-admixed plain and blended cement pastes. **Cement and Building Materials**, v. 104, p. 9-15, 2016.
- YUAN, Q.; et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review. **Construction and Building Materials**, p. 1 – 13, 2009.
- ZHU, X.; et al. Probabilistic analysis of reinforcement corrosion due to the combined action of carbonation and chloride ingress in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 667-680, 2016.