

ESTUDO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO MODELOS DE DIFUSÃO DIANTE A AÇÃO DE ÍONS CLORETO



Revista
Desafios

Artigo Original
Original Article
Artículo Original

Service life prediction of reinforced concrete structures exposed to chloride ions using diffusion models

Estudio de la vida útil de estructuras de concreto armado atacadas por iones cloro utilizando modelos de difusión

Raydel Lorenzo Reinaldo*¹, Felype Rayan da Silva Sousa², Paulo Victor Silva Avelino de Castro², Lucas Carvalho Quintanilha², Adão Lincon Bezerra Montel¹

¹Professor do Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Tocantins, Brasil.

²Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Tocantins, Brasil.

*Correspondência: Universidade Federal do Tocantins, Av. NS 15, 109 Norte, Palmas, Tocantins, Brasil.
CEP:77.010-090. e-mail rlorenzo@uft.edu.br

Artigo recebido em 29/08/2018 aprovado em 21/09/2018 publicado em 31/10/2018.

RESUMO

Estruturas de concreto armado estão sujeitas a inúmeras manifestações patológicas, sendo a corrosão iniciada pela difusão de íons cloreto uma das mais agressivas e onerosas. Por isso mesmo, diversos estudos têm sido conduzidos para determinar a vida útil dessas estruturas, mas ainda não há pleno consenso. Nesse sentido, este trabalho objetiva estabelecer um padrão de ensaio para determinar a vida útil de estruturas de concreto armado devido a ação dos íons cloreto, além de analisar a variação do coeficiente de difusão ao se utilizar distintas relações água/cimento. Para alcançar tais objetivos, foram adotadas normativas nacionais e internacionais para orientar as etapas de caracterização dos materiais, além da utilização de equações de modelagens de perfis de penetração de cloretos para determinar o coeficiente de difusão e, por consequência, a vida útil da estrutura. Por fim, pôde-se concluir que ao se diminuir a relação água/cimento, houve diminuição da concentração de cloretos em uma determinada camada, proporcionando assim maior vida útil para o concreto armado. Quanto à análise probabilística, foi possível notar que quanto menor a proporção de água e cimento maior o índice de confiabilidade, uma vez que a probabilidade de falhar também reduz.

Palavras-chave: Corrosão, Difusão de Cloreto, Vida Útil.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures are subject to numerous pathological manifestations, and corrosion is initiated by the diffusion of chloride ions, one of the most aggressive and costly. For this reason, several studies have been conducted to determine the service life of these structures, but there is still no full consensus. In this sense, this work aims to establish a test pattern to determine the service life of reinforced concrete structures due to the action of chloride ions, in addition to analyzing the diffusion coefficient variation using different water/cement ratios. To achieve these objectives, national and international standards were adopted to guide the characterization stages of the materials, as well as the use of equations of modeling of chloride penetration profiles to determine the diffusion coefficient and, consequently, the service life of the structure. Finally, it was possible to conclude that when the water/cement ratio was reduced, there was a decrease in the concentration of chlorides in a given layer, thus providing a longer service life for the reinforced concrete. As for the probabilistic analysis, it was possible to note that the lower the water and cement ratio the higher the reliability index, since the probability of failure also decreases.

Keywords: Corrosion, Chloride Diffusion, Service Life.

RESUMEN

Las estructuras de hormigón armado están sujetas a numerosas manifestaciones patológicas, siendo la corrosión iniciada por la difusión de iones cloruro una de las más agresivas y onerosas. Por eso mismo, varios estudios han sido conducidos para determinar la vida útil de esas estructuras, pero aún no hay pleno consenso. En este sentido, este trabajo objetiva establecer un patrón de ensayo para determinar la vida útil de estructuras de hormigón armado debido a la acción de los iones cloruro, además de analizar la variación del coeficiente de difusión al utilizar distintas relaciones agua/cemento. Para alcanzar tales objetivos, se han adoptado normativas nacionales e internacionales para orientar las etapas de caracterización de los materiales, además de la utilización de ecuaciones de modelado de perfiles de penetración de cloruros para determinar el coeficiente de difusión y, por consiguiente, la vida útil de la estructura. Por último, se pudo concluir que al disminuir la relación agua / cemento, hubo disminución de la concentración de cloruros en una determinada capa, proporcionando así mayor vida útil para el hormigón armado. En cuanto al análisis probabilístico, fue posible notar que cuanto menor la proporción de agua y cemento mayor el índice de confiabilidad, una vez que la probabilidad de fallar también reduce.

Descriptor: Corrosión, Difusión de Cloruro, Vida Útil.

INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil (PEDROSO, 2009). Como foi notado que o concreto não resistia muito bem à tração teve-se a necessidade de escolher um material resistente a este esforço, no caso o aço (BOTELHO e MARCHETTI, 2013). Este material, por sua vez, está sujeito a algumas patologias, entre elas a principal é a corrosão (MOTA et al., 2012). Este processo causa grandes perdas no setor da construção, obrigando que sejam desenvolvidos planos de manutenção preventiva para conseguir atenuar os efeitos causados por agentes danosos às estruturas. Entre os agentes corrosivos a ação dos íons cloretos, foco de estudo deste trabalho, é considerado uma das mais agressivas falando-se de corrosão (MOTA et al., 2012).

Os íons cloretos agem de forma mais intensa em regiões litorâneas, devido a nevoa salina advinda do mar ou os cloretos atacam o concreto devido ao contato direto com a água salgada (MOTA et al., 2009).

O cloreto pode penetrar no concreto, principalmente, por meio da absorção capilar, permeabilidade e difusão (AGOPYAN e SATO, 1998). A penetração do cloreto está ligada diretamente a organização dos poros do material, se os poros estiverem interligados entre si (porosidade aberta) permite a passagem de água ou vapor facilitando o

ingresso do cloreto no concreto (AZEVEDO, 2013). Quanto ao processo de difusão do cloreto no concreto, este ocorre a favor de um gradiente de concentração, ou seja, de meio de maior concentração para um de menor concentração.

Tendo em mente a importância das estruturas de concreto, sabendo os agentes que podem prejudicar a estrutura e tendo conhecimentos também de modelos matemáticos referentes à ação do cloreto no concreto, os principais grupos de pesquisa do mundo têm trabalhado na elaboração de modelos para prever a vida útil de estruturas de forma quantitativa. Vários destes modelos já tem amadurecido o suficiente no que diz respeito ao conhecimento dos mecanismos de deterioração, e utilizam parâmetros que podem ser obtidos na maioria dos laboratórios de materiais de construção, portanto, sendo viável a aplicação modelos matemáticos para o dimensionamento de estruturas de concreto armado quanto a durabilidade desejada.

Outros pesquisadores estão usando métodos probabilísticos para estipular a vida útil do conjunto concreto-armadura, levando assim a determinar a possibilidade de uma construção durar um determinado tempo (POSSAN, 2010).

Porém, os métodos tradicionais empregados para o dimensionamento de estruturas de concreto armado não quantificam o período de vida útil da

estrutura de forma precisa. A maior parte das normativas de dimensionamento deste tipo de estruturas se ocupa da vida útil mediante a prescrição da composição do concreto e as espessuras mínimas de recobrimento. Esta metodologia supõe de forma qualitativa a vida útil mediante exigências de requisitos em função da classificação do ambiente e o tipo de estrutura.

Devido a necessidade de um embasamento para auxiliar a produção de concreto armado, esta pesquisa determina quantitativamente a vida útil de estruturas de concreto quanto a ação do íon cloreto. Este estudo também possui alguns parâmetros variáveis a respeito do preparo do concreto para que se tenha um maior universo de aplicação. Quanto a determinação da vida útil, foram usados a segunda lei de Fick e um método probabilísticos, pois este, é considerado mais representativo para calcular a ocorrência de uma vida útil especificada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de utilizar um procedimento de ensaio para obtenção do coeficiente de difusão de cloretos foram aplicadas diversas normativas conceituadas nacionalmente e internacionalmente.

A princípio, foram elaborados corpos de prova (10X20cm) utilizando-se o Cimento Portland tipo CPII-Z 32 com massa específica igual a 3100 kg/m³ devido esse ser um dos tipos mais difundidos e utilizados no país. Para tanto fez-se a caracterização física dos agregados a serem empregados de forma que possa ser calculada a dosagem. Também foram realizados os ensaios de determinação da massa unitária e determinação da massa específica, para os agregados graúdo e miúdo. Os resultados obtidos seguem abaixo.

Tabela 1. Caracterização dos agregados.

AGREGADO MIÚDO		
Massa Específica (kg/m ³)	2688,25	2688,25
Modulo de Finura	3,26	3,26
AGREGADO GRAÚDO		
Massa Específica (kg/m ³)	2582,5	2631,5
Massa Unitária Compactada	1505,0	2110,9
Diâmetro Máximo	12,5	19,0

Fonte: Elaborado pelos autores.

De posse dessas características variou-se a relação água/cimento de 0,4 para 0,6 no cálculo da dosagem, sabendo-se que essa relação influi diretamente na quantidade de vazios final da estrutura que por sua vez pode influenciar no transporte e atuação do cloreto.

Foi utilizado o método do volume unitário, com tabelas adaptadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), pois este método permite a livre variação da relação água/cimento sem alterar os procedimentos de cálculo, além de ser um método bastante difundido e utilizado pelo país.

O concreto utilizado no experimento foi executado *in-loco*, com o auxílio de uma betoneira, de acordo com as normas: ABNT NBR 12655: 2015 e ABNT NM 33: 1994. Durante a execução da concretagem foram realizados os ensaios de ar incorporado, do qual pode obter a quantidade de ar que está embutido no concreto produzido, o que pode ser outra variável a influenciar na penetração de cloretos, e slump.

O concreto produzido também foi utilizado para confecção dos corpos de prova, conforme ABNT NBR 5738: 2015, a serem empregados nos ensaios de rompimento axial, capilaridade e obtenção do coeficiente de difusão de cloretos. No âmbito das normativas nacionais não existe uma que se dedique a

obtenção do coeficiente de difusão de cloretos de forma precisa. Sendo assim, para obtenção desse parâmetro utilizou-se as seguintes normas ASTM C1556 e NT Build 443.

O procedimento básico para determinação do coeficiente de difusão de cloretos iniciou-se sempre em uma data preestabelecida posterior à cura úmida de 28 dias. Nestas datas foram preparadas soluções de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) à concentração de aproximadamente 3g/l, cortou-se o corpo de prova à distância de 75mm paralelamente a face finalizada (topo do corpo de prova) e parafinou-se toda superfície do espécime de 75mm menos a face criada pelo corte. Esse espécime foi utilizado como amostra do experimento logo ele teve que ser colocado na solução previamente elaborada. Do restante do corpo de prova foi retirado uma amostra de 20 mm (a partir da face do corte) para que esta fosse utilizada na determinação da concentração inicial de cloretos.

A massa dos espécimes deixados em banho na solução de hidróxido de cálcio foi verificada em períodos de 24 horas até que permanecesse constante. Nesse momento foi transferido as amostras para uma solução de Cloreto de Sódio à concentração de $165 \pm 1 \text{g/l}$, na qual os espécimes permaneceram por um período mínimo de 35 dias. Após esse período foram retiradas a amostra e em seguidas fatiadas em discos a diferentes profundidades evitando o contato prolongado da amostra com o ar. Ao finalizada a etapa descrita anteriormente, executou-se o ensaio de titulação para determinação das concentrações de

cloreto em cada fatia, ou seja, cada profundidade da amostra.

O algoritmo de ajuste foi utilizado para adequar o modelo aos teores de cloretos achados nos ensaios químicos de titulação e com isto se determinou o coeficiente de difusão de cloretos. Uma vez determinados os coeficientes de difusão foi possível prosseguir com os cálculos para determinação da vida útil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a melhor compreensão dos resultados é apresentada a Tabela 2, contendo os valores dos ensaios: resistência a penetração de água, coeficiente de absorção, porosidade, resistência a compressão axial, ar incorporado, volumes de poros, raio dos poros massa específica do concreto, abatimento do tronco de cone, concentração superficial “Cs” e coeficiente de difusão do cloreto “D”.

Pode se inferir uma relação entre o ar incorporado e a porosidade, e dessa forma à penetração do íon cloreto. Logo nota se uma proporcionalidade direta entre esses fatores.

A partir do ensaio de absorção física pode-se observar que o concreto com maior relação água/cimento obteve-se uma maior quantidade de poros e conseqüentemente uma área superficial de contato maior. Sendo que ambas as amostras se enquadram em concretos mesoporosos com poros de diâmetros na faixa de 2-50nm (ECHEVERRIA et al., 1999).

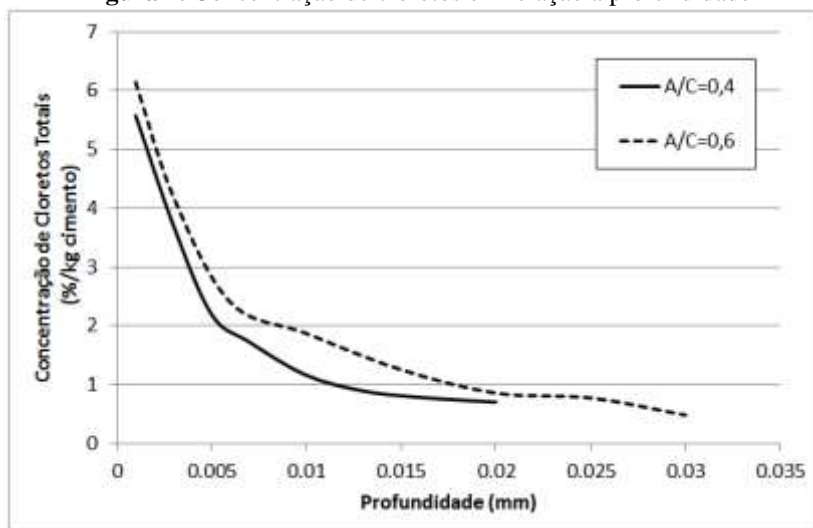
Tabela 2. Ensaios de caracterização do concreto.

ENSAIOS		RELAÇÃO A/C			
		0,4		0,6	
		MÉDIA	COV	MÉDIA	COV
Massa Especifica do Concreto (kg/m ³)		2302,76	-	2266,07	-
abatimento do tronco de cone (mm)		80	-	80	-
Ar incorporado Pressométrico		2,17%	-	2,50%	-
Resistencia a Compressão Axial (Mpa)		30,73	12%	12,77	13%
Absorção de Água por Capilaridade	Resistência a Penetração de água (s/m ²)	3,98E+07	53%	2,57E+07	61%
	Coefficiente de Absorção (Kg/m ² xs ^{1/2})	5,38E-03	28%	1,36E-02	12%
	Porosidade (%)	3,19%	12%	5,90%	6%
Difusão Aparente do Cloreto	Cs (%)	5,6%	-	6,24%	-
	D (mm ² /s)	7,69E-12	-	9,12E-12	-
Absorção Física (N2 70k)	Volume dos Poros (cm ³ /kg)	21,53	-	22,96	-
	Raio dos Poros (Å)	21,208	-	21,149	-

Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise do Tabela 2 possibilita a inferência de que a variação da relação água/cimento é inversamente proporcional à variação da resistência do concreto tal como afirma ANDRADE (2005).

A obtenção do coeficiente de difusão pelo método adotado pode resultar uma ampla variação de valores (ASTM C1556, 2011). Os resultados obtidos não fugiram do previsto em norma.

Figura 1. Concentração de cloretos em relação a profundidade

Fonte: Elaborado pelos autores.

ANDRADE (2001) evidencia que há uma relação entre o crescimento coeficiente de difusão de cloretos e o aumento da relação água cimento, devido a observável diferenças na penetração do íon em relações diferentes (Figura 2). Dessa forma adotou-se,

como aplicáveis, os valores das medias obtidas nos ensaios, tendo em vista que a distribuição do cloreto ao longo dos corpos de prova apresentou relativa diferença tal como em LORENZO e OSSORIO (2014).

Para determinação do tempo de despassivação do aço na estrutura de concreto, ocasionada pela ação danosa do íon cloreto foi aplicada a segunda lei de Fick descrita pela Eq. (1).

$$t = \left[\frac{4D_1}{x^2} \left(\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{cr}(x,t)}{C_s} \right) \right)^2 \right]^{1/(\alpha-1)} \quad (\text{Eq. 1})$$

$C(x, t)$ = concentração de cloretos em uma certa profundidade, tendo como referência a superfície do concreto, em um determinado tempo (%);

C_s = concentração superficial, esta depende do ambiente em que a estrutura está submetida (%);

D = coeficiente de difusão de cloreto (cm^2/ano);

x = profundidade, tendo como referência a superfície do concreto (cm);

t = tempo (anos)

erf = função complementar de erro de Gauss.

α = fator de consideração da variação do “D” no tempo, GJØRV (2014) sugere que seja igual a 0,4.

Para efeitos práticos foram adotados os valores descritos na Tabela 3, no qual “Clim” representa a concentração limite de íons cloreto, no interior da estrutura de concreto armado, para que ocorrer o a despassivação da armadura.

É possível avaliar, que o concreto com menor relação água/cimento possui maior tempo de vida útil quando comparado com o concreto produzido com maior quantidade de água, estando assim os valores em conformidade com a teoria.

Tabela 3. Resultados método determinístico

ÁGUA/ CIMENTO	0,4	0,6
α	0,4	0,4
D(m^2/s)	7,69E-12	9,12E-12
C_s (%)	1,5	1,5
Clim (%)	0,4	0,4
Cobrimento (mm)	40	40
t media da simulação(ano)	66,9	57,0

Fonte: Elaborado pelos autores.

GJØRV (2014) sugere a utilização do método de simulação Monte Carlo juntamente com aproximação de Chebychev representada pela Eq. (2). Esta última foi utilizada para determinação do número de simulações “ $N_{c(\varepsilon, \delta)}$ ” em função do complementar do nível de segurança “ δ ” e do erro admitidos “ ε ”, para um melhor ajuste à realidade. Dessa forma, optou-se pela realização de 200000 simulações no intuito de se obter um nível de confiança de 95% e se admitir um erro de 0,5%.

$$N_{c(\varepsilon, \delta)} = 1 / (4\delta\varepsilon^2) \quad (\text{Eq. 2})$$

Os resultados do tempo de durabilidade bem como a probabilidade desse valor ser menor que 50 anos estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados método probabilístico

ÁGUA/CIMENTO	0,4	0,6
t médio (anos)	63,25	49,91
COV (%)	0,36	0,25
Desvio Padrão	22,87	12,59
Probabilidade de falha (t<50)	3,50E-05	2,61E-01
Índice de confiabilidade	3,98	0,64

Fonte: Elaborado pelos autores.

CONCLUSÃO

Primeiramente podemos verificar a diminuição da resistência à compressão com o aumento da quantidade de água por quilograma de cimento, usado na produção do concreto, resultado este já esperando, pois é uma verdade universal na engenharia que quanto maior a relação água/cimento menor a sua resistência à compressão, a não ser que seja usado algum tipo de aditivo no preparo do concreto.

Na mesma linha de raciocínio podemos verificar também que a relação água/cimento influencia na concentração de cloreto nas diversas

camadas da estrutura de concreto, isto é, quanto maior for a relação água/cimento maior será a concentração de cloreto em uma determinada camada. Essa afirmação ganha significância quando se verifica que valores de coeficiente de absorção, porosidade e volumes de poros foram maiores na relação água/cimento 0,6 e quando se averigua que as grandezas equivalentes aos raios dos poros e resistência a penetração de água são maiores na relação água cimento igual a 0,4, pois a interpretação dessas grandezas informadas anteriormente demonstra o grau de dificuldade que a água, e pôr consequência os íons cloretos, possuem para adentrar na estrutura de concreto.

Quanto as análise do tempo de despassivação do aço do concreto armado, este pôde ser calculado pelo método determinístico e probabilístico. No primeiro, os parâmetros em seus valores médios, estes encontrados experimentalmente, foram usados para substituir as suas variáveis correspondentes na segunda lei de FICK que simula o comportamento da difusão de cloreto no concreto. Ao fim desse procedimento foi obtido o valor da variável desejada, que no caso deste trabalho é o tempo de despassivação (t). É importante ressaltar que os valores obtidos pelo método determinístico, foram satisfatórios, pois evidenciaram o que as teorias informam, ou seja, o concreto com menor quantidade de água no traço possui maior vida útil.

Por fim, a análise probabilística possibilitou a averiguação da variabilidade estocástica do tempo de despassivação, sugerindo um comportamento médio próximo ao encontrado por meios determinísticos. Nesse âmbito obteve-se também a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade que por sua vez reafirmam, a já esperada, maior confiança quanto aos concretos com menor quantidade de água.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1998 NM 33:1994- Concreto - Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1 jul., p. 4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2015a, NBR 12655:2015-Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 15 jan., p. 23.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2015b, NBR 5738:2015-Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 28 jan., p. 9.

ANDRADE, J. J. de O. Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos. Porto Alegre, RS. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS; 2001.

ANDRADE, J. J. de O. Critérios Probabilísticos para a Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado. **Revista Engenharia Civil**. v. 22, p. 35-47, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2010, ASTM C1556 – Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. Pennsylvania - USA, p. 7.

AZEVEDO, J. M. C. B. Absorção Por Capilaridade De Soluções Aquosas Salinas Em Materiais Porosos. Porto, POR. **Dissertação de Mestrado**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2013.

BOTELHO, M. H. C; MARCHETTI, O. **Concreto Armado Eu Te Amo**. 7 ed., São Paulo, Blucher; 2013.

ECHEVERRIA, E. J. C.; MORERA M. T.; MAZKIARÁN C.; GARRIDO J. J. Characterization of the porous structure of soils: adsorption of nitrogen and carbon dioxide and mercury porosimetry. **European Journal of Soil Science**. v. 50, p. 497-503, 1999.

GJØRV, O. E. **Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments**. 2 ed., New York, CRC Press; 2014.

LORENZO, R.; OSSORIO, A. Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad Antioquia**, v. 72, p. 161172, 2014.

MOTA, J. M. F.; CANDEIAS NETO, J. A.; PONTES, R. B.; CARNEIRO A. M. P. Análise Das Patologias em Estruturas de Concreto na Zona Litorânea da Cidade do Recife-PE. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA, 10, Valparaíso-Chile. **Anais**. Valparaíso, p. 1-15, 2009.

MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R.; SILVA, A. J. C. e; FRANCO, A. P. G.; CARVALHO, J. R. Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado devido ao Ataque de Íons Cloreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54, Alagoas. **Anais**. IBRACON, p. 1-16, 2012.

PEDROSO, F. L. Concreto: As Origens e a Evolução do Material Construtivo Mais Usado pelo Homem. **Revista Concreto e construções**. n. 53, p 14-19, 2009.

POSSAN, E. Modelagem Da Carbonatação E Previsão De Vida Útil De Estruturas De Concreto Em Ambiente Urbano. Porto Alegre, RS. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande Do Sul; 2010.

SATO, N., M., N.; AGOPYAN, V. Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos. **Boletim técnico**. São Paulo, EPUSP, 1998.