XVII Congresso Internacional sobre Patologia e
Reabilitação das Construções

XVII Congreso Internacional sobre Patología y
Rehabilitación de las Construcciones

XVII International Conference on Pathology and
Constructions Rehabilitation

FORTALEZA (Brasil), 3 a 5 de junho de 2021

<https://doi.org/10.4322/CINPAR.2021.074>

Modelagem do mecanismo de cinética do CO₂ no processo de carbonatação natural do concreto

Modeling the CO₂ kinetic mechanism in the natural carbonation process of concrete

Matheus de Souza Silva¹, Davi Valente Santos², Esequiel Mesquita³

¹ Faculdade Ari de Sá – FAS, Ceará, Brasil, matheus.engcv@outlook.com

² Faculdade Ari de Sá – FAS, Ceará, Brasil, davi.valente@aridesa.com

³ Universidade Federal do Ceará, Ceará, Brasil, emesquita@ufc.br

Resumo: Modelos mais comuns de previsão da carbonatação em concreto assumem que a cinética de ingresso do CO₂ é função da raiz quadrada do tempo por uma constante de difusividade, sem levar em consideração modificações microestruturais de permeabilidade e de formação de sais na matriz porosa no qual desaceleram o processo, fazendo com que as modelagens existentes não representem de forma precisa o avanço da frente carbonatada. Com base em um programa experimental que inclui testes de profundidade de carbonatação em corpos de prova de concreto em condições de exposição natural durante os intervalos de 14, 28, 56 e 84 dias e análises dos termos das equações e de suas condições de contorno, o objetivo desse trabalho é propor um modelo de termo de difusividade capaz de ser empregado em equações existentes e que represente de forma satisfatória o fenômeno. Decorrente ao que foi proposto, é possível descrever que a cinética de penetração do CO₂ pode ser escrita em função da permeabilidade, pressão do dióxido de carbono, área de contato e quantidade de sais de carbonato formados. O termo modelado apresentou variação máxima de 25% em relação aos dados reais obtidos, demonstrando boa representatividade para as condições na qual foi submetido.

Palavras-chave: Carbonatação; Difusão; Modelagem.

Abstract: Most common models to predict carbonatation in concrete assume that the kinetics of CO₂ ingress is a function of the square root of time due to a diffusivity finding, without taking into account microstructural modifications of permeability and formation of salts in the porous matrix in which they slow down the process, causing that the existing models do not accurately represent the advance of the carbonated front. Based on an experimental program that includes carbonation depth tests on concrete specimens under conditions of natural exposure during the intervals of 14, 28, 56 and 84 days and analyzes of the terms of the equations and their boundary conditions, the objective of this work is to propose a diffusivity term model capable of being used in existing equations and that satisfactorily represents the phenomenon. Due to what was proposed, it is possible to describe that the penetration kinetics of CO₂ can be written as a function of permeability, carbon dioxide pressure, contact area and amount of carbonate salts formed. The modeled term showed a maximum variation of 25% in relation to the actual data obtained, showing good representativeness for the conditions in which it was submitted.

Keywords: Carbonation; Diffusion; Modeling.

1. Introdução

A concentração de dióxido de carbono na atmosfera contribui com o agravamento da degradação das construções de concreto, visto que parte do CO₂ presente no ambiente é absorvido por via porosa, caracterizando o processo de carbonatação. Esse é um dos principais causadores de degradação de estruturas de concreto armado que não pode ser negligenciada e, portanto, uma compreensão e quantificação adequada do processo é essencial para trabalhos de manutenção e reparo em construções existentes (TA et al., 2016b).

Como a cinética de transporte de gases acontece na matriz porosa e suas reações promovem modificações microestruturais, como é o caso da carbonatação (JIANG; GU, 2016), se faz necessário avaliar os fenômenos ocorrentes nessa esfera, pois o ingresso de qualquer substância agressiva é determinado por sua estrutura porosa, principalmente a parte acessível (FENAUX et al., 2019).

Logo, devem ser adotadas metodologias que descrevem o grau de absorção de CO₂ em concretos por via porosa, visto que a taxa de carbonatação está correlacionada com a possibilidade de corrosão (GENG et al., 2016), nos quais contribuem para o monitoramento e controle do tempo de vida útil das estruturas (ELLINGWOOD, B. R., FRANGOPOL, D. M., 2016). Portanto o objetivo desse trabalho é propor um modelo de termo de difusividade capaz de ser empregado em equações existentes e que represente de forma satisfatória o fenômeno.

2. Modelagens de predição de carbonatação

Além da concentração de CO₂, outras características do ambiente e do traço, como umidade relativa do ar, temperatura, tipo de cimento, relação água cimento (a/c) e resistência à compressão são empregadas nas formulações matemáticas como dados de entrada que contribuem para o avanço da frente carbonatada. No entanto, existem outros fatores que interferem no processo de carbonatação e apresentam modificações do seu estado com o passar do tempo. Esses agentes não são previstos pelas modelagens simples e são responsáveis por parte das inconsistências apresentadas pelas equações determinísticas (RIGO; OLIVEIRA; POSSAN, 2018), sendo eles decorrentes da interação entre o ambiente externo e características do traço, além de variações em relação às metodologias de predição (VON GREVE-DIERFELD et al., 2020).

Mediante as diversas metodologias existentes para explicar a absorção do CO₂ no concreto, os pesquisadores estão de acordo que o avanço da carbonatação pode ser expresso de forma simplificada a partir da equação de difusão apresentada por (TUUTTI, 1982), expressando o fenômeno por meio do tempo. Fazendo com que o processo seja relacionado ao monitoramento da vida útil das estruturas, uma vez que esse processo está diretamente relacionado ao monitoramento da vida útil das estruturas (FELIX; POSSAN, 2018).

As equações propostas por Bob e Afanna (1993) e Possan (2010) são de cunho determinístico, na qual a equação de Bob e Affana (1993) possui uma interação entre o tipo de cimento, umidade relativa do ar e a concentração de CO₂ disponível no ambiente, demonstrando que esses fatores estão correlacionados com a resistência à compressão apresentada pelo concreto, ou seja, quando maior for o valor de resistência à compressão, menores serão as interferências geradas pelos demais fatores empregados.

A formulação proposta é apresentada na equação 1, Onde: c = Coeficiente do tipo de cimento; k = Coeficiente dependente da umidade relativa do ar; f_c = Resistência à compressão do concreto, d = Coeficiente referente a quantidade de CO₂ e t = Tempo em anos. Os valores das variáveis podem ser observados no trabalho de (SILVA et al., 2019a).

$$y = \left(\frac{c \cdot k \cdot d}{f_c} \right) \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

A modelagem proposta por Possan (2010) é dependente de diversos fatores que envolvem o processo de captura de CO₂, tanto fatores referentes ao concreto como fatores referentes ao meio de exposição, sendo que cada agente da formulação é analisado de modo individual, na qual se obterá um coeficiente que representa a influência de cada variável no fenômeno. A formulação proposta é descrita na equação 2. Onde:

y = Profundidade de carbonatação (mm); f_c = Resistência média a compressão (MPa); k_c = Fator dependente do cimento; k_{fc} = Fator dependente da resistência à compressão do concreto, função do tipo de cimento; t = Tempo (anos); ad = Teor de adição pozolânica no concreto (% em relação à massa do concreto); k_{ad} = Fator dependente das adições, em função do cimento; UR = Umidade relativa do ar (0,01%); k_{UR} = Fator dependente da umidade relativa do ar, em função do cimento; CO_2 = Teor de dióxido de carbono no ambiente (%); k_{CO_2} = Fator dependente do teor de dióxido de carbono no ambiente, em função do cimento; k_{ce} = Fator dependente do ambiente de exposição (protegido ou desprotegido), em função das condições de exposição do concreto. As variáveis apresentam valores tabelados e podem ser conferidos no trabalho de (SILVA et al., 2019a).

$$y = k_c \cdot \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{K_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{K_{RU} \cdot (UR - 0.58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot K_{ce} \quad (2)$$

Os modelos discutidos anteriormente podem não apresentar adequação aos resultados reais, fazendo com que os valores resultantes das equações de predição possibilitem diagnósticos imprecisos, não representando a realidade do fenômeno, pois as formulações não avaliam as modificações físico-químicas que o concreto sofre ao longo do tempo de exposição ao agente agressivo. Outra possível causa da não conformidade é que os métodos tradicionais são baseados em regressão linear que podem assumir observações independentes ou sem correlações entre os dados de entrada que levam a não avaliação dos níveis hierárquicos dos influentes no processo (M.B. SIKKEL, K.T. MACLEOD, F. GORDON, 2013).

Em relação a dificuldade de entender o comportamento da penetração do dióxido de carbono por via porosa, se faz necessário avaliar como as modificações microestruturais e demais fatores dinâmicos influenciam no avanço da frente carbonatada e como esses termos podem contribuir para a melhoria das formulações de predição.

3. Materiais e métodos

3.1 Produção das amostras

Foram produzidas 23 amostras cilíndricas de concreto, com proporções de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura, submetidas a cura úmida por imersão durante 28 dias conforme as orientações descritas na NBR 5738 (ABNT, 2015). Já para o ensaio de consistência foi adotado as prescrições estabelecidas pela NBR NM 67 (ABNT, 2009) e para o ensaio de resistência a compressão seguiu-se as prescrições conforme estabelece a NBR 5739 (ABNT, 2007). A dosagem adotada para a produção dos corpos de prova foi a prescrita pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

O consumo dos materiais e a proporção de traço em quilos é descrita na tabela 1, no qual foi utilizado o cimento do tipo CPII-E-32 e adotado como resistência mecânica, após 28 dias de cura, a resistência à compressão de 30MPa para um abatimento de 30 ± 10 mm, no entanto a resistência alcançada foi de 29,3 MPa.

Tabela 1 - Consumo em kg/m³ dos materiais utilizados para a fabricação das amostras

TRAÇO	Cimento	Areia	Brita	Água
1:1,52:2,36:0,47				
Kg	24,45	37,16	57,7	11,5

O agregado miúdo empregado para a produção das amostras foi areia quartzosa que apresentou módulo de finura de 2,38mm, sendo utilizado na produção das amostras apenas o material passante na peneira 4,75. Já para o agregado graúdo foi empregado brita comum de origem basáltica com dimensão máxima

característica de 6,3mm. A distribuição granulométrica dos agregados, tanto miúdo quanto graúdo, seguiram as orientações prescritas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.2 Mensuração da carbonatação

As amostras foram carbonatadas em condição natural em ambiente externo sem proteção contra as intempéries durante quatro intervalos distintos de 14, 28, 56 e 84 dias. Para a mensuração foi empregado a solução de fenolftaleína, na qual é aspergida na face fraturada diametralmente da amostra de concreto para que haja diferença colorimétrica entre a zona carbonatada e não carbonatada. Para essa metodologia foram adotadas as orientações de (POSSAN, 2004) e CPC – 18 (RILEM RECOMMENDATIONS, 1988). As medições foram realizadas apenas nas laterais das amostras, dispensando as bases e evitando as arestas, contabilizando 40 medições, sendo 20 medições de cada lado com distância de 1 cm entre elas.

3.3 Caracterização do ambiente

O ensaio experimental de carbonatação natural foi realizado entre agosto e novembro de 2018 em ambiente de atmosfera urbana, no qual apresentou nesse período valores médios de temperatura e umidade relativa do ar em torno de 27°C e 70,75%.

3.4 Verificação dos dados

Para a verificação da confiabilidade das equações foi equiparado os resultados reais com os obtidos por modelagem de predição, a fim de verificar o grau de distanciamento apresentado e suas implicações para conclusões de dados preditivos.

4 Resultados e discussões

4.1 Formulação do termo

Parte das equações de carbonatação propostas seguem a configuração que todos os parâmetros são interligados, demonstrando dependência conjunta para que seja possível estimar o fenômeno, como é expresso por TA et al. (2016a), Hyvert et al. (2010), Eklou (2018), CEB - FIB (2006) e LIFECON (2003). Desse modo pode-se estabelecer a partir dos autores que os fatores primordiais no processo de carbonatação são aqueles atrelados a poro pressão e cinética de transporte. Logo o termo de difusividade deve conter os seguintes fatores: porosidade, temperatura, pressão atmosférica e pressão de CO₂, teor de reagentes, área de contato e tipo de cimento.

A porosidade do concreto pode ser descrita por uma relação entre a porosidade inicial, como descreve Papadakis; Fardis; Vayenas (1992), e a porosidade do concreto carbonatado, como descreve Park (2008) gerando um fator de permeabilidade. Como existe uma variação do tamanho dos poros em relação ao tempo (MI; PAN; SHEN, 2019), será usado as condições de contorno estabelecidas por (SILVA et al., 2019b).

Para descrever a pressão exercida pelo gás será utilizado uma interação entre a equação dos gases ideais e a equação da lei de Boyle Charles. Existem algumas condições de contorno em relação a temperatura e a carbonatação, como o aumento duplicado da frente carbonatada para temperaturas de 20°C a 40°C (T. MORI; SHIROYAMA; KAMIMURA, A. YODA., 1972) e decréscimo de 30% quando a temperatura varia entre 60°C a 100°C (DROUET et al., 2019), porém temperaturas superiores a 50°C nunca foram registradas, podendo assim desconsiderar a queda dos 30% após os 60°C.

O teor de reagentes pode ser descrito pela capacidade de absorção do CO₂ por meio da relação do grau de hidratação e a concentração molar dos materiais carbonatáveis (YANG; SEO; TAE, 2014), no qual é possível afirmar um aumento molar dos constituintes carbonatáveis com o avanço da idade do concreto, implicando em uma aumento de concentração de apenas 0,56% no intervalo de 1 à 40 anos e decréscimo de 0,11% de 40 a 100 anos (YANG; SONG; SONG, 2013).

A área de contato deve ser considerada visto que a distribuição aleatória dos agregados graúdos, fazem com que a penetração do CO₂ pela matriz porosa apresente trajetória tortuosa (JIANG et al., 2019) e lenta devido a maior densidade do agregado em relação a pasta de cimento endurecida (J.D. HAN, 2012). Para que esse efeito seja minimizado será tratado com área de reação apenas os pontos com ausência de agregado graúdo (JIANG et al., 2019).

Desse modo o termo de difusividade pode ser descrito previamente pela junção dos termos discutidos ajustados para a unidade de milímetros por segundo. Todos os contribuintes comentados estão formulados como apresenta a figura 1.

Figura 1 - termos das formulações da modelagem inicial

Onde: w/c = Relação água cimento; a/c = Relação agregado cimento; w = Densidade da água; c = Densidade do cimento; a = Densidade do agregados; K = Fator de permeabilidade; P = Pressão do gás CO₂ (atm.); n = Número de mols do gás; R = Constante ideal dos gases (0,082 atm.L/mol.K); T = Temperatura (K); V = Volume do gás (L); p = Pressão atmosférica (1 atm.); $T_{celcius}$ = Temperatura (°C); $a_h(t)$ = Grau de hidratação da pasta de cimento no tempo; $M_{ct}(t)$ = Concentração molar dos constituintes carbonatáveis; M_{CO_2} = peso molecular do CO₂ (44g/mol); C = quantidade de cimento em (kg/cm³); a_{∞} = valor ultimo de hidratação; P_t = peso do traço ; P_b = peso da brita.

4.2 Ajustes do termo

Utilizou-se como base as equações de Bob e Affana (1993) e Possan (2010), pois, como afirmou Silva et al. (2020) a interpolação simples entre as duas equações fornece resultados satisfatórios. Logo as modificações referentes a resistência a compressão, grau de interferência da difusividade e demais constantes presentes serão modeladas tendo como base essas formulações.

Para a resistência a compressão uma interpolação simples entre os resultados de carbonatação das simulações descritas para variações entre 20MPa e 40MPa forneceram um decréscimo da frente carbonatada em 46%. Já para o grau de interferência da difusividade foi mostrado que a mesma interpolação entre as equações para um periodo de 980 dias e utilizando umidade ótima de 58% forneceu frente carbonatada de 7,43mm.

Analisando os fatores isoladamente na equação de Possan (2010), é possível afirmar que o termo de difusividade apresenta influência de 33% no resultado final. No caso do teor de CO₂ no ambiente será utilizado os valores de concentração apresentada por (SAETTA A. V.; VITALIANI, 2004). Desse modo a formulação do termo de difusividade do CO₂ pode ser reescrita conforme a equação 3.

$$D_{CO_2} = 163,1362 \cdot \left[(-266,22 \cdot fck + 15,18 \cdot 10^3) \cdot \sqrt{\frac{0,98}{9,66} \cdot P \cdot K \cdot A_{reação} \cdot a_{CO_2(t)} \cdot CO_2} \right] \quad (3)$$

4.3 Análise dos resultados

Os dados reais de profundidade de carbonatação no intervalo de 14, 28, 56 e 84 dias apresentaram valores não homogêneos, ou seja, a variação dos intervalos não é igual entre si. Logo, uma nova média foi realizada dispensando resultados fora do intervalo de desvio padrão.

Visto essas condições, o termo de difusividade modelado foi posto como substituinte do termo difusivo da equação de Possan (2010) e analisado graficamente, juntamente com as outras duas formulações, sua representatividade em relação aos dados reais dos intervalos propostos, conforme descreve a figura 2.

Figura 2 - Comparação dos dados reais e modelos empregados

As equações postas para comparação apresentam certo distanciamento dos dados reais, até o termo de carbonatação modelado e posto junto a equação de Possan apresenta comutação. Desse modo o grau variação das modelagens se mostra imprevisível em relação aos dados reais ou seja, é improvável dizer que o processo de carbonatação pode ser descrito de forma precisa. A figura 3 demonstra a variação percentual dos resultados formulados em relação aos dados reais.

No entanto, mesmo com as divergências apresentadas, o modelo disposto do termo de difusividade não apresenta discrepância em relação aos resultados reais. Nesse caso, os valores da equação de Possan, juntamente com o termo de difusividade, apresenta os menores distâncias entre os modelos, tendo a sua comutação máxima compreendida em 25% em comparação com a variação mínima de 51% apresenta por Bob e Affana (1993), podendo representar de modo satisfatório a frente carbonatada para o intervalo proposto e condições de exposição.

Figura 3 - Variação das modelagens em relação aos dados reais

5 Conclusão

Foi observado que a formulação de um termo dinâmico para caracterizar a penetração do CO₂ a partir de termos como, pressão do gás carbônico, modificações na matriz porosa, teor de reagentes e área de contato, descreve de forma satisfatória o fenômeno de carbonatação no concreto em relação aos dados reais, quando vinculado com a equação proposta por Possan, tendo variações menos impactantes para os resultados finais em relação as demais equações apresentadas. A junção das modelagens possibilita analisar a frente carbonatada em relação ao tempo e, conseqüentemente, estimar o tempo de vida útil das construções, servindo como ferramenta auxiliar no monitoramento da durabilidade das estruturas de concreto existentes frente a ação degradante da penetração de agentes agressivos do ar.

6 Referências

- ABNT. NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 6, 2003.
- ABNT. NBR 5739 - Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 14, 2007.
- ABNT. NBR NM 67 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, n. 2, 2009.
- ABNT. NBR 5738 Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 8, 2015.
- CEB - FIB. **Bulletin 34 - Model code for service life design**. [s.l: s.n.].
- DROUET, E. et al. Carbonation of hardened cement pastes : Influence of temperature. **Cement and Concrete Research**, 2019.
- EKOLU, S. O. Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation. **Cement and Concrete Composites**, 2018.
- ELLINGWOOD, B. R., FRANGOPOL, D. M. Introduction to the state of the art collection: risk-based lifecycle performance of structural systems. **Journal of Structural Engineering**, v. 142, p. 1, 2016.
- FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO₂ uptake in concrete structures : simulation based on the cement content and type *Balanço das emissões e da captura de CO₂ em*. v. 11, n. 7, 2018.
- FENAU, M. et al. Modelling the transport of chloride and other ions in cement-based materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, p. 33–42, 2019.

- GENG, J. et al. Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloride-contaminated concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 68, n. 7, p. 353–363, 2016.
- HYVERT, N. et al. Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 11, p. 1582–1589, 2010.
- J.D. HAN. Damage mechanism and service life prediction of cementitious materials under loading carbonation coupling effects. **Thesis (PhD), Southeast University, P.R. China**, 2012.
- JIANG, C.; GU, X. Discussion of “Assessing concrete carbonation resistance through air permeability measurements” by R. Neves et al. [Construction and Building Materials 82(2015): 304–309]. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 913–915, 2016.
- JIANG, Z. L. et al. Statistical analysis of concrete carbonation depths considering different coarse aggregate shapes. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116856, 2019.
- LIFECON. Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability. 2003.
- M.B. SIKKEL, K.T. MACLEOD, F. GORDON, L. BY S. ET AL. Late Sodium Current Inhibition Reverses Electromechanical Dysfunction in Human Hypertrophic Cardiomyopathy. **Circulation** **128**, v. 10, 2013.
- MI, R.; PAN, G.; SHEN, Q. Carbonation modelling for cement-based materials considering influences of aggregate and interfacial transition zone. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116925, 2019.
- PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Effect of Composition, Environmental Factors and Cementlime Motor Coating on Concrete Carbonation. **Materials and Structures**, v. 25, p. 293–304, 1992.
- PARK, D. C. Carbonation of concrete in relation to CO₂ permeability and degradation of coatings. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 11, p. 2260–2268, 2008.
- POSSAN, E. CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CARBONTAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM AMBIENTE NATURAL E ACELARADO. **Dissertação (mestrado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2004.
- RIGO, E.; OLIVEIRA, C. E. DE; POSSAN, E. Aplicação de modelagem matemática para fins de previsão de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à ação de CO₂. **3º Simpósio paranaense de patologia das construções - 3ºSPPC**, n. May, p. 245–256, 2018.
- RILEM RECOMMENDATIONS. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. **TC56-MHM HYDROCARBON MATERIALS TC56-MHM MATt RIAUX HYDROCARBONT]S CPC-18**, 1988.
- SAETTA A. V.; VITALIANI, R. V. Investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: theoretical formulation. **Cement and Concrete Research**, v. 34, 2004.
- SILVA, M. et al. Eficiência dos modelos de predição da evolução da carbonatação. **Conresso Brasileiro do Concreto - CBC**, v. 61, n. 1, 2019a.
- SILVA, M. D. S. et al. Avanço da carbonatação em concretos para idades iniciais. **II Simpósio Brasileiro sobre reabilitação das construções - SBREB II**, 2019b.
- T. MORI, K.; SHIROYAMA, K.; KAMIMURA, A. YODA. On carbonation of Portland blast-furnace slag cement concrete. **General Meeting Cement Association of Japan**, 1972.
- TA, V. et al. A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 172–181, 2016a.
- TA, V. L. et al. A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 172–181, 2016b.
- TUUTTI, K. Corrosion of Steel in Concrete. **Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, Suecis**, 1982.
- VON GREVE-DIERFELD, S. et al. **Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC**. [s.l: s.n.]. v. 53
- YANG, K. H.; SEO, E. A.; TAE, S. H. Carbonation and CO₂ uptake of concrete. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 46, p. 43–52, 2014.
- YANG, K. H.; SONG, J. K.; SONG, K. IL. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. **Journal of**

Cleaner Production, v. 39, p. 265–272, 2013.