

A CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE FILER CALCÁRIO PROTEGIDOS POR PELÍCULA PROTETORA

CARBONATATION OF CONCRETE WITH HIGH CONTENTS OF LIME FILER PROTECTED WITH PROTECTIVE FILM

Gustavo de Aguiar Isaia gustavo.isaia@facens.br
Centro Universitário Facens – Sorocaba, SP, Brasil

Submetido em: 24 maio 2021. Aceito em: 29 nov. 2021.

RESUMO

O presente artigo tem por objetivo o estudo da carbonatação em concretos com elevados teores de Filer Calcário (FC) protegidos por uma película protetora (*pintura acrílica*). São apresentados os resultados de resistência à compressão aos 28 e 91 dias de idade, profundidade carbonatada a 3, 6, 9 e 12 semanas, bem como o coeficiente de carbonatação (*kc*). Os resultados demonstram que a aplicação da película protetora diminui significativamente a profundidade carbonatada e conseqüentemente o *kc*. Também foi possível constatar que, à medida que o teor de FC aumenta nas misturas, ocorre uma minoração da resistência à compressão e uma majoração da profundidade carbonatada e *kc*. Debita-se a incorporação de Cinza Volante (CV), no traço FC70CV10, o desempenho insatisfatório devido, provavelmente, ao consumo da reserva alcalina advinda das reações de formação de C-S-H secundário. Conclui-se que a aplicação da película protetora aumenta significativamente a resistência à carbonatação dos concretos estudados em especial do FC70CV10P.

Palavras-chave: Carbonatação. Película protetora. Filer calcário.

ABSTRACT

The article aims to study the carbonation in concrete with high levels of Filer Limestone (LF) protected by a protective film (*acrylic paint*). The results of compressive strength at 28 and 91 days of age, carbonate depth at 3, 6, 9 and 12 weeks are presented, as well as the carbonation coefficient (*kc*). The results show that the application of the protective film significantly reduces the carbonated depth and consequently the *kc*. It was also possible to verify that as the FC content increases in the mixtures there is a reduction in the compressive strength and an increase in the carbonated depth and *kc*. The incorporation of fly ash (FA) is debited in the FC70CV10 line, the unsatisfactory performance, probably due to the consumption of the alkaline reserve arising from the reactions of secondary C-S-H formation. It is concluded that the application of the protective film significantly increases the carbonation resistance of the studied concretes, especially of FC70CV10P.

Keywords: Carbonation. Protective film. Limestone filer.

INTRODUÇÃO

A corrosão do aço por carbonatação constitui-se em uma das causas mais frequentes de deterioração das estruturas de concreto armado. Embora esteja protegido contra a corrosão pela película passivadora, a mesma é vulnerável à ação do CO₂ que penetra no concreto. A maneira mais usual de prevenção deste tipo de deterioração consiste em garantir que a camada de

cobrimento possua a qualidade e espessura adequadas para garantir a integridade da armadura.

Sejam por razões estéticas e/ou de durabilidade, muitas estruturas de concreto armado são pintadas. Esta situação altera as condições de exposição, tendo em vista a criação de uma nova barreira entre o CO₂ e a armadura. Tal pintura é formada por um filme contínuo e aderente ao concreto variando de 100 µm a 1 mm de espessura, podendo apresentar um desempenho variável em função da qualidade da tinta, bem como com o número de demãos de aplicação da mesma.

Usualmente utiliza-se o ensaio de carbonatação acelerada sobre corpos de prova (cp's) de concreto pintados e não pintados com o intuito de determinar a resistência à penetração de CO₂. Tendo em vista a elevada resistência à difusão do CO₂ das tintas, em especial das acrílicas, sendo estas as mais utilizadas como película protetora anti-carbonatação no concreto, a aplicação destas na superfície dos elementos estruturais de concreto armado permite o aumento de sua vida útil, em especial em ambientes agressivos.

Em se tratando de estruturas de concreto compostas por elevados teores de substituição de CP por adições minerais (AM), e que são mais susceptíveis a difusão do CO₂ devido à baixa reserva alcalina, a aplicação de tintas do tipo acrílica constitui em uma opção bastante interessante para conferir ao concreto armado a manutenção da sua vida útil projetada.

Em estudo conduzido por Kazmierczak e Helene (1995) foram utilizados diferentes sistemas baseados em pintura, nos quais foi avaliada a carbonatação para uma vida útil da estrutura de 50 anos. Neste caso o melhor desempenho deu-se pela aplicação de uma resina à base de poliuretano. Todavia, a aplicação deste tipo de produto não é usual em grandes superfícies de concreto, seja do ponto de vista prático (*facilidade de aplicação*), ou seja do ponto de vista econômico (*custo*).

A utilização de um verniz acrílico mostrou que a estimativa de profundidade de carbonatação do concreto, depois de 50 anos de exposição, é de 2 a 3 vezes menor do que o concreto de referência. Contudo os autores ressaltam que os resultados obtidos podem variar conforme o método de aplicação, tempo de repintura, número de mãos, espessura da película final de proteção, entre outros.

Assim o presente trabalho tem por objetivo o estudo da carbonatação em concretos com elevados teores de FC protegidos por uma película protetora (*pintura acrílica*). Ao substituir-se o CP por elevados teores de FC ocorre uma redução na reserva alcalina da matriz cimentícia, o que pode acarretar uma diminuição significativa da resistência do concreto frente à carbonatação.

Desta maneira, o presente trabalho busca verificar o comportamento de misturas com elevados teores de FC (60% a 70%) protegidos por uma película protetora em comparação aos corpos de referência, sem esta proteção, com o intuito de constatar se a utilização deste tipo de barreira física pode contribuir para o aumento da resistência frente à carbonatação.

Na hipótese de ficar constatado o aumento da resistência à carbonatação nos concretos com película protetora será dado um passo significativo na viabilização da utilização de concretos com baixos teores de CP e altas proporções de FC, levando este tipo de concreto a tornar-se uma opção bastante viável do ponto de vista técnico (resistência à compressão), de durabilidade (resistência à carbonatação) e de sustentabilidade (reduzidos

teores de CP).

MATERIAIS E MÉTODOS

O planejamento experimental foi realizado em dois momentos distintos. Primeiramente os materiais utilizados no trabalho foram caracterizados, e em um segundo momento foi realizado o empacotamento de partículas para a definição dos traços. As misturas foram escolhidas por meio de estudos preliminares, sendo utilizados 5 tipos de traços: REF com 100% de cimento Portland (CP), FC60 com 60% de FC e 40% de CP (*com e sem pintura*) e o FC70CV10 com 70% de FC, 20% de CP e 10% de CV (*com e sem pintura*) todos com uma relação a/ag de 0,25. Posteriormente, foram moldados cp's com a finalidade de determinar a resistência mecânica, bem como seu comportamento frente à carbonatação acelerada.

O cimento utilizado foi o CPV-ARI com um teor de calcita de 7%, perda ao fogo de 0,5% e gesso de 2,5, representando uma proporção de clínquer da ordem de 90%. Foi utilizado um FC oriundo de jazidas localizadas em Caçapava do Sul/RS. A CV foi obtida na termoelétrica de Candiota/RS. As areias foram obtidas na jazidas do Arenal em Santa Maria/RS e classificadas como fina ($D_{máx} < 1,2 \text{ mm}$) e média ($D_{máx} < 2,4 \text{ mm}$), A brita 0 ($D_{máx} \leq 12,5 \text{ mm}$) é oriunda de pedreiras localizadas em Itaara/RS.

Para a obtenção de um melhor empacotamento das partículas foi utilizado o aditivo hiperplastificante Master Glenium 54 da BASF a base policarboxilatos em proporções que variaram entre 3,56 e 4,2%. Para o empacotamento de partículas foi utilizado o programa EMMA (*Elkem Materials Mix Analyzer*) com um coeficiente de distribuição “q” de 0,35.

Por meio de estudos prévios foi fixado, para a dosagem dos traços, uma proporção de 53%, em massa, para a argamassa e 8,33% para a água. Maiores informações sobre as características do CP, das adições minerais, aditivo, agregados, empacotamento de partículas e dosagem dos traços podem ser obtidas em Isaia *et al.* (2020).

Para a pintura foi utilizada uma tinta acrílica da marca Coral denominada “Proteção sol e chuva pintura impermeabilizante”, sendo aplicada uma camada de primer e duas de mão. De acordo com o fabricante, a tinta pode ter uma vida útil de 10 anos em ambiente externo abrigado. A pintura foi realizada ao fim da etapa de pré-condicionamento, antes da colocação dos cp's na câmara de carbonatação.

Os procedimentos de pré-condicionamento dos cp's para a carbonatação acelerada foram realizados conforme recomendação da TC 116-PCD (RILEM, 1999). Após esta etapa os cp's foram colocados em uma câmara climatizada com teor constante de CO₂, umidade relativa (UR) e temperatura de acordo com os seguintes parâmetros: a) câmara climatizada de CO₂ automatizada CARON, modelo 6034-2; b) teor de CO₂ de 3%; c) UR de 75% ± 2%; d) temperatura 23 ± 1°C. Os cp's foram mantidos na câmara de carbonatação por 3, 6, 9 e 12 semanas, sendo que a cada idade de ensaio os cp's foram removidos da câmara e rompidos diametralmente.

Para a determinação da superfície carbonatada foi aplicada uma solução de fenolftaleína, sendo que para o cálculo da profundidade carbonatada foi utilizada a metodologia de Dalla Lana (2005), a qual consiste no tratamento da imagem por meio do software AutoCAD (AUTODESK, 2020) com o auxílio da rotina “COTA.LSP”. Após a determinação da profundidade carbonatada foi

calculado o coeficiente de carbonatação (k_c).

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na tabela 1 podem ser encontrados a resistência à compressão, profundidade média carbonatada, bem como o coeficiente de carbonatação (k_c).

Tabela 1 – Resistência à compressão, profundidade carbonatada e k_c

| Traço | Resistência à compressão (MPa) | | K_c ($mm \cdot t^{0,5}$) | Profundidades (mm) | | | |
|-----------|--------------------------------|---------|------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|
| | 28 dias | 91 dias | | Semanas | | | |
| | | | | 3 | 6 | 9 | 12 |
| REF | 118,1 | 127,2 | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FC60 | 56,3 | 65,7 | 1,62 | 5,29 | 5,53 | 5,92 | 8,46 |
| FC60P | 56,3 | 65,7 | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FC70CV10 | 28,0 | 51,8 | 9,93 | 17,63 | 23,90 | 32,58 | 33,59 |
| FC70CV10P | 28,0 | 51,8 | 0,27 | 1,14 | 1,48 | 1,59 | 1,60 |

Fonte: elaborado pelo autor

Traço REF

Conforme a Tabela 1, o REF não apresentou carbonatação no período estudado devido a quantidade e características dos materiais constituintes, em especial o teor de CP. Conforme Ribeiro *et al.* (2018) e Savija e Lukovic (2016), quanto maior o teor de CP em um traço de concreto, menor será a profundidade carbonatada, tendo em vista o elevado teor de Portlandita formado. Assim a presença da Portlandita, em teores elevados, conduz a um amortecimento do processo de carbonatação fazendo com que o mesmo seja menos intenso.

Com isso pode-se dizer que o REF, devido ao seu elevado teor de CP, baixo fator a/a_g e alta resistência à compressão, reuniu as características necessárias para propiciar que a profundidade de carbonatação fosse nula no período estudado.

FC60

Na Tabela 1 o FC60 apresenta pequena profundidade carbonatada tendo em vista que, em 12 semanas, foi observado um valor de 8,46 mm. Considerando que uma semana na câmara de carbonatação equivale a um ano de carbonatação natural, pode-se dizer que o FC60 apresentou uma profundidade carbonatada total equivalente a 42,3% da espessura do cobrimento útil (20 mm) para um período de 12 anos.

Na transição da 3ª para a 6ª, bem como para a 9ª semana os incrementos de carbonatação foram bem menores (0,24/0,39 mm) quando comparados com a transição da 9ª para a 12ª semana (2,54 mm), indicando uma aceleração substancial. Esta aceleração parece estar relacionada com modificações nas características da matriz cimentícia, a partir dos 6 mm de profundidade e/ou em mudanças na porosidade da camada carbonatada.

Uma explicação para este fenômeno pode estar relacionada ao efeito “diluição” causado pela presença do FC. Neste caso as finas partículas do material podem propiciar uma diluição no sistema de poros, levando a uma elevação localizada na porosidade. Este efeito pode ocorrer independentemente da diminuição da porosidade total advinda do efeito “filler”. Com isso, o processo de diluição pode acarretar um pequeno incremento na porosidade total da matriz cimentícia, bem como interferir na conexão entre os poros, propiciando a abertura de novos locais para a difusão do CO₂ (SHAH e BISHNOI, 2018).

FC60P

Na Tabela 1 o FC60P não apresentou carbonatação no período estudado devido à aplicação da película protetora (*tinta acrílica*), a qual propiciou uma barreira física que diminuiu a difusão do CO₂ na camada de cobertura do concreto. Conforme Kazmierczak e Helene (1995), a depender do tipo de película protetora (*tinta acrílica, verniz acrílico, etc.*), pode ocorrer uma diminuição da profundidade carbonatada de 2 a 3 vezes quando comparado com o concreto de referência (FC60).

Neste caso ocorreu uma redução maior, tendo em vista que não foi constatada carbonatação do concreto no período estudado. No traço referência (FC60) foi observado uma profundidade de carbonatação de 8,46 mm em 12 semanas, indicando um desempenho adequado desta mistura. Não obstante o mesmo traço com película protetora apresentou um desempenho significativamente maior, indicando que a utilização deste tipo de barreira física (*tinta acrílica*) em conjunto com as características do traço (*empacotamento de partículas e baixo fatos a/ag*) conferem à mistura (FC60P) uma excelente proteção contra a carbonatação do concreto.

Tendo em vista que, usualmente, grande parte das estruturas de concreto são pintadas, principalmente, por razões estéticas, a utilização deste tipo de barreira viabiliza, ainda mais, a utilização do traço FC60, tendo em vista a excelente durabilidade contra a carbonatação conferida por este tipo de proteção. Com uma profundidade de carbonatação nula em 12 semanas, resistência à compressão de 65,7 MPa aos 91 dias de idade, bem como uma substituição de 60% de CP por FC, pode-se dizer que o FC60P reúne condições para ser uma opção competitiva à concreto estrutural do ponto de vista de durabilidade, desempenho mecânico e sustentabilidade.

FC70CV10

Na Tabela1, o FC70CV10 apresentou elevada carbonatação, principalmente, na idade de 12 semanas com profundidade de 33,59 mm. Considerando que uma semana na câmara de carbonatação equivale a um ano de carbonatação natural, pode-se dizer que o FC70CV10 apresentou uma profundidade carbonatada total equivalente a 167,95% da espessura do revestimento útil (20 mm) para um período presumível de 12 anos.

O comportamento do FC70CV10 frente à carbonatação acelerada deve-se, provavelmente, à reduzida reserva de Portlandita (20% de CP), a qual foi consumida, em parte, pelas reações com a CV para a formação do C-S-H secundário. Desta maneira a reserva alcalina foi diminuída sensivelmente

conduzindo a um rápido avanço da frente de carbonatação.

Neste sentido, a afirmação de Shah e Bishnoi (2018) pôde ser constatada, ou seja, a incorporação de AM (FC+CV) acarreta uma redução da reserva alcalina, sendo a mesma mais determinante do que o teor de água (*fator a/ag*) do traço, podendo ocorrer uma elevação da taxa de carbonatação.

Com isso, pode-se constatar uma prevalência da aceleração da carbonatação devido à diminuição da reserva alcalina em detrimento da inibição do processo por meio do aumento da compacidade do concreto (*redução do fator a/ag*). Assim, no presente caso, a reduzida reserva alcalina (20% de CP), somada à presença de CV, contribuíram para as acentuadas profundidades de carbonatação.

FC70CV10P

Conforme a Tabela1 o FC70CV10P apresentou reduzida carbonatação, em 12 semanas, sendo observada uma profundidade de 1,6 mm, e indicando um excelente desempenho. Considerando que uma semana na câmara de carbonatação equivale a um ano de carbonatação natural, o traço apresentou uma profundidade carbonatada total equivalente a 8% da espessura do revestimento útil (20 mm) para um período de 12 anos.

A explicação para o desempenho do traço FC70CV10P é o mesmo do FC60P, ou seja, a aplicação de uma película protetora (*tinta acrílica*) formando uma barreira física, diminui a difusão do CO₂ na camada de revestimento. Todavia o desempenho do FC70CV10P foi inferior ao do FC60P tendo em vista que este último apresentou profundidade de carbonatação nula em 12 semanas.

O menor desempenho do traço FC70CV10P comparado ao FC60P está relacionado à menor reserva alcalina do primeiro, tendo em vista que o FC60P possui 40% de CP, enquanto o FC70CV10P apresenta a metade deste valor (20%). Aliado a isto, têm-se as reações pozolânicas para formação de C-S-H secundário no FC70CV10P advindas da presença da CV as quais consomem uma parte da reduzida reserva alcalina do traço.

Por outro lado é inegável o desempenho da película protetora, propiciando redução na profundidade carbonatada (1,6 mm em 12 semanas) no traço FC70CV10P. Neste caso, em particular, ocorreu uma redução de 21 vezes, ou seja, 33,59 mm (FC70CV10) para 1,6 mm (FC70CV10P) em 12 semanas de carbonatação acelerada. Desta maneira o traço FC70CV10 (*sem pintura*) que mostrou um desempenho aquém do esperado, apresentou uma reversão devido a película protetora, passando a apresentar um desempenho competitivo tanto do ponto de vista de durabilidade (*carbonatação*) como de resistência mecânica (51,8 MPa aos 91 dias) e sustentabilidade (20% de CP).

Coefficiente de carbonatação (kc)

O valor de kc considera tanto as características do meio ambiente, quanto as intrínsecas do concreto, correspondendo, portanto, à aceleração da frente de carbonatação (PHAM, 2013). O autor sublinha que o coeficiente kc constitui um resumo de todos os fatores que compõem o desenrolar do processo de carbonatação. Um importante aspecto do kc diz respeito à sua natureza de indicador da resistência do concreto à carbonatação, sendo o parâmetro mais preciso e confiável para a determinação da influência dos fatores relacionados ao concreto no processo de carbonatação.

Conforme pode ser observado na Tabela 1, o coeficiente de carbonatação (k_c) é inversamente proporcional ao teor de CP, ou seja, com o aumento da incorporação de FC nas misturas, há um incremento no valor de k_c . Esta tendência já era prevista, tendo em vista que vários trabalhos relacionados ao assunto abordam que, à medida que o teor de AM (FC e CV) cresce no concreto, decai a concentração de Portlandita, acarretando um crescimento no valor do k_c gerando uma carbonatação mais rápida e intensa (RIBEIRO *et al.*, 2018; SAVIJA e LUKOVIC, 2016).

Ao analisar os k_c 's dos traços estudados, pode-se dizer que, à exceção da mistura FC70CV10, os valores obtidos são muito bons. Sanjuan e Olmo (2001) e Torres *et al.* (2017) classificam um concreto como sendo de alta qualidade à carbonatação como aquele que apresente um k_c inferior a $3 \text{ mm.t}^{-0,5}$. Neste sentido os traços FC60, FC60P e FC70CV10P apresentaram um k_c médio de $0,94 \text{ mm.t}^{-0,5}$ ou 3,19 vezes menor que o valor máximo indicado pelos autores para a carbonatação de concretos de alta qualidade.

Importante observar que o traço FC60P apresentou k_c “zero”, tendo em vista que a profundidade carbonatada no período foi nula. Outro ponto de destaque nos traços citados com k_c médio de $0,94 \text{ mm.t}^{-0,5}$ refere-se ao alto teor de FC contidos nas misturas com uma concentração média de 63,33%, indicando a possibilidade de elaboração de concretos onde uma grande parte do CP pode ser substituída por esta adição mineral ao mesmo tempo em que é possível obter-se resistências mecânicas compatíveis com concretos de alta resistência ($CAR \geq 50 \text{ MPa}$) e uma excelente durabilidade frente à carbonatação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os resultados apresentados, pode-se concluir que: a) nenhum dos traços estudados alcançou a resistência à compressão, profundidade de carbonatação e k_c do REF; b) à medida que mais FC é incorporada na mistura, a resistência à compressão diminui e a profundidade carbonatada e o k_c aumentam tanto nos traços com como nos sem pintura.

A diminuição da carbonatação advinda da incorporação da película protetora nos traços estudados foi significativamente maior (21 vezes na FC70CV10) do que a relatada pela literatura, em especial os estudos Kazmierczak e Helene (1995), nos quais a redução encontrada foi de 2 a 3 vezes. Neste sentido a aplicação da película protetora viabilizou a utilização do traço FC70CV10 que havia apresentado um k_c de $9,93 \text{ mm.t}^{-0,5}$, passando a apresentar um valor substancialmente menor após a aplicação da película protetora $0,27 \text{ mm.t}^{-0,5}$.

Desta maneira, a aplicação da película protetora propiciou aos traços estudados uma diminuição da profundidade carbonatada e, conseqüente, redução do k_c , fornecendo a estas misturas um excelente desempenho frente a durabilidade, bem como um significativo aumento da sustentabilidade dos mesmos.

Com isso, pode-se depreender, por meio dos resultados obtidos, que a incorporação de elevados teores de FC, aliado a reduzidos fatores a/a_g , com a granulometria balizada por meio do empacotamento de partículas e a aplicação de uma película protetora, podem originar concretos com excelentes resistências à carbonatação, bem como com maiores benefícios no que tange, também, à resistência mecânica, durabilidade e sustentabilidade global das

estruturas de concreto.

REFERÊNCIAS

AUTODESK. **Site da empresa**. São Paulo: Autodesk, 2020. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/>. Acesso em: 25 mar. 2020.

DALLA LANA, E. F. **Carbonatação da camada de revestimento de protótipos de concreto com cinza volante e cal**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7940/ELINORDALLALANA.pdf?sequence=1>. Acesso em: 19 ago. 2020.

INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES (RILEM). CPC-18 measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, v. 21 p. 453-455, 1988. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02472327>. Acesso em: 27 ago. 2020.

ISAIA, G. A.; RIZZATTI, E.; SILVA, S. S.; ISAIA, G. C.; LUBECK, A. Concreto eco amigável para estruturas sustentáveis. **MIX Sustentável**, v. 6, p. 33-46, 2020. Disponível em: <https://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4249>. Acesso em 07 fev. 2021.

KAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. **Determinação da eficiência de películas usadas como proteção contra carbonatação**. São Paulo: USP, 1995. Disponível em: http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00150.pdf. Acesso em: 19 ago. 2020.

PHAM, S. T. Experimental investigation and modelling of carbonation process in cement materials. **Open Civil Engineering Journal**, n. 7, p. 116-125, 2013. Disponível em: <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOCIEJ/TOCIEJ-7-116.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: RIBEIRO, D. V. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018. Disponível em: <https://www.grupogen.com.br/corrosao-e-degradacao-em-estruturas-de-concreto>. Acesso em: 27 ago. 2020.

SANJUÁN, M. A.; OLMO, C. Carbonation resistance of one industrial mortar use as a concrete coating. **Building and Environment**, v. 36, p. 949-953, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132300000457>. Acesso em: 15 dez. 2020.

SAVIJA, B.; LUKOVIC, M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 285–301, 2016. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Carbonation+of+cement+paste%3A+Understanding%2C+challenges%2C+and+opportunities&btnG=. Acesso em: 20 ago. 2020.

SHAH, V.; BISHNOI, S. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction and Building Materials**, n. 178, p. 219-232, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818312388>. Acesso em: 27 ago. 2020.

TORRES, H.; CORREA, E.; CASTAÑO, J. G.; ECHEVERRIA, F. Simplified mathematical model for concrete carbonation. **Journal of Materials Civil Engineering**, v. 29, n. 10, 2017. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002001>. Acesso em: 27 ago. 2020.