



## Carbonatação nas Estruturas de Concreto Armado: Uma Revisão da Literatura

Paula, Andréia de<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, paula\_adp@yahoo.com.br

**Resumo:** A carbonatação é um dos tópicos de pesquisa mais discutidos por pesquisadores, pois sua ocorrência nas estruturas de concreto armado pode afetar a vida útil das edificações, prejudicando o desempenho e a durabilidade dos materiais a base de cimento, reduzindo a alcalinidade do concreto e tornando a armadura suscetível à corrosão. Se por um lado a carbonatação traz prejuízos as estruturas em função da corrosão das armaduras, por outro é benéfica em se tratando puramente do concreto. Como benefícios podemos citar ganho de resistência da matriz cimentícia quando submetida à cura na presença de CO<sub>2</sub> e o sequestro de CO<sub>2</sub> pelo concreto, contribuindo para a sustentabilidade. Este artigo traz uma revisão da literatura sobre este tema e busca avaliar como as características dos materiais constituintes do concreto e os diversos fatores ambientais afetam a profundidade de carbonatação e o comportamento do coeficiente de carbonatação nas estruturas de concreto armado.

**Palavras-chave:** carbonatação, frente de carbonatação, coeficiente de carbonatação, adições minerais, concreto.

### 1. Introdução

Muitas pesquisas foram dedicadas ao estudo da carbonatação e de seus efeitos na durabilidade das estruturas de concreto armado visto que quase todos os materiais à base de cimento sofrem carbonatação durante sua vida útil devido à presença de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre. A fonte primária de CO<sub>2</sub> são as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de combustíveis fósseis, juntamente com 5% de contribuição da produção de cimento, emissões estas que vêm aumentando nos últimos duzentos anos (EKOLU, 2016).

Segundo Monteiro et al (2012) a carbonatação natural do concreto depende simultaneamente das características dos materiais e do ambiente envolvente. Está associada à difusão de CO<sub>2</sub> na massa de concreto, que ocorre devido a diferença de concentração, alterando a alcalinidade para valores de pH mais baixos, proporcionando um ambiente onde a corrosão pode ocorrer. O fenômeno da carbonatação é controlado tanto pela difusão gasosa quanto por mecanismos de reação química e, consequentemente, seu progresso é determinado pela química do ligante e pela permeabilidade do material. (BERNAL et al, 2014).

De acordo com Zeng (2020) a carbonatação altera a resistência, a porosidade, a distribuição dos poros e a composição química dos materiais à base de cimento, provocando o encolhimento e a fissuração da matriz desses materiais, reduzindo a vida útil das estruturas de concreto, pois ocorre o consumo do Ca(OH)<sub>2</sub> no concreto fazendo com que a armadura que está protegida pela camada de concreto, perca sua proteção e passe a sofrer corrosão.

Diante da importância do tema e com base na literatura estudada, este artigo buscou conceituar o processo de carbonatação, evidenciar os principais fatores que influenciam na profundidade da frente de carbonatação e quais os principais ensaios realizados para medir essa profundidade carbonatada. O artigo

traz também a conceituação dos coeficientes de carbonatação natural e acelerada, comparando os resultados encontrados na literatura pesquisada.

## 2. O PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

Segundo Possan (2010) a carbonatação é um dos principais fenômenos físico-químicos que pode limitar a vida útil das estruturas de concreto armado. Através da redução da alcalinidade do concreto, altera as condições de estabilidade química da película passivante da armadura, criando condições favoráveis para o início do processo corrosivo. Tal redução de alcalinidade é conferida principalmente pela presença de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e de potássio ( $\text{KOH}$ ), dissolvidos ou precipitados no concreto endurecido.

Para Lo e Lee (2002) e Possan et al (2017) a carbonatação é um processo de neutralização físico-química da fase líquida saturada intersticial do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e outros compostos hidratados da matriz do cimento pelo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que precipitam como carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) na presença de umidade, conforme mostrado na equação 1 a seguir, tendo como efeito a redução do nível de pH do concreto.



A reação química do  $\text{CO}_2$  com  $\text{Ca(OH)}_2$  se inicia instantaneamente na presença de umidade e leva à formação de carbonato de cálcio e água. Outro processo de carbonatação importante, é o da carbonatação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A reação química do C-S-H com o  $\text{CO}_2$  resulta na formação de carbonato de cálcio e sílica gel amorfa.

Para Houst et al (2002), Possan (2010) e Zeng (2020) após um período de tempo suficientemente longo, a reação de carbonatação pode ser dividida em três zonas distintas: uma carbonatada com pH inferior a 8,5, uma parcialmente carbonatada com pH aproximadamente igual a 10 e uma zona não carbonatada com pH maior a 12,5. A existência de áreas parcialmente carbonatadas se dá pelo fato da velocidade da reação de carbonatação do concreto não acompanhar a velocidade de difusão do  $\text{CO}_2$ .

A carbonatação natural do concreto seria o meio mais realista de examinar o desempenho dos concretos sob exposição ao  $\text{CO}_2$ , mas o processo natural é muito lento e leva muito tempo para exibir um efeito significativo (EKOLU, 2016). Em função disso, um sistema de teste de carbonatação acelerada deve ser usado para carbonatar o concreto em curto prazo. O ensaio de carbonatação acelerada ocorre dentro de uma câmara de carbonatação e expõe os corpos de prova de concreto a um ambiente onde quatro variáveis são controladas, ou seja, a temperatura, a concentração de  $\text{CO}_2$ , a umidade relativa e a pressão. Para a realização de ensaios acelerados de carbonatação, a norma mais aceita e utilizada é a Norma Internacional ISO 1920-12 (2015).

### 2.1 Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação

Muitos fatores interferem na velocidade de penetração da frente de carbonatação nas estruturas de concreto armado, dentre eles a relação água/cimento, o consumo e tipo de cimento, a presença de adições minerais, as condições de cura e pré-condicionamento, a porosidade, a presença de fissuras, a concentração de  $\text{CO}_2$ , a umidade relativa do ar e grau de saturação dos poros, a temperatura e as condições de abrigo.

De acordo com Zeng (2020) quanto menor a razão água-ligante, menor a porosidade e menor o tamanho do poro, menor a taxa de difusão do  $\text{CO}_2$  e maior a resistência à carbonatação. Segundo Qiu (2020) a condição de cura é um fator crítico que governa a formação da estrutura porosa que influencia o processo de carbonatação. Em geral, o concreto curado com água contém poros capilares menores e canais de poros

menos interconectados, consequentemente, essa estrutura porosa dificulta o transporte de CO<sub>2</sub> no concreto para a reação de carbonatação.

Segundo Ribeiro, et al. (2021), o avanço da frente de carbonatação é inversamente proporcional à reserva alcalina disponível na matriz da pasta de cimento hidratada que, por sua vez, é função da quantidade e da composição química do cimento. A principal fonte de substâncias alcalinas do cimento vem do clínquer, por isso, quando se substitui parte do cimento por materiais cimentícios suplementares (SCM's) há uma redução da reserva alcalina ocasionando uma maior profundidade de carbonatação.

O pré-condicionamento visa garantir uma correta redistribuição da quantidade de água interna na amostra e melhora o avanço da frente de carbonatação. Amostras pré-condicionadas apresentam profundidade de carbonatação menor do que amostras sem pré-condicionamento.

A concentração de CO<sub>2</sub> no ar exerce influência na velocidade de carbonatação em estruturas de concreto. A difusão do CO<sub>2</sub> pelos poros do material segue os princípios da primeira Lei de Fick, que diz que a difusão do CO<sub>2</sub> pelos poros do concreto se dá na razão direta do gradiente de concentração do CO<sub>2</sub>.

A carbonatação diminui com o aumento da umidade relativa, pois quando se tem um aumento da umidade relativa, tem-se um aumento da fração de poros cheios de água, o que dificulta a difusão do CO<sub>2</sub>, fazendo com que a velocidade de carbonatação seja menor.

A progressão da carbonatação é mais rápida sob exposição protegida do que sob exposição não protegida. Sob exposição não protegida, a entrada de CO<sub>2</sub> no concreto é intermitente como resultado de períodos de saturação devido à chuva ou condições úmidas, que tendem a bloquear temporariamente os poros da superfície do concreto. Para exposição abrigada, os elementos são parcialmente saturados, embora possa haver casos em que a condensação de umidade na superfície do elemento possa interromper temporariamente a penetração de CO<sub>2</sub> no concreto. (EKOLU, 2016).

## 2.2 - Técnicas de caracterização para carbonatação cimentícia

O desenvolvimento de técnicas para avaliação da carbonatação é essencial para prever, avaliar, manter e controlar a vida útil, saúde e desempenho a longo prazo de estruturas de concreto.

Segundo Ashraf (2016) a solução indicadora de pH de fenolftaleína é o método de teste mais utilizado para identificar a frente de carbonatação em sistemas à base de cimento. Durante a reação de carbonatação, o pH do sistema de concreto diminui e, como resultado, a solução de fenolftaleína fica incolor na região carbonatada e vermelha (ou rosa) na região não carbonatada. Outros indicadores têm sido adotados na avaliação da carbonatação do concreto além da fenolftaleína, incluindo timolftaleína e o amarelo de alizarina.

Outras técnicas também são empregadas para determinar a profundidade de carbonatação como: Análise termogravimétrica (TGA), Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), Espectroscopia Raman, Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Difração de raios X (DRX).

## 2.3 Coeficientes de Carbonatação

Vários modelos analíticos descrevem a relação entre a profundidade de carbonatação e a idade do concreto, dos quais o mais utilizado resulta da primeira lei de Fick. O coeficiente de carbonatação determinado pela Lei de Fick depende das condições ambientais como concentração de CO<sub>2</sub>, umidade e características do concreto como relação a/c e tipo de cimento, variando de uma estrutura para outra. (MONTEIRO et al, 2012)

O coeficiente de carbonatação ( $K_c$ ) é a relação entre a profundidade carbonatada ( $d_{kj}$ ) de um concreto dividido pela raiz quadrada do tempo de exposição ao CO<sub>2</sub>. Esse coeficiente é representado em mm/ano<sup>0,5</sup> ou mm/semanas<sup>0,5</sup> de acordo com a Equação 2.

$$K_c = d_{kj} / \sqrt{t} \quad (2)$$

Uma vez conhecido o valor de K, pode-se determinar a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Este parâmetro é tomado como um coeficiente de durabilidade do concreto e inclui os efeitos de todas as variáveis relacionadas ao concreto e ao ambiente agressivo, sendo um indicador da resistência do concreto à carbonatação. Em um concreto exposto a um meio específico, quanto maior o coeficiente, mais rápida será a carbonatação e, portanto, menor a resistência ao fenômeno (JEDIDI et al, 2020).

O coeficiente de carbonatação natural pode ser determinado através da Equação 3, onde t é o tempo em anos, de existência da estrutura em questão.

$$K_{nat} = d_{kj} / \sqrt{t} \quad (3)$$

Segundo Eloku (2016) não existe uma relação matemática definitiva ou geralmente reconhecida entre a carbonatação acelerada e natural, que pode ser usada para aplicabilidade geral. Essa dificuldade está relacionada aos inúmeros fatores que envolvem as amplas variações das condições de exposição ambiental, resposta de diversos sistemas cimentícios, ao ambiente natural e níveis de tensão em elementos estruturais. Houst et al (2020) diz que embora seja geralmente aceito que os testes de carbonatação acelerada podem se correlacionar razoavelmente bem com a carbonatação natural, há problemas associados às altas concentrações de CO<sub>2</sub> normalmente usadas nos testes.

### 3 DISCUSSÕES

Baseado na revisão bibliográfica do estado da arte sobre o tema carbonatação do concreto, foi possível avaliar as características dos materiais constituintes do concreto e os diversos fatores ambientais que afetam a profundidade de carbonatação e o comportamento do coeficiente de carbonatação nas estruturas de concreto armado. Para isso, utilizou-se a os dados da Tabela 01, compilados a partir de alguns estudos para demonstrar, através de gráficos, o comportamento do coeficiente de carbonatação e da profundidade de carbonatação das estruturas de concreto, quando expostas à diferentes condições ambientais.

**Tabela 01** – Dados sobre carbonatação acelerada e carbonatação natural

| Referência                                                   | Descrição da Amostra de Concreto                                       | Idade do Ensaio (dias) | Temperatura (°C) | Umidade Relativa (%) | Concentração de CO <sub>2</sub> (%) | Relação a/c | Condições de Cura    | Pré Condicionamento (dias) | Profundidade de Carbonatação (mm) | Coef. de Carbonatação - K (mm/semana) <sup>0,5</sup> |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| Elke Gruyaert, Philip Van den Heede, Nefel De Belie (2013) * | Cimento Portland Comum                                                 | 28                     | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0                                 | 0,00                                                 |
|                                                              |                                                                        | 56                     | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0                                 | 0,00                                                 |
|                                                              |                                                                        | 112                    | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0                                 | 0,00                                                 |
|                                                              | Cimento Portland Comum                                                 | 28                     | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0                                 | 0,00                                                 |
|                                                              |                                                                        | 56                     | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0                                 | 0,00                                                 |
|                                                              |                                                                        | 112                    | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0                                 | 0,00                                                 |
|                                                              | Cimento Portland Comum com substituição de 50% de escória e alto forno | 28                     | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0                                 | 0,00                                                 |
|                                                              |                                                                        | 56                     | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0                                 | 0,00                                                 |
|                                                              |                                                                        | 112                    | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0                                 | 0,00                                                 |
|                                                              | Cimento Portland Comum com substituição de 70% de escória e alto forno | 28                     | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 0,8                               | 0,40                                                 |
|                                                              |                                                                        | 56                     | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 1                                 | 0,35                                                 |
|                                                              |                                                                        | 112                    | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 1,4                               | 0,35                                                 |
|                                                              | Cimento Portland Comum com substituição de 70% de escória e alto forno | 28                     | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 1,2                               | 0,60                                                 |
|                                                              |                                                                        | 56                     | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 1                                 | 0,35                                                 |
|                                                              |                                                                        | 112                    | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 2,2                               | 0,55                                                 |
|                                                              | Cimento Portland Comum com substituição de 70% de escória e alto forno | 28                     | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 2,8                               | 1,40                                                 |
|                                                              |                                                                        | 56                     | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 9                                 | 3,18                                                 |
|                                                              |                                                                        | 112                    | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 13,2                              | 3,30                                                 |
|                                                              | Cimento Portland Comum com substituição de 85% de escória e alto forno | 28                     | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 1,6                               | 0,80                                                 |
|                                                              |                                                                        | 56                     | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 1,9                               | 0,67                                                 |
|                                                              |                                                                        | 112                    | 20               | 95                   | -                                   | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 2,8                               | 0,70                                                 |
|                                                              | Cimento Portland Comum com substituição de 85% de escória e alto forno | 28                     | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 8,6                               | 4,30                                                 |
|                                                              |                                                                        | 56                     | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 16,3                              | 5,76                                                 |
|                                                              |                                                                        | 112                    | 20               | 60                   | 10                                  | 0,5         | carbonatação precoce | -                          | 28,1                              | 7,03                                                 |
| Duo Zhang, Yixin Shao (2016) *                               | Cimento Portland comum                                                 | 20                     | 25               | 95                   | 0                                   | 0,4         | carbonatação precoce | -                          | 2,2                               | 1,30                                                 |
|                                                              |                                                                        | 30                     | 25               | 95                   | 0                                   | 0,4         | carbonatação precoce | -                          | 3                                 | 1,45                                                 |
|                                                              |                                                                        | 40                     | 25               | 95                   | 0                                   | 0,4         | carbonatação precoce | -                          | 3,6                               | 1,51                                                 |
|                                                              | Cimento Portland comum                                                 | 50                     | 25               | 95                   | 0                                   | 0,4         | carbonatação precoce | -                          | 3,9                               | 1,46                                                 |
|                                                              |                                                                        | 20                     | 25               | 60                   | 10                                  | 0,4         | carbonatação precoce | 27                         | 2,4                               | 1,42                                                 |
|                                                              |                                                                        | 30                     | 25               | 60                   | 10                                  | 0,4         | carbonatação precoce | 27                         | 2,9                               | 1,40                                                 |
|                                                              | Cimento Portland comum                                                 | 40                     | 25               | 60                   | 10                                  | 0,4         | carbonatação precoce | 27                         | 3,4                               | 1,42                                                 |
|                                                              |                                                                        | 50                     | 25               | 60                   | 10                                  | 0,4         | carbonatação precoce | 27                         | 4                                 | 1,50                                                 |
|                                                              |                                                                        | 20                     | 25               | 95                   | 0                                   | 0,4         | carbonatação precoce | -                          | 3,5                               | 2,07                                                 |
|                                                              | Cimento Portland Comum com substituição de 20% de cinza volante        | 30                     | 25               | 95                   | 0                                   | 0,4         | carbonatação precoce | -                          | 4,5                               | 2,17                                                 |
|                                                              |                                                                        | 40                     | 25               | 95                   | 0                                   | 0,4         | carbonatação precoce | -                          | 5,6                               | 2,34                                                 |
|                                                              |                                                                        | 50                     | 25               | 95                   | 0                                   | 0,4         | carbonatação precoce | -                          | 6,1                               | 2,28                                                 |
|                                                              | Cimento Portland Comum com substituição de 20% de cinza volante        | 20                     | 25               | 60                   | 10                                  | 0,4         | carbonatação precoce | 27                         | 3,4                               | 2,01                                                 |
|                                                              |                                                                        | 30                     | 25               | 60                   | 10                                  | 0,4         | carbonatação precoce | 27                         | 4,5                               | 2,17                                                 |
|                                                              |                                                                        | 40                     | 25               | 60                   | 10                                  | 0,4         | carbonatação precoce | 27                         | 5,7                               | 2,38                                                 |
|                                                              |                                                                        | 50                     | 25               | 60                   | 10                                  | 0,4         | carbonatação precoce | 27                         | 6,1                               | 2,28                                                 |

Continuação Tabela 1.

| Referência                                          | Descrição da Amostra de Concreto                                                     | Idade do Ensaio (dias) | ****<br>Temperatura (°C) | ****<br>Umidade Relativa (%) | ****<br>Concentração de CO <sub>2</sub> (%) | Relação a/c | Condições de Cura                    | Pré Condicionamento (dias) | Profundidade de Carbonatação (mm) | Coef. de Carbonatação - K (mm/semana) <sup>14</sup> |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|-------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Zanqun Liu, Wenlong Hu, Le Hou, Dehua Deng (2018) * | Cimento Portland Comum                                                               | 10                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,35        | carbonatação acelerada               | -                          | 0,2                               | 0,17                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum                                                               | 20                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,35        | carbonatação acelerada               | -                          | -                                 | -                                                   |
|                                                     | Cimento Portland Comum                                                               | 10                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 0,7                               | 0,59                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum                                                               | 20                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 2,5                               | 1,48                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum                                                               | 10                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,55        | carbonatação acelerada               | -                          | 4                                 | 3,35                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum                                                               | 20                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,55        | carbonatação acelerada               | -                          | -                                 | -                                                   |
|                                                     | Cimento Portland Comum com 10% de cinza volante                                      | 10                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 1,7                               | 1,42                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com 10% de cinza volante                                      | 20                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | -                                 | -                                                   |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 20% de cinza volante                      | 10                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 2,7                               | 2,26                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 20% de cinza volante                      | 20                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | -                                 | -                                                   |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 30% de cinza volante                      | 10                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 13,6                              | 11,38                                               |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 30% de cinza volante                      | 20                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 16,3                              | 9,64                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 25% de escória                            | 10                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 0,8                               | 0,67                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 25% de escória                            | 20                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | -                                 | -                                                   |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 35% de escória                            | 10                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 0,9                               | 0,75                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 35% de escória                            | 20                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | -                                 | -                                                   |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 50% de escória                            | 10                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 1,6                               | 1,34                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 50% de escória                            | 20                     | 20                       | 70                           | 20                                          | 0,45        | carbonatação acelerada               | -                          | 3,4                               | 2,01                                                |
| Cengiz Duran Atis (2003) *                          | Cimento Portland Comum                                                               | 3                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,55        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 9,6                               | 14,66                                               |
|                                                     |                                                                                      | 3                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,55        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 9,1                               | 13,90                                               |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,55        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 8,5                               | 8,50                                                |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,55        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 7,4                               | 7,40                                                |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,55        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 6,5                               | 3,25                                                |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,55        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 4,5                               | 2,25                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,55        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 5                                 | 1,39                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,55        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 3,3                               | 0,92                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 70% de cinza volante e superplastificante | 3                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,28        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 14,1                              | 21,54                                               |
|                                                     |                                                                                      | 3                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,28        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 11,3                              | 17,26                                               |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,28        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 12,8                              | 12,80                                               |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,28        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 10,9                              | 10,90                                               |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,28        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 10,4                              | 5,20                                                |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,28        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 6,5                               | 3,25                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,28        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 8,4                               | 2,34                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,28        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 4,6                               | 1,28                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 70% de cinza volante                      | 3                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,29        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 14,9                              | 22,76                                               |
|                                                     |                                                                                      | 3                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,29        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 13,8                              | 21,08                                               |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,29        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 13,4                              | 13,40                                               |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,29        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 11,7                              | 11,70                                               |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,29        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 11,3                              | 5,65                                                |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,29        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 7,3                               | 3,65                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,29        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 8,9                               | 2,48                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,29        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 5                                 | 1,39                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 50% de cinza volante e superplastificante | 3                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,33        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 10,3                              | 15,73                                               |
|                                                     |                                                                                      | 3                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,33        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 8,7                               | 13,29                                               |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,33        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 9,8                               | 9,80                                                |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,33        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 8,4                               | 8,40                                                |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,33        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 6,3                               | 3,15                                                |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,33        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 3,2                               | 1,60                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,33        | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 4,5                               | 1,25                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,33        | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 1,8                               | 0,50                                                |
|                                                     | Cimento Portland Comum com substituição de 50% de cinza volante                      | 3                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,3         | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 9,8                               | 14,97                                               |
|                                                     |                                                                                      | 3                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,3         | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 9,6                               | 14,66                                               |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,3         | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 9,3                               | 9,30                                                |
|                                                     |                                                                                      | 7                      | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,3         | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 7,5                               | 7,50                                                |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,3         | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 5,7                               | 2,85                                                |
|                                                     |                                                                                      | 28                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,3         | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 2,1                               | 1,05                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 65                           | 5                                           | 0,3         | carbonatação acelerada - cura a seco | 28                         | 3,8                               | 1,06                                                |
|                                                     |                                                                                      | 90                     | 20                       | 100                          | 5                                           | 0,3         | carbonatação acelerada - cura úmida  | 28                         | 1,6                               | 0,45                                                |

Continuação Tabela 1.

| Referência                                                                                           | Descrição da Amostra de Concreto                                                                                                                                                                                                 | Idade do Ensaio (dias) | **** Temperatura (°C) | **** Umidade Relativa (%) | **** Concentração de CO2 (%) | Relação a/c | Condições de Cura            | Pré Condicionamento (dias) | Profundidade de Carbonatação (mm) | Coef. de Carbonatação - K (mm/semana) <sup>1/4</sup> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| Duo Zhang ; Tianlu Liu; e Yixin Shao (2020)                                                          | Cimento Portland Comum                                                                                                                                                                                                           | 1                      | 25                    | 70                        | 20                           | 0,65        | não carbonatada              | 28                         | 0                                 | 1,2                                                  |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1                      | 25                    | 70                        | 20                           | 0,65        | 2h de cura por carbonatação  | 28                         | 5,2                               | -                                                    |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1                      | 25                    | 70                        | 20                           | 0,65        | 12h de cura por carbonatação | 28                         | 12,1                              | 1,1                                                  |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 25                    | 70                        | 20                           | 0,65        | não carbonatada              | 28                         | 0                                 | 1,2                                                  |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 25                    | 70                        | 20                           | 0,65        | 2h de cura por carbonatação  | 28                         | 5                                 | -                                                    |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 25                    | 70                        | 20                           | 0,65        | 12h de cura por carbonatação | 28                         | 11,8                              | 1,1                                                  |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1                      | 25                    | 70                        | 20                           | 0,4         | não carbonatada              | 28                         | 0                                 | 1,2                                                  |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1                      | 25                    | 70                        | 20                           | 0,4         | 2h de cura por carbonatação  | 28                         | 1,3                               | -                                                    |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum                                                                                                                                                                                                           | 1                      | 25                    | 70                        | 20                           | 0,4         | 12h de cura por carbonatação | 28                         | 2,6                               | 1,1                                                  |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 25                    | 70                        | 20                           | 0,4         | não carbonatada              | 28                         | 0                                 | 1,2                                                  |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 25                    | 70                        | 20                           | 0,4         | 2h de cura por carbonatação  | 28                         | 0                                 | -                                                    |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 25                    | 70                        | 20                           | 0,4         | 12h de cura por carbonatação | 28                         | 0                                 | 1,1                                                  |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 270                    | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,65        | carbonatação natural         | 28                         | 6,4                               | 1,03                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1275                   | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,65        | carbonatação natural         | 28                         | 12,1                              | 0,90                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 270                    | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,55        | carbonatação natural         | 28                         | 4,5                               | 0,72                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1275                   | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,55        | carbonatação natural         | 28                         | 9,3                               | 0,69                                                 |
| M. Valcuede a, C. Parra (2019) *                                                                     | Cimento Portland Comum - Vibrado - 32MPa                                                                                                                                                                                         | 270                    | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,55        | carbonatação natural         | 28                         | 2,8                               | 0,45                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1275                   | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,55        | carbonatação natural         | 28                         | 6,7                               | 0,50                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 270                    | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,45        | carbonatação natural         | 28                         | 1,2                               | 0,19                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1275                   | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,45        | carbonatação natural         | 28                         | 4                                 | 0,30                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - Vibrado - 42MPa                                                                                                                                                                                         | 270                    | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,65        | carbonatação natural         | 28                         | 7,1                               | 1,14                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1275                   | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,65        | carbonatação natural         | 28                         | 16,5                              | 1,22                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 270                    | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,55        | carbonatação natural         | 28                         | 5                                 | 0,81                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1275                   | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,55        | carbonatação natural         | 28                         | 11,2                              | 0,83                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - Autoadensável - 32MPa                                                                                                                                                                                   | 270                    | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,55        | carbonatação natural         | 28                         | 3,5                               | 0,56                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1275                   | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,55        | carbonatação natural         | 28                         | 8,4                               | 0,62                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 270                    | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,45        | carbonatação natural         | 28                         | 1,8                               | 0,29                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 1275                   | 20,2                  | 60,8                      | 0,03                         | 0,45        | carbonatação natural         | 28                         | 4,9                               | 0,36                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - Autoadensável - 42MPa                                                                                                                                                                                   | 14                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 2,2                               | 1,56                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 4                                 | 2,00                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 8,91                              | 2,48                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 11,05                             | 2,39                                                 |
| A. Dura n-Herrera, JM Mendosa-Rangel, EU De-losSantos, F. Vázquez, P. Valdez, Dale P. Bentz (2013) * | Cimento Portland Comum                                                                                                                                                                                                           | 14                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 3,1                               | 2,19                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 4,39                              | 2,20                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 8,68                              | 2,42                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 9,61                              | 2,08                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - dosagem de 1,5% (por massa de cimento) de aditivo modificador de viscosidade para a água de mistura                                                                                                     | 14                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 2,58                              | 1,82                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 3,39                              | 1,70                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 7,58                              | 2,11                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 8,92                              | 1,93                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - 20 % de substituição de pedra-pomes por areia e dosagem de 1,5% (por massa de cimento) de aditivo modificador de viscosidade por unidade de massa de cimento                                            | 14                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 2,89                              | 2,04                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 3,97                              | 1,99                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 7,71                              | 2,15                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 8,05                              | 1,74                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - cura interna, 20% em volume da areia foi substituído por pedra-pomes leve pré-umedecida com uma solução de 50:50 do aditivo modificador de viscosidade em água                                          | 14                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 2,42                              | 1,71                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 3,38                              | 1,69                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 7,49                              | 2,09                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 9,47                              | 2,05                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum com substituição de 20% de cinza volante                                                                                                                                                                  | 14                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 2,63                              | 1,86                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 4,18                              | 2,09                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 10,76                             | 3,00                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 10,26                             | 2,22                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - cura interna, 20% em volume da areia foi substituído por pedra-pomes leve pré-umedecida com uma solução de 50:50 do aditivo modificador de viscosidade em água com 20% de substituição de cinza volante | 14                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 3,26                              | 2,31                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 5,13                              | 2,57                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 10,84                             | 3,02                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 30                    | 65                        | 4                            | 0,4         | carbonatação acelerada       | 28                         | 10,97                             | 2,37                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum                                                                                                                                                                                                           | 14                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 0,51                              | 0,36                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 2,49                              | 1,25                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,6                               | 1,00                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,75                              | 0,81                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 14                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 1,78                              | 1,26                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,24                              | 1,62                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 4,31                              | 1,20                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 4,43                              | 0,96                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - dosagem de 1,5% (por massa de cimento) de aditivo modificador de viscosidade para a água de mistura                                                                                                     | 14                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 0,63                              | 0,45                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 2,48                              | 1,24                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,16                              | 0,88                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,38                              | 0,73                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - 20 % de substituição de pedra-pomes por areia e dosagem de 1,5% (por massa de cimento) de aditivo modificador de viscosidade por unidade de massa de cimento                                            | 14                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 0,78                              | 0,55                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,11                              | 1,56                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,74                              | 1,04                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,74                              | 0,81                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - cura interna, 20% em volume da areia foi substituído por pedra-pomes leve pré-umedecida com uma solução de 50:50 do aditivo modificador de viscosidade em água                                          | 14                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 0,78                              | 0,55                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 2,59                              | 1,30                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,28                              | 0,91                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,91                              | 0,84                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum com substituição de 20% de cinza volante                                                                                                                                                                  | 14                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 1,74                              | 1,23                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 3,21                              | 1,61                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 4,87                              | 1,36                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 5,52                              | 1,19                                                 |
|                                                                                                      | Cimento Portland Comum - cura interna, 20% em volume da areia foi substituído por pedra-pomes leve pré-umedecida com uma solução de 50:50 do aditivo modificador de viscosidade em água com 20% de substituição de cinza volante | 14                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 2,04                              | 1,44                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 28                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 2,95                              | 1,48                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 90                     | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 4,44                              | 1,24                                                 |
|                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  | 150                    | 27 a 45               | 18 a 60                   | 0,02 a 0,009                 | 0,4         | carbonatação natural         | -                          | 4,92                              | 1,06                                                 |

## Continuação Tabela 1.

| Referência                                                               | Descrição da Amostra de Concreto                                                   | Idade do Ensaio (dias) | **** Temperatura (°C) | **** Umidade Relativa (%) | **** Concentração de CO <sub>2</sub> (%) | Relação a/c | Condições de Cura      | Pré Condicionamento (dias) | Profundidade de Carbonatação (mm) | Coef. de Carbonatação - K (mm/semana) <sup>85</sup> |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------------------|-------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Vedran Carevic, Ivan Ignjatovic, Jelena Dragas (2019) *                  | Cimento Portland Comum com agregado natural                                        | 630                    | 20                    | 65                        | 1                                        | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 1,6                               | 0,17                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 20                    | 65                        | 2                                        | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 1,98                              | 0,21                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 20                    | 65                        | 4                                        | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 2,83                              | 0,30                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 20                    | 65                        | 16                                       | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 3,43                              | 0,36                                                |
|                                                                          | Cimento Portland Comum com agregado de concreto reciclado                          | 1440                   | 20                    | 65                        | 1                                        | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 2,73                              | 0,19                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 1440                   | 20                    | 65                        | 2                                        | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 3,45                              | 0,24                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 1440                   | 20                    | 65                        | 4                                        | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 4,05                              | 0,28                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 1440                   | 20                    | 65                        | 16                                       | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 6,15                              | 0,43                                                |
|                                                                          | Cimento Portland Comum com agregado natural e substituição de 50% de cinza volante | 630                    | 20                    | 65                        | 1                                        | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 3,93                              | 0,41                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 20                    | 65                        | 2                                        | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 4,45                              | 0,47                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 20                    | 65                        | 4                                        | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 6,05                              | 0,64                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 20                    | 65                        | 16                                       | -           | carbonatação acelerada | 28                         | 9,43                              | 0,99                                                |
|                                                                          | Cimento Portland Comum com agregado natural                                        | 630                    | 24                    | 52,2                      | 1                                        | -           | carbonatação natural   | -                          | 1,81                              | 0,19                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 24                    | 52,2                      | 2                                        | -           | carbonatação natural   | -                          | 1,63                              | 0,17                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 24                    | 52,2                      | 4                                        | -           | carbonatação natural   | -                          | 1,64                              | 0,17                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 24                    | 52,2                      | 16                                       | -           | carbonatação natural   | -                          | 1,2                               | 0,13                                                |
|                                                                          | Cimento Portland Comum com agregado de concreto reciclado                          | 1440                   | 24                    | 52,2                      | 1                                        | -           | carbonatação natural   | -                          | 4,32                              | 0,30                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 1440                   | 24                    | 52,2                      | 2                                        | -           | carbonatação natural   | -                          | 3,9                               | 0,27                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 1440                   | 24                    | 52,2                      | 4                                        | -           | carbonatação natural   | -                          | 3,31                              | 0,23                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 1440                   | 24                    | 52,2                      | 16                                       | -           | carbonatação natural   | -                          | 2,64                              | 0,18                                                |
|                                                                          | Cimento Portland Comum com agregado natural e substituição de 50% de cinza volante | 630                    | 24                    | 52,2                      | 1                                        | -           | carbonatação natural   | -                          | 4,02                              | 0,42                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 24                    | 52,2                      | 2                                        | -           | carbonatação natural   | -                          | 3,26                              | 0,34                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 24                    | 52,2                      | 4                                        | -           | carbonatação natural   | -                          | 3,14                              | 0,33                                                |
|                                                                          |                                                                                    | 630                    | 24                    | 52,2                      | 16                                       | -           | carbonatação natural   | -                          | 2,5                               | 0,26                                                |
| Xiao Hui Wang, Dimitri V. Val, Li Zheng, M. Roderick Jones (2020) * **** | Cimento Portland Comum                                                             | 240                    | -                     | -                         | 4                                        | 0,4         | carbonatação acelerada | 240                        | 0                                 | 0,0                                                 |
|                                                                          | Cimento Portland Comum                                                             | 240                    | -                     | -                         | 4                                        | 0,55        | carbonatação acelerada | 240                        | 29,3                              | 5,0                                                 |
|                                                                          | Cimento Portland Comum com substituição de 30% de cinza volante                    | 240                    | -                     | -                         | 4                                        | 0,4         | carbonatação acelerada | 240                        | 24,7                              | 4,2                                                 |
|                                                                          | Cimento Portland Comum com substituição de 30% de cinza volante                    | 240                    | -                     | -                         | 4                                        | 0,55        | carbonatação acelerada | 240                        | 44,7                              | 7,6                                                 |
|                                                                          | Cimento Portland Comum com substituição de 50% de escória de alto-forno            | 240                    | -                     | -                         | 4                                        | 0,4         | carbonatação acelerada | 240                        | 11,3                              | 1,9                                                 |
|                                                                          | Cimento Portland Comum com substituição de 50% de escória de alto-forno            | 240                    | -                     | -                         | 4                                        | 0,55        | carbonatação acelerada | 240                        | 23,4                              | 4,0                                                 |

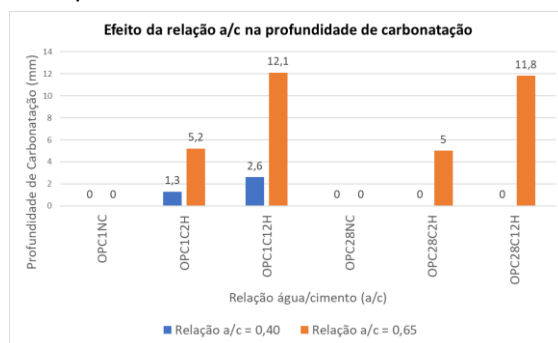
### Observações:

\* para essas amostras o coeficiente de carbonatação K foi calculado pela autora  
 \*\* foram utilizadas as profundidades de carbonatação média  
 \*\*\* foram utilizadas as profundidades de carbonatação média no topo para a amostra nº 2  
 \*\*\*\* Parâmetros da Câmara de Carbonatação

Fonte: o autor (2022)

## 3.1 Efeito da relação água/cimento (a/c)

Os dados retirados do estudo de Zhang et al (2020), mostram a influência da relação água/cimento (a/c) na profundidade de carbonatação para concretos feitos com cimento Portland comum (OPC) com ensaios realizados a 01 e 28 dias, com amostras NC (não carbonatadas), C2H (carbonatadas – 2h de cura) e C12H (carbonatadas – 12h de cura). Nota-se que as amostras com maior relação a/c, possuem maior profundidade de carbonatação, corroborando com os achados de Houst e Wittmann (2002) e Bauer (1995), que relatam que a relação água/aglomerante influencia a profundidade de carbonatação do concreto, visto que está diretamente ligada à porosidade da pasta de cimento hidratada.

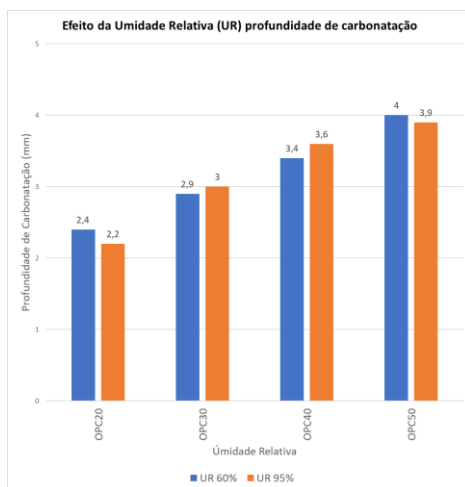


Fonte: autor (2022)

## 3.2 Efeito da umidade relativa (UR)

Os dados retirados do estudo de Zhang e Shao (2016), mostram a influência da umidade relativa na profundidade de carbonatação para concretos feitos com cimento Portland comum (OPC) com ensaios realizados a 20, 30, 40 e 50 dias, em amostras com cura por carbonatação precoce. O resultado esperado era que as amostras com UR de 95% (sem pré-condicionamento) apresentassem profundidades de carbonatação

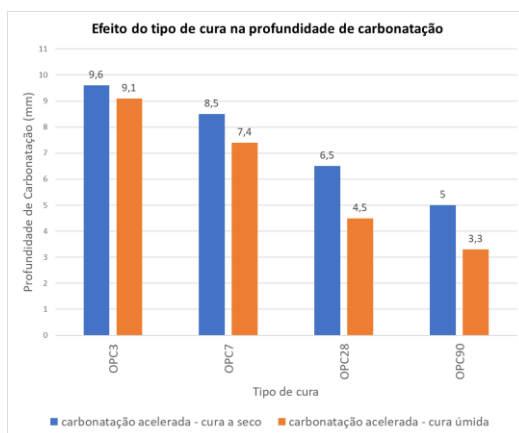
menores em todas as idades que as amostras com UR de 60% (pré-condicionadas por 27 dias). Este resultado controverso pode ter sido obtido por outros fatores que influenciam na profundidade de carbonatação.



Fonte: autor (2022)

### 3.3 Efeito do tipo de cura

Os dados retirados do estudo de Atis (2003), mostram a influência do tipo de cura na profundidade de carbonatação para concretos feitos com cimento Portland comum (OPC) com ensaios realizados a 03, 07, 28 e 90 dias, em amostras com cura por carbonatação acelerada por cura úmida e carbonatação acelerada por cura seca. Nota-se que as amostras com cura a seco apresentam, como esperado, maior profundidade de carbonatação independente da idade do ensaio.



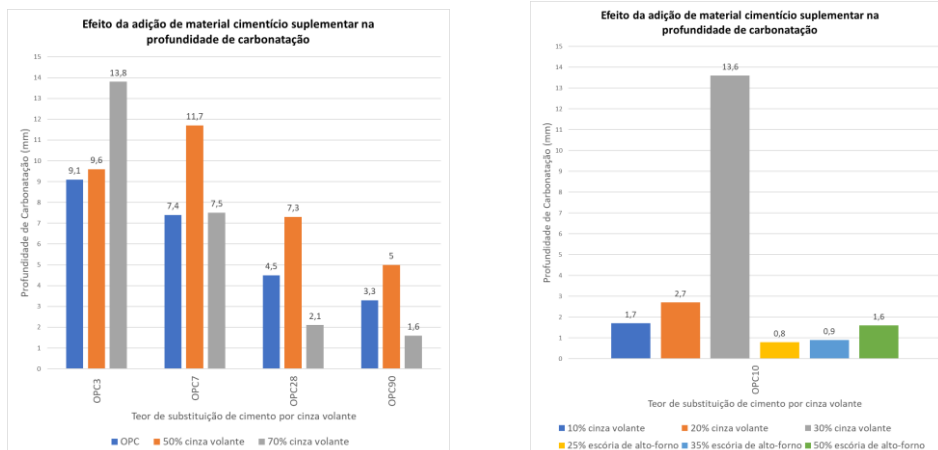
Fonte: autor (2022)

### 3.4 Efeito da adição de material cimentício suplementar (SCM)

Os dados retirados do estudo de Atis (2003), mostram a influência da adição SCM na profundidade de carbonatação para concretos feitos com cimento Portland comum (OPC) com ensaios realizados a 03, 07, 28 e 90 dias, em amostras com cura por carbonatação acelerada (cura úmida). Nota-se que as amostras com maior teor de substituição de cimento por cinza volante tendem a apresentar maiores profundidades de carbonatação. Isso se deve ao fato da reação pozolânica consumir o CH resultante da hidratação do cimento, fazendo com que a quantidade de cálcio disponível seja menor.

Por meio do estudo de Liu et al (2018), pode-se verificar que os diferentes tipos de SCM's utilizados para substituir parte do cimento Portland comum, geram profundidades de carbonatação diferentes em uma

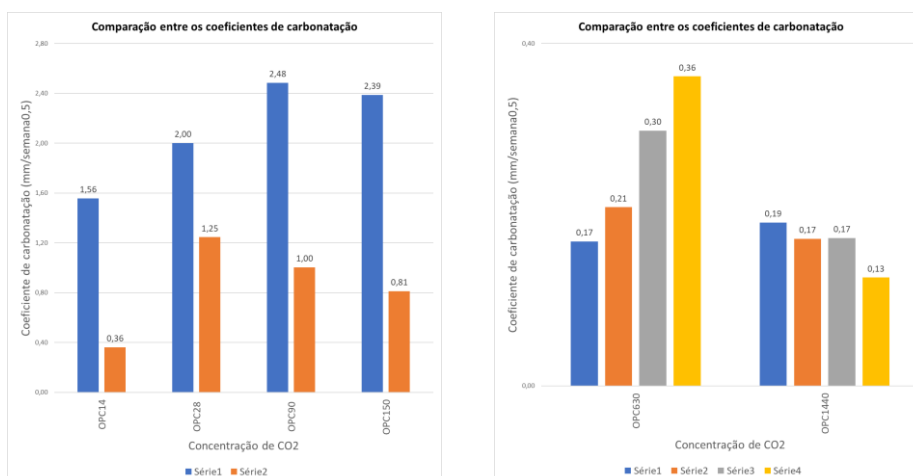
mesma idade de ensaio, neste caso aos 10 dias. Isso porque os SCM's têm origem diferentes e são produzidos de forma diferente, o que resulta em diferentes propriedades físicas e químicas, que irão afetar as propriedades do concreto de diferentes maneiras (CAREVIC' et al., 2019). Como pode-se notar, quanto maior o teor de substituição de OPC por SCM, maior é a profundidade de carbonatação.



Fonte: autor (2022)

### 3.5 Comparação entre o valor do coeficiente de carbonatação (k) para a carbonatação acelerada e para a carbonatação natural

Os dados retirados do estudo de Herrera et al (2013), mostram que para um mesmo OPC, com ensaios realizados a 14, 28, 90 e 150 dias, o coeficiente de carbonatação acelerada é maior que o coeficiente de carbonatação natural em todas as idades. Isso se deve ao fato de que no ensaio de carbonatação acelerada, os parâmetros da câmara de carbonatação (temperatura, umidade relativa e concentração de CO<sub>2</sub>) são controlados e diferem dos mesmos parâmetros em condições normais utilizados para os ensaios de carbonatação natural. Carevic et al (2019), também realizou ensaios com amostras de OPC com a utilização de agregado natural e submeteu essas amostras a ensaios de carbonatação acelerada e carbonatação natural com idades de ensaio de 630 dias e 1440 dias respectivamente. Os resultados podem ser verificados no gráfico abaixo, demonstrando novamente que os ensaios de carbonatação acelerada resultam em coeficientes de carbonatação maiores que os ensaios de carbonatação natural.



Fonte: autor (2022)

## 2 CONCLUSÕES

Com base na revisão bibliográfica da literatura, foi possível analisar alguns resultados de ensaio de carbonatação acelerada e carbonatação natural, o que gerou os dados compilados na Tabela 1. A partir desses dados, foram feitas análises de alguns fatores que interferem na profundidade de carbonatação, sendo possível também comparar os coeficientes de carbonatação. Dessa maneira as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- (1) A compacidade da estrutura porosa do concreto depende da relação a/c. Dessa forma, quanto maior a relação a/c, maior será a porosidade e mais fácil será a difusão do  $\text{CO}_2$ , levando a uma maior profundidade de carbonatação, sendo assim, a resistência à carbonatação aumenta à medida que a relação água/cimento (a/c) diminui.
- (2) A vasta literatura pesquisada nos traz que em umidades relativas mais altas, os poros do concreto estão mais saturados, o que dificulta a difusão do  $\text{CO}_2$  e reduz a velocidade da frente de carbonatação, levando a profundidades de carbonatação menores. Sendo assim, conclui-se que a profundidade de carbonatação diminui com o aumento da umidade relativa (UR). No, não foi possível demonstrar este resultado.
- (3) Como visto, o ensaio de carbonatação acelerada com cura úmida resultou em menores profundidades de carbonatação do que o ensaio de carbonatação acelerada com cura seca. Concretos curados com água possuem poros capilares menores e menos interconectados, o que dificulta a difusão do  $\text{CO}_2$  e leva a uma menor profundidade de carbonatação, sendo assim, a condição de cura influencia o grau de porosidade interconectada do concreto.
- (4) Para avaliar o efeito da utilização de SCM's na profundidade de carbonatação é preciso levar em conta os efeitos físicos e químicos causados por essa substituição parcial do cimento. Como efeito físico temos o refinamento da porosidade, o que leva a uma menor permeabilidade e conseqüentemente a uma maior dificuldade de difusão do  $\text{CO}_2$ , causando então uma menor profundidade de carbonatação. Por outro lado, como efeito químico temos a redução de  $\text{Ca}^{++}$  devido a reação pozolânica que consome CH para formação do C-S-H, levando a uma maior profundidade de carbonatação. Por isso, podemos dizer que, se a porosidade for constante, a adição de SCM como substituição parcial do cimento tende a gerar uma maior profundidade de carbonatação.
- (5) Em virtude das várias condicionantes que envolvem e afetam o coeficiente de carbonatação do concreto, a comparação dos resultados dos ensaios naturais com os ensaios acelerados não é simples, porque nos ensaios acelerados, procura-se normalizar o ensaio, utilizando-se concentrações de  $\text{CO}_2$ , umidade relativa e temperatura constantes, enquanto ao ensaio natural, as estruturas de concreto estão expostas a condições ambientais diferentes, variáveis e cíclicas.

## 3 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAF, WARDA, OLEK, JAN, TIAN, NANNAN. Multiscale characterization of carbonated wollastonite paste and application of homogenization schemes to predict its effective elastic modulus. *Cement and Concrete Composites*; v. 72, September 2016, Pages 284-298; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.023>.
- ATIS, CENGİZ DURAN. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. *Construction and Building Materials* 17 (2003) 147–152.
- BAKKER, R.F.M. Initiation period. In.: SCHIESSL, P. (Ed.) *Corrosion of steel in Concrete: report of technical committee 60CSC RILEM*. London: Chapman & Hall Ltda, 1998, p.22-55.
- BAUER, E. Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

- BENSTED, J. Raman spectral studies of carbonation phenomena. *Cement and Concrete Research*; v. 7, Issue 2, March 1977, Pages 161-164; [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(77\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(77)90026-6)
- BERNAL, SUSAN A., PROVIS, JOHN L., GUTIÉRREZ, RUBY MEJIA DE, DEVENTER, JANNIE S. J. VAN. Accelerated carbonation testing of alkali-activated slag/ metakaolin blended concretes: effect of exposure conditions. *Materials and Structures* (2015) 48:653–669; <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0289-4>
- BERTOS, M.F., SIMONS, S.J.R., HILLS, C.D., CAREY, P.J. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>. *Journal of Hazardous Materials*; v. 112, Issue 3, 30 August 2004, Pages 193-205; <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.04.019>
- CAREVIĆ, VEDRAN, IGNJATOVIĆ, IVAN, DRAGAŠ, JELENA. Model for practical carbonation depth prediction for high volume fly ash concrete and recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*; v. 213, 20 July 2019, Pages 194-208; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.267>
- DIXIT, P.R., SILVA, A., NEVES, R., BRITO J. DE . Predicting carbonation coefficient using Artificial neural networks and genetic programming. *Journal of Building Engineering*; v. 39 , julho de 2021, 102258; <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102258>
- DROUET, E., POYET, S., BESCOP, P.L., TORRENTI, J.-M., BOURBON, X. Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature. *Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature*; *Cement and Concrete Research*; v. 115, January 2019, Pages 445-459; <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.019>.
- EKOLU, S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO<sub>2</sub> concentration upon natural carbonation of concrete. *Construction and Building Materials*; v. 127, 30 November 2016, Pages 306-320; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056>
- GRUYAERT, ELKE, HEEDE, PHILIP VAN DEN, BELIE NELE DE. Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure. *Cement and Concrete Composites*; v. 35, Issue 1, January 2013, Pages 39-48; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.024>
- H. MA, Z. LI. Estrutura de poros realista da pasta de cimento Portland: estudo experimental e simulação numérica. *Comp. Concr.* 11 (2013) 317-336.
- HERRERA, A.DURÁN, RANGEL, J. M. MENDOZA, SANTOS, E.U DE LOS, VÁZQUEZ, F., VALDEZ, P., BENTZ, DALE P. Accelerated and natural carbonation of concretes with internal curing and shrinkage/viscosity modifiers. *Materials and Structures*; v. 48, pages1207–1214 (2015); <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0226-y>
- HOUST, YVES F., WITTMANN, FOLKER H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. *Cement and Concrete Research*; v. 32, Issue 12, December 2002, Pages 1923-1930; [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00908-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00908-0)
- JEDIDI, MALEK, BENJEDDOU, OMRANE, SOUSSI, CHOKRI. Effect of water-cement ratio, cement dosage, type of cement and curing process on the depth of carbonation of concrete. *The Civil Engineering Journal* 3-2020; <https://doi.org/10.14311/CEJ.2020.03.0030>.
- KULAKOWSKI, MARLOVA P. , PEREIRA, FERNANDA M. , MOLIN, DENISE C.C. DAL. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. *Construction and Building Materials*; v. 23, Issue 3, March 2009, Pages 1189-1195; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.005>.
- LIU, ZANQUN, HU, WENLONG, HOU, LE, DENG, DEHUA. Effect of carbonation on physical sulfate attack on concrete by Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Construction and Building Materials*; v. 193, 30 December 2018, Pages 211-220; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.191>
- LO, Y., LEE, H. M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. *Building and Environment*; v. 37, Issue 5, May 2002, Pages 507-514;

[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00052-X).

- LO, T.Y.; LIAO, W.; WONG, C.K.; TANG, W. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. *Construction and Building Materials*, v. 107, p. 299-306, 2016; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.026>.
- LONDHE, S.N., KULKARNI, P.S., DIXIT, P.R., SILVA, A., NEVES, R., BRITO, J. DE. Predicting carbonation coefficient using Artificial neural networks and genetic programming. *Journal of Building Engineering*; v. 39, July 2021, 102258; <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102258>.
- MONTEIRO, I., BRANCO, F.A., BRITO, J. DE, NEVES, R. Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures. *Construction and Building Materials*; v. 29, April 2012, Pages 263-269; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.028>
- POSSAN, E. Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado. 2004. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- POSSAN, E. Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. Dissertação Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- POSSAN, E, THOMAZ, WILLIAM A., ALEANDRI, GUSTAVO A., FELIX, EMERSON F., SANTOS, ANA C.P. DOS. CO<sub>2</sub> uptake potential due to concrete carbonation: A case study; *Case Studies in Construction Materials*; v. 6, June 2017, Pages 147-161; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>.
- QIU, QIWEN. A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. *Construction and Building Materials*; v. 247, 30 de junho de 2020 , 118503; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118503>.
- RAMÍREZ, S. MARTÍNEZ, CARRASCO, L. FERNÁNDEZ. Carbonation of ternary cement systems. *Construction and Building Materials*; v. 27, Issue 1, February 2012, Pages 313-318; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.043>
- RIBEIRO, DANIEL VERAS et al. Comitê Técnico IBRACON/ALCONPAT 702: “Procedimentos de Ensaio de carbonatação acelerada e natural do concreto – Prática Recomendada. 1ª edição, São Paulo, 2021.
- VALCUENDE, M., PARRA, C. Natural carbonation of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*; v. 24, Issue 5, May 2010, Pages 848-853; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.021>
- WANG, XIAO-HUI, VAL, DIMITRI V., ZHENG , LI, JONES, M. RODERICK. Carbonation of loaded RC elements made of different concrete types: Accelerated testing and future predictions. *Construction and Building Materials*; v. 243, 20 May 2020, 118259; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118259>
- ZENG, XIANGCHAO. Progress in the research of carbonation resistance of RAC. *Construction and Building Materials*; v. 230, 10 January 2020, 116976; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116976>.
- ZHANG, DUO, SHAO, YIXIN. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. *Construction and Building Materials* v. 123, 1 October 2016, Pages 516-526; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.041>
- ZHANG, DUO, LIU, TIANLU, SHAO, YIXIN. Weathering Carbonation Behavior of Concrete Subject to Early-Age Carbonation Curing. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2020, 32(4): 04020038; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003087](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003087).