



Análise da concentração de CO₂ na carbonatação de Cimentos Álcali Ativados

ANALYSIS OF CO₂ CONCENTRATION IN THE CARBONATION OF ACTIVATED ALKALI CEMENTS

Carolina Giongo Ferrari*, Caroline Angulski da Luz †

RESUMO

O Cimento Álcali Ativado (CAT) é um possível substituinte do Cimento Portland (CP), composto de um mineral precursor (subproduto da indústria de ferro-gusa) e um ativador alcalino. Seu uso reduz a necessidade de extração de matéria-prima, contribuindo para o meio ambiente. O objetivo deste trabalho é investigar o comportamento do CAT sujeito aos testes de carbonatação acelerada, com diferentes teores de dióxido de carbono (CO₂), relacionando com aspectos de durabilidade. Devido à pandemia mundial do COVID-19 foi possível realizar somente uma revisão bibliográfica sobre o assunto e, por meio deste estudo, obteve-se um entendimento sobre as práticas e atividades laboratoriais propostas e um melhor embasamento sobre o tema da pesquisa. Os resultados mostrados pelas literaturas sobre as diferentes concentração de CO₂ na carbonatação acelerada de concretos à base de CAT, apontam profundidade de carbonatação maior do que em CP, sendo que a durabilidade de estruturas de concreto armado utilizando o CAT pode ser comprometida devido a fissurações e redução do pH. Porém ao analisar os trabalhos já existentes, com diferentes precursores e ativadores, não foi possível delimitar um intervalo de concentração de CO₂ mais adequado para a realização do teste.

Palavras-chave: cimento, sustentabilidade, cimento álcali ativado, carbonatação, concentração de CO₂.

ABSTRACT

Alkali Activated Cement (AAC) is a possible replacement for Portland Cement (PC), composed of a precursor mineral (a by-product of the pig iron industry) and an alkaline activator. Its use reduces the need for raw material extraction, contributing to the environment. The objective of this work is to investigate the behavior of AAC subjected to accelerated carbonation tests with different levels of carbon dioxide (CO₂) relating to aspects of durability. Due to the worldwide pandemic of COVID-19, it was only possible to carry out a literature review on the subject and, through this study, an understanding of the proposed laboratory practices and activities was obtained, as well as a better basis on the research topic. The results shown in the literature on the different concentrations of CO₂ in the accelerated carbonation of CAT-based concretes indicate a greater depth of carbonation than in CP, and the durability of reinforced concrete structures using AAC can be compromised due to cracking and pH reduction. However, when analyzing the existing works, with different precursors and activators, it was not possible to delimit a more adequate range of CO₂ concentration for carrying out the test.

Keywords: cement, sustainability, activated alkali cement, carbonation, CO₂ concentration.

* Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil; carolinagferrari@hotmail.com

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco (Pato branco); angulski@hotmail.com.



1 INTRODUÇÃO

O Cimento Álcali Ativado (CAT) é uma alternativa para diminuir o consumo de clínquer mundial, sendo composto por um mineral precursor (escória de alto-forno, um subproduto da fabricação do ferro-gusa) e um mineral ativador, sua utilização é benéfica ao meio ambiente. Porém, no que concerne à sua durabilidade frente ao fenômeno da carbonatação, ainda se torna questionável sua utilização. Para análise e estudo desse fenômeno, faz-se o uso de uma câmara de carbonatação que possibilita o controle da temperatura, umidade e concentração de dióxido de carbono (CO_2). Sendo assim, o objetivo deste trabalho é responder a seguinte pergunta: “entre quais valores de concentração de CO_2 , a carbonatação acelerada em CAT’s prevê uma vida útil coerente com a carbonatação natural?”

De acordo com Neville e Brooks (2013), a escória de alto-forno é a adição mineral que apresenta a maior possibilidade de substituição do clínquer, além de apresentar benefícios por ser um subproduto, ou seja, resultante de um processo de fabricação primário. De acordo com Perardt (2021), o ativador alcalino geralmente é um hidróxido ou um silicato. Estes apresentam a função de elevar o pH da mistura possibilitando a solubilização do aluminossilicato.

Nesse contexto, observa-se a importância do entendimento para a utilização do CAT, como substituição do Cimento Portland (CP) ao analisar que o CAT é um material menos poluente. Apesar disso, um ponto que apresenta crítica e insegurança com relação à utilização do CAT é quando diz respeito a sua durabilidade diante do fenômeno conhecido como carbonatação. Neste estudo, o objetivo é analisar os aspectos relacionados à durabilidade de corpos de prova produzidos com CAT e expostos à carbonatação acelerada com diferentes teores de CO_2 .

De acordo com a ABNT NBR 5735 (1991), a escória granulada de alto-forno possui característica vítrea pelo fato de ter sido submetida ao processo de resfriamento brusco, o material em questão apresenta grande quantidade silicatos e alumínio silicatos de cálcio. O produto principal do alto-forno é o ferro-gusa e para sua produção é possível utilizar o carvão vegetal ou o carvão mineral (conhecido como coque).

John (1995) em sua tese, classifica a escória em ácida e básica de acordo com o combustível utilizado em alto-forno, sendo que as escórias chamadas de básicas são produzidas a partir do coque, enquanto que as escórias ácidas através do carvão vegetal. Essa classificação, de acordo com o autor, leva como princípio o índice de basicidade da escória, em que analisa os óxidos ácidos e básicos presentes na composição, sendo que, em escórias ácidas devem apresentar a relação entre $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$ e escórias básicas $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1$.

Perardt (2021) relata que a junção entre as propriedades e composições químicas da escória de alto-forno com o ativador alcalino empregado apresenta influência direta nos compostos hidratados. John (1995) cita, ainda, que a ativação química da escória tem como objetivo a aceleração do processo de hidratação das escórias, que é dada por dois fatores:

- a) elevação da velocidade de dissolução através da elevação do pH;
- b) antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados devido ao aumento da concentração de íons na solução já no início do processo de dissolução ou pela alteração da solubilidade dos compostos da escória. (JOHN,1995, p.60).

Com relação à ativação da escória de alto-forno Langaro et al. (2020) analisa que a melhor resistência mecânica foi atingida com o teor de 5% de hidróxido de cálcio (NaOH).

É imprescindível que um material dentro da construção civil seja durável a longo prazo. No entanto, o processo chamado de carbonatação pode afetar drasticamente os resultados. O dióxido de carbono (CO_2) é um agressor químico dos materiais cimentícios e está presente na atmosfera, sendo assim qualquer estrutura pode ser alvo do processo de carbonatação, podendo prejudicar sua durabilidade. De acordo com Silva (2011), o



processo da carbonatação é responsável por gerar um ambiente propício para a corrosão do aço, podendo também causar tensões dentro do material resultando em fissurações na estrutura.

No CP, a carbonatação é definida como um processo físico-químico pelo qual ocorre a alteração da composição de compósitos de natureza alcalina, provenientes das reações de hidratação de cimentos, transformando em sais, sendo estes de natureza ácida, através da ação do CO_2 (CASCUDO & CARASEK, 2011). O processo de carbonatação do concreto produzido com CP, envolve os processos físico-químicos onde é possível observar que na maioria das reações tem-se como produto final o CaCO_3 . Este composto, é responsável por reduzir a alcalinidade do meio, tem baixa solubilidade e é precipitado dentro dos poros do concreto formando uma barreira para o progresso frente a carbonatação (FIGUEIREDO, 2004). Tendo isso, Cui et al. (2015) traz em sua tese que a profundidade de carbonatação cresce rapidamente no início e tende a prosseguir mais lentamente devido ao processo contínuo de hidratação do cimento e, também, a precipitação dos carbonatos.

O processo de carbonatação em CAT's não está totalmente compreendido, pelo fato de existirem diferentes variedades de precursores e ativadores na literatura. Entretanto, sabe-se que segundo Bernal et al. (2013), ocorre em duas etapas: a primeira está relacionada com a carbonatação nos próprios poros, fazendo com que ocorra a redução do pH e precipitação de carbonatos rico em Na; posteriormente ocorre a descalcificação das fases que contém Ca, principalmente o C-S-H. Sendo assim, havendo a diminuição de Ca/Si do gel de C-S-H, dá-se desintegração da matriz de forma mais intensa (PUERTAS; PALACIOS; VÁZQUEZ, 2006). Segundo Perardt (2021), quando no processo de carbonatação do CAT's ocorre a descalcificação do C-S-H (principal fonte de cálcio), a estrutura porosa pós-carbonatação também é danificada.

O avanço da difusividade do gás precursor da carbonatação dentro da estrutura do concreto é afetado por variáveis internas (própria do concreto) e externas (do ambiente que a estrutura está exposta). Neste trabalho, o objetivo é analisar a concentração do CO_2 no fenômeno da carbonatação acelerada relacionando aspectos de durabilidade em CAT's. No que se refere ao meio ambiente, a quantidade de CO_2 presente é relativamente baixa e, assim, a quantidade de CO_2 que penetra na superfície de um material cimentício é lenta. Possan (2010) analisa que a concentração média de CO_2 presente na atmosfera varia entre 0,03 a 1%. Nesse âmbito, para fins de estudos é comum empregar testes acelerados de carbonatação para poder analisar em um tempo mais curto (PERARDT, 2021).

É válido ressaltar, também, que segundo análises feitas pelos autores Bernal et al. (2012), ao colocar CAT's em altas concentrações de CO_2 ocorre uma redução brusca do pH incoerente com a carbonatação natural. Para o caso de CAT's, a análise da carbonatação em meio a altas concentrações de CO_2 pode prever uma vida útil equivocada. Sendo assim, para testes de carbonatação acelerada é importante analisar a concentração de CO_2 .

Este artigo é resultado de uma iniciação científica iniciada em agosto de 2020. Os planos foram alterados devido ao cancelamento das atividades presenciais, ocasionado pela pandemia mundial causada pelo vírus COVID-19, não sendo possível a realização das atividades práticas propostas no plano de trabalho, sendo assim optou-se por realizar um estudo detalhado sobre trabalhos existentes que utilizaram diferentes concentrações de CO_2 na carbonatação acelerada em corpos de prova produzidos com CAT.

2 MÉTODOS

A pesquisa deste artigo teve início em agosto de 2020, na instituição UTFPR, campus Pato Branco. Optou-se por realizar uma revisão bibliográfica detalhada sobre a carbonatação em CAT's e para discutir sobre as diferentes concentrações de CO_2 na carbonatação acelerada de CAT, diversas referências bibliográficas foram estudadas.



Sabe-se ainda que Sanjuán et al. (2003) recomenda testes com percentuais de CO₂ inferiores a 20% pelo fato de que acredita-se que em elevadas concentrações de tal gás pode ocorrer mudanças microestruturais não desenvolvidas em condições normais. Para comparar diferentes concentrações de CO₂ em corpos de prova produzidos com CAT serão analisados os trabalhos de Perardt (2021) e Cadore (2018), onde a concentração de CO₂ é 5±1 %, Häkkinen (1993), em que a concentração de CO₂ permaneceu em 3%, Rodrigues et al. (2008) com concentração de CO₂ de 7±0,5%.

No trabalho de Perardt (2021), utilizou-se uma escória considerada ácida, devido à relação entre CaO/SiO₂ de 0,78. Na dissertação de mestrado de Cadore (2018), a escória de alto-forno também teve característica ácida CaO / SiO₂ igual a 0,97. A escória utilizada por Häkkinen (1993) pode ser considerada como neutra (CaO / SiO₂ de 1). O ativador alcalino de todos os trabalhos descritos acima foi o NaOH. Já a escória utilizada por Rodrigues et al. (2008) apresenta uma relação entre CaO / SiO₂ igual a 1,42, portanto básica e no trabalho o ativador alcalino utilizado foi o silicato de sódio (Na₂SiO₃).

3 RESULTADOS

Contatou-se, por meio de pesquisa, que as diferentes concentrações de CO₂, pode alterar a porosidade total e a estrutura capilar dos materiais à base de CAT (BERNAL et al., 2014a), podendo gerar modificações nos poros carbonatados do CAT (BERNAL et al., 2012).

Com relação à concentração de CO₂ de 5±1 %, Perardt (2021) analisa em sua tese corpos de prova de concreto com o uso de CAT acrescentando os diferentes tipos de adições: cal hidratada tipo III (CH-III), fosfogesso e óxido de magnésio (MgO). Quando os corpos de prova foram expostos ao teste de carbonatação acelerada a temperatura era de 40±0,1°C e umidade relativa de 65±5%, sendo analisada as amostras com 4, 8, 12 e 16 semanas. Com 4 semanas de exposição o CAT com adição de CH-III e o CAT com adição de fosfogesso já haviam sido totalmente carbonatados, diferentemente dos concretos produzido com CAT e com CAT+ MgO, que de forma mais lenta, com 16 semanas adquiriram aspecto incolor. A autora traz em sua monografia uma análise dos coeficientes de carbonatação do CAT-M, em que contatou-se que com 4 semanas de carbonatação acelerada este coeficiente foi cerca de 15 vezes maior do que em condição natural.

Com a mesma concentração de CO₂ (5±1 %), na dissertação de mestrado produzida por Cadore (2018), em que são relacionados aspectos de durabilidade de concretos à base de CAT com aspectos relacionados à carbonatação, foi produzido concretos de CAT comparando com CP composto pozolânicos de classe 32 resistente a sulfatos. Na condição de ensaio de carbonatação acelerada deste trabalho teve a temperatura fixada em 40±0,1°C e umidade relativa de 65±5%, sendo analisada as amostras com 4, 8, 12 e 16 semanas.

Além disso, analisando os trabalhos de Häkkinen (1993), em que o autor comparou o CAT com CP e cimento misturado em que a concentração de CO₂ permaneceu em 3%. No teste de carbonatação acelerada a umidade relativa foi de aproximadamente 70%, e como resultado do ensaio obteve-se uma carbonatação mais profunda e mais rápida no concreto produzido com CAT do que com o produzido com o CP.

Nos trabalhos de Rodrigues et al. (2008), em que o objetivo da pesquisa foi analisar um concreto alternativo com base em escória ativada por álcali, a concentração de CO₂ no teste de carbonatação acelerada em CAT manteve-se em 7±0,5%, em uma temperatura de 20±1°C e umidade relativa de 70±3%. Após as devidas análises feitas pelos autores, observou-se que o concreto produzido por escória ativada por álcali apresentaram maior susceptibilidade a carbonatação, enfatizando que em seus resultados a taxa de carbonatação em CAT foi de cerca de 3 vezes superior do que no CP.

Com relação à carbonatação acelerada, pode-se observar que os testes são significativamente mais agressivos do que a análise da carbonatação natural. Na Tab. 1, encontram-se as principais discussões sobre



as diferentes bibliografias analisadas, levando em consideração temas debatidos sobre a carbonatação acelerada em CAT's.

Tabela 1 – Análise de diferentes concentrações de CO₂ na carbonatação acelerada em CAT's

Autores	Concentração de CO ₂	Principais discussões
Perardt (2021)	5±1 %	Os concretos de CAT com adição de cal hidratada tipo III e os concretos de CAT com fosfogesso apresentaram 6 anos a menos de vida útil quando analisados sob carbonatação acelerada.
Cadore (2018)	5±1 %	Os compósitos de CAT obtiveram profundidade de carbonatação aproximadamente 4,42 cm superiores aos concretos de CP, o autor justifica o resultado pelo fato de que o CAT apresenta uma maior fissuração em sua estrutura, além de apresentar menor reserva alcalina perante a aos compósitos de CP.
Häkkinen (1993)	3%	A taxa de carbonatação em CAT era muito mais rápida e mais profunda do que a carbonatação frente a mesma concentração de CO ₂ em compósitos de CP. O autor explica essa diferença, a qual, segundo ele, se dá pela falta de Ca(OH) ₂ em CAT e as microfissuras presente.
Rodrigues et al. (2008)	7±0,5%	Teve resultados em que a taxa de carbonatação de compósitos de CAT foi de aproximadamente 3 vezes maior do que a de CP, sendo que ocorreu uma perda de resistência muito maior, segundo os autores.

Fonte: Autoria própria (2021).

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal investigar o comportamento do CAT sujeito a testes de carbonatação acelerada, contendo diferentes teores de CO₂, relacionando com aspectos de durabilidade. Devido a alterações no plano de trabalho ocasionadas pela pandemia mundial do COVID-19, foi possível realizar somente uma revisão bibliográfica detalhada sobre o assunto. Sendo assim, pode-se dizer que a revisão bibliográfica contribuiu de maneira significativa para o entendimento das atividades laboratoriais propostas e possibilitou melhor embasamento sobre o tema da pesquisa.

Nota-se que a substituição do CP pelo CAT é importante devido à grande redução de emissão de gases poluentes e gastos energéticos. No entanto, é válido salientar que a utilização de CAT, para elementos estruturais, deve ser feita de forma cautelosa pelo fato de que a durabilidade pode ser comprometida em razão do comportamento frente a carbonatação, podendo ocorrer fissurações na estrutura dos poros do concreto e a redução do pH ocasionando problemas relacionados à corrosão da armadura. Com relação ao teste de carbonatação acelerada, com os diferentes teores de CO₂ analisados, foi possível verificar nas bibliografias que os corpos de prova à base de CAT, em todos os casos apresentaram maior profundidade de carbonatação, quando comparado com o CP, prejudicando a estabilidade dos corpos e intrinsecamente sua durabilidade. Portanto, com os valores de concentração de CO₂ de 5±1 %, 3% e 7±0,5%, os testes de carbonatação acelerada não demonstraram desconformidade, pelo fato de que em todos os casos em que há comparação em CAT e CP obteve-se uma maior carbonatação em CAT.

Levando em consideração a importância do assunto, como não foi possível realizar as práticas laboratoriais deste trabalho, novos estudos poderiam ser realizados com corpos de prova de mesma composição, sendo expostos aos mesmos procedimentos de cura, com diferentes teores de concentração de CO₂ em câmara, para poder comparar no mesmo intervalo de tempo, o coeficiente de carbonatação. Com isso, poderá ser feita uma análise dos resultados obtidos da carbonatação dos compósitos de CAT, chegando a uma resposta sobre a faixa de concentração de CO₂ mais adequada, que condiz com a carbonatação natural, para a realização de testes de carbonatação acelerada em CAT.



REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.
- BERNAL, S. A. et al. **Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry**. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, v. 42, n. 10, p. 1317–1326, 2012.
- BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; WALKLEY, B.; SAN NICOLAS, R.; GEHMAN, J. D.; BRICE, D. G.; KILCULLEN, A.; DUXSON, P.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation**. *Cement and Concrete Research*, v. 53, 127–144 p., 2013.
- CADORE, Douglas Éverton. **Durabilidade de concretos à base de cimento álcali ativado: aspectos relacionados à carbonatação**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.
- CASCUDO, O; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto** – Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON. v. 1. 849-883 p., 2011.
- CUI, H.; TANG, W.; LIU, W.; DONG, Z.; XING, F. **Experimental study on effects of co2 concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms**. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 93, p. 522–527, 2015.
- FIGUEIREDO, C. **Estudo da Carbonatação em Estruturas de Concreto Armado em Brasília–Avaliação de Pilares**. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, Brasília, UnB, 2004.
- HÄKKINEN, **The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete**. Part 1 Microstructural studies and basic mechanical properties, *Cem. Concr. Res.* 23 (2) (1993) 407– 421.
- JOHN, M. V. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 199f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- LANGARO, E. et al. **Use of slag (gbfs) generated in charcoal blast furnace as raw material in alkali-activated cement**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Springer, p. 1–9, 2020.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. ed. 2. Bookman. São Paulo, 2013.
- PERARDT, Mariana. **Melhoramento da resistência à carbonatação do cimento álcali ativado por meio de adições sob condições naturais e aceleradas de ensaio**. 2021. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.
- POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010.
- PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; VÁZQUEZ, T. **Carbonation process of alkali-activated slag mortars**. *Journal of materials science*, Springer, v. 41, n. 10, p. 3071–3082, 2006.
- RODRÍGUEZ, S. BERNAL, R.M.D.GUTIÉRREZ, F.PUERTAS, **Alternative concrete based on alkali-activated slag**, *Mater. Constr.* 58 (291) (2008) 53–67.
- SANJUÁN, M. A.; ANDRADE, C.; CHEYREZY, M. **Concrete carbonation test in natural and accelerated conditions**. *Advances in Cement Research*, v. 15, 171–180 p., 2003.
- SILVA, T. J. **Mecanismos de transporte de massa no concreto** – Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, v.1. 809-848 p., 2011.