



Uso da adição autocicatrizante em concreto à base de cimento álcali ativado visando ao melhoramento da sua resistência à carbonatação

Use of self-healing addition in alkali activated cement – based concrete to improve its resistance to carbonation

Eduardo Henrique Kreuz¹, Caroline Angulski da Luz²

RESUMO

O Cimento Álcali Ativado (CAT), à base de escória granulada de alto-forno, é uma opção sustentável para a substituição do Cimento Portland, material que impacta negativamente o ambiente durante sua produção. No entanto, concretos desenvolvidos com esse material apresentam baixa resistência à carbonatação. Diante disso, esse trabalho tem como finalidade verificar se o uso de adições autocicatrizantes é capaz de melhorar a resistência do material frente a esse ataque. Para tanto, amostras de concreto de CAT, com e sem a adição, foram elaboradas e expostas à carbonatação natural. A profundidade de carbonatação foi verificada após 0, 4, 12 e 24 semanas de exposição. Ademais, ensaios de resistência à compressão, absorção e difração de raio X foram elaborados para auxiliar no estudo e interpretação da pesquisa. Os resultados de absorção mostraram que a adição de fato ajudou na redução da permeabilidade, no entanto, a diferença não foi significativa a ponto de retardar o ataque. Até a idade de 12 semanas não se observou diferença entre os resultados de profundidade de carbonatação, com 24 semanas, as amostras sem adição apresentaram maior resistência ao ataque, concluindo-se que a adição não teve o efeito esperado.

PALAVRAS-CHAVE: Adição Impermeabilizante; Carbonatação; Cimento Álcali Ativado;

ABSTRACT

Activated Alkali Cement (AAC), based on granulated blast furnace slag, is a sustainable option for replacing Portland Cement, a material that negatively impacts the environment during its production. However, concretes developed with this material have low resistance to carbonation. In view of this, this work aims to verify whether the use of self-healing addition capable of improving the resistance of the material against this attack. For this purpose, AAC concrete samples, with and without addition, were prepared and exposed to natural carbonation. The depth of this was checked after 4, 12 and 24 weeks of exposure. In addition, compressive strength tests, absorption and X-ray diffraction were designed to assist in the study and interpretation of the research. The absorption results showed that the addition indeed helped in waterproofing, however, the difference was not significant enough to delay the attack. Until the age of 12 weeks, no difference was observed between the carbonation depth results, however, at the age of 24 weeks, the samples without addition showed greater resistance to attack, concluding that the addition did not have the expected effect.

KEYWORDS: *Self-healing addition. Carbonation. Alkali activated cement.*

INTRODUÇÃO

A área da engenharia civil é responsável por grandes impactos ambientais, entre as causas, pode-se citar as consequências da produção do cimento Portland (CP). Sua produção requer altas temperaturas, próximas de 1400 °C, além de liberar quantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂) (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Uma alternativa ao CP é o Cimento Álcali Ativado (CAT), um aglomerante produzido a partir da ativação, por solução alcalina, de uma matéria prima mineral, sendo uma opção a escória granulada de alto-forno. Material que, conforme a NBR 16697/2018,

¹ Bolsista do(a) Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: eduardokreuz@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4877772560738342.

² Docente no curso de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: angulski@hotmail.com. ID Lattes: 6643847967478272.



é um subproduto da produção do ferro gusa, constituído em sua maior parte de silicatos e alumino-silicatos de cálcio. Trabalhar com a escória é mais vantajoso do ponto de vista ambiental, pois muitas vezes o material não tem destino certo e não precisa de calcinação, processo de desintegração térmica responsável por grande parte da eliminação do CO₂ na fabricação do CP (LANGARO, 2016).

Contudo, o concreto à base CAT tem mostrado baixa resistência à carbonatação (CADORE, 2018), processo que consiste na reação do CO₂ com o cimento hidratado. No caso do concreto à base de CP, o CO₂, que entra no material através da difusão, na presença de umidade forma ácido carbônico (H₂CO₃), o qual reage principalmente com a portlandita (Ca(OH)₂), gerando carbonato de cálcio (CaCO₃). Ademais, no concreto armado, essa reação diminui o pH da água dos poros, removendo a camada passivadora que protege o aço, deixando-o suscetível à corrosão (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Nos concretos à base de CAT, devido à falta de Ca(OH)₂, o CO₂ reage com os íons de Ca²⁺ do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), desintegrando a matriz e afetando características como a resistência do material. Outros fatores que facilitam a entrada do dióxido de carbono são a maior concentração de álcalis nos poros e maior retração do material quando comparado ao concreto de CP (CADORE, 2018).

Uma maneira de proteger o material frente a esse ataque é diminuir a entrada do agente nocivo, para isso, adições impermeabilizantes por cicatrização podem ser uma alternativa. Essas adições permeiam pelos capilares do material, reagindo com os produtos químicos dos poros e preenchendo-os com uma estrutura cristalina insolúvel, assim, reduzindo a entrada de água e agentes nocivos (CAPPELLESSO, 2016).

Tendo em vista os impactos positivos que o CAT teria para o desenvolvimento sustentável, esse trabalho busca avaliar se o uso de adições autocicatrizantes podem melhorar sua resistência à carbonatação e, conseqüentemente, a sua durabilidade, possibilitando o seu uso no mercado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Como material precursor foi utilizado escória granulada proveniente de altos-fornos a carvão vegetal, com relação CaO/SiO₂ de 0,78 e composição química de: SiO₂ = 40,5%; CaO = 31,6%; Al₂O₃ = 14,3%; Fe₂O₃ = 1,8%; Outros = 11,8%. O produto passou por secagem em estufa durante 24 horas a temperatura de 105 ± 2 °C. Em seguida, realizou-se a trituração por 2 horas em moinho de bolas, adquirindo a superfície específica de 3350 cm²/g e massa específica de 2,86 g/cm³. Como ativador alcalino, foi utilizado hidróxido de sódio (NaOH) em micro pérolas. Sua escolha e quantidade, 5% em relação a massa do aglomerante, foram determinados com base no trabalho de Langaro (2016).

Como agregado miúdo utilizou-se areia natural: massa específica de 2,61 g/cm³, dimensão máxima característica de 1,18 mm e módulo de finura de 1,60. Como agregado graúdo usou-se brita de origem basáltica, massa específica de 2,90 g/cm³ e peneirado de modo a utilizar-se o material passante na peneira 9,5 mm e retido na 4,75 mm.

A adição cristalizante possui, de acordo com o fabricante, a seguinte composição química: cimento; Dihidróxido de cálcio; carbonato de sódio; N-metildietanolamina; fosfato-de-triisobutilo. Com massa específica de 1,45 g/cm³. O teor empregado nos CAT's foi de 1% em relação a massa do aglomerante (recomendação do fabricante).

Na confecção dos concretos, o traço empregado foi 1:2:3:0,5:0,05 (Escória:Areia:Brita:Água:Ativador), sendo acrescentado 1%, em relação à massa de aglomerante, de



adição impermeabilizante nos concretos com adição. Para sua produção, primeiramente, foi elaborada a solução ativadora, misturando a água com o Na(OH), e esperando-a chegar em 23 °C. No caso do material com autocicatrizante, mistura-se a escória com a adição e homogeneiza-se. A mistura foi feita em argamassadeira, seguindo os passos de Perardt (2021): Misturar a escória e adição com a solução ativador em velocidade baixa por 30 segundos; adição gradual do agregado miúdo durante 30 segundos em velocidade baixa; misturar em velocidade alta por 30 segundos; adição gradual do agregado graúdo em velocidade baixa por 30 segundos; misturar em velocidade alta por 30 segundos; descanso de 90 segundos; misturar em velocidade alta por 60 segundos.

A moldagem e adensamento foram realizados conforme a NBR 7215/2019. A cura úmida foi escolhida baseada no trabalho de Langaro (2016). Assim sendo, o material ficou nos moldes por 24 horas, em local com 23 °C, umidade relativa superior a 95% e com a superfície coberta com plástico filme. Em seguida, os corpos de prova foram retirados dos moldes e colocados nas mesmas condições supracitadas, sendo protegidos contra a carbonatação, durante 30 dias, finalizando o processo de cura em 31 dias. Por fim, as amostras foram armazenadas em câmara nas seguintes condições: 23 °C, RH entre 65 e 90% e concentração de CO₂ de 460 ppm.

As medidas da profundidade da carbonatação foram realizadas nos concretos nas idades de 0, 4, 12 e 24 semanas após a cura. A técnica utilizada foi a mesma de Perardt (2021) e consiste em borrifar um indicador ácido-base na superfície recém rompida diametralmente, permitindo a visualização da região carbonatada pela diferença de coloração e assim sua medição com o auxílio do paquímetro. Como solução indicadora usou-se uma mistura de 10 g de fenolftaleína, 700 ml de álcool etílico e 300 ml de água destilada. O indicador tende a ser incolor para regiões com pH inferior a 8,3, acima disso ele fica rosa. Desse modo, regiões carbonatadas ficaram com a cor natural do concreto, enquanto na parte não carbonatada obteve-se coloração rosada. Por fim, optou-se por realizar três medidas, igualmente espaçadas, em cada uma das laterais de ambas as partes do corpo de prova, totalizando 12 medidas, sendo o resultado final a média.

O ensaio de resistência à compressão dos concretos foi realizado nas idades de 7 e 31 dias (pré-carbonatação) e após 4, 12 e 24 semanas de exposição. O rompimento foi executado numa máquina universal de ensaio, marca EMIC, modelo DL-30000 (300 kN), conforme a NBR 7215/2019. Índice de vazios e absorção de água foram feitos logo após a cura e conforme a NBR 9778/2009.

Para a investigação das fases carbonatas no CAT durante o processo de armazenagem, fez uso da técnica de difração de raios X. Para tanto, foram moldadas pastas de CAT com traço: 1:0,45:0,05 (Escória: Água: Ativador), sendo acrescentado 1% da massa do aglomerante nas pastas com adição. A mistura foi feita da mesma maneira que Perardt (2021): Preparar a solução ativadora e misturar a escória com a adição (conforme feito no concreto); adicionar a solução aos materiais secos durante 30 segundos; mistura manual por 30 segundos; descansar 2,5 minutos; mistura manual por 30 segundos. O material é despejado em corpos de prova com dimensões de 3x3x3 cm, cobrindo a superfície com plástico filme e colocando em cura de forma análoga aos concretos. Após a cura, as amostras foram colocadas na mesma câmara que as de concreto (23 °C, RH entre 65 e 90% e concentração de CO₂ de 460 ppm).

Quanto a Difração de Raio X das pastas, essa foi feita após a cura e nas idades de 4, 12 e 24 semanas de exposição. Primeiramente, foi necessário interromper a hidratação, para tanto, seguiu-se os passos de Perardt (2021): Fragmentar a pasta até



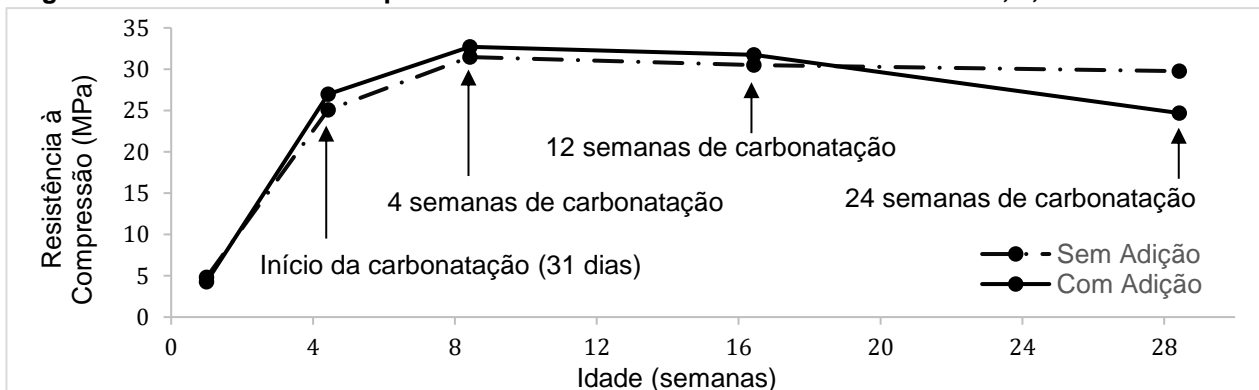
dimensão inferior a 1 cm; imergir em álcool isopropílico durante 2 horas; retirar o álcool das camadas mais profundas através da bomba de vácuo; deixar em estufa durante 24 horas a, aproximadamente, 40 °C; moer o material manualmente até passar pela peneira 150 µm. Em seguida, a Central de Análises da UTFPR – Campus Pato Branco, realizou o ensaio em um equipamento Rigaku Mini Flex 600.

RESULTADOS

Referente ao índice de vazios e absorção de água, determinado antes das amostras serem sujeitas à carbonatação natural, observa-se que o concreto com adição cristalizante obteve os menores valores médios, respectivamente, 15,49% e 6,58%, enquanto as amostras sem adição obtiveram os valores de 16,35% e 7,00%. Assim, foi possível observar uma ligeira melhora da propriedade de permeabilidade propiciada pela adição autocicatrizante, o que indicariam uma menor entrada de CO₂ nas amostras.

A resistência à compressão dos concretos nas idades de 7, 31 (antes da carbonatação) e com 4, 12 e 24 semanas após a cura é apresentado na Figura 1. Percebe-se que não há muita diferença entre os resultados, com exceção da idade de 24 semanas. Ademais, entre 31 dias e 4 semanas, a resistência aumentou de 25,00 MPa para 31,47 MPa no concreto sem adição e 26,97 MPa para 32,71 MPa na amostra com adição. Esse caso divergiu do esperado, pois a expectativa era visualizar a diminuição da resistência devido à carbonatação. Acredita-se que essa situação seja decorrente de uma sobreposição de efeitos: ao mesmo tempo que a carbonatação influenciava de forma negativa a resistência do material, esse ainda não havia atingido sua resistência máxima aos 31 dias, assim, continuou a ganhar resistência até a idade posterior.

Figura 1 – Resistência à compressão dos concretos nas idades de 7 e 31 dias, 4, 12 e 24 semanas.

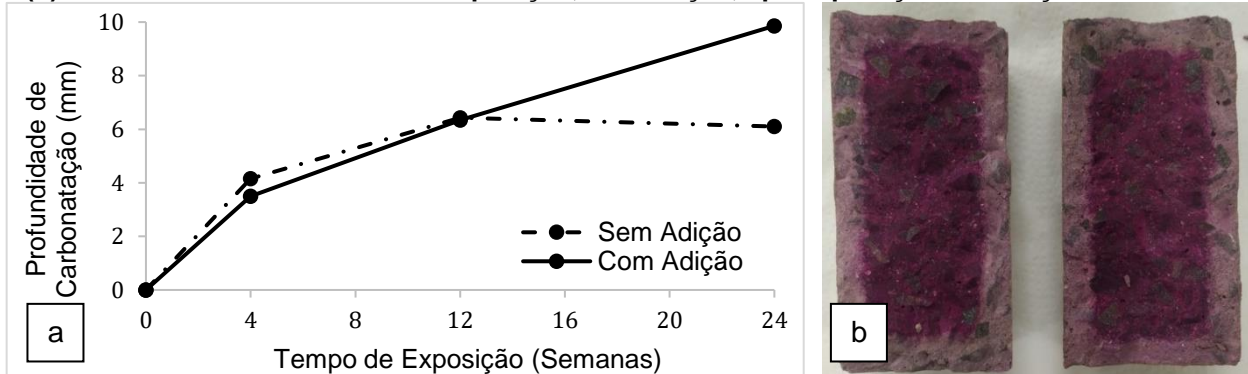


Fonte: Autoria própria.

Nas idades de 4 até 24 semanas, para o caso sem adição, observa-se pouca variação na resistência, uma queda de 1,7 MPa, situação inesperada, uma vez que, após esse período de exposição, pensou-se que devido a carbonatação a resistência diminuiria mais significativamente. Já no concreto com adição, foi possível visualizar esse variação, onde teve-se uma queda de 8,02 MPa entre as idades citadas anteriormente.

Sobre a profundidade de carbonatação, na idade de 31 dias, imediatamente após a cura, não foi observado carbonatação em ambos os materiais. Por outro lado, após 4 semanas, o concreto com adição teve um avanço na profundidade de 3,50 mm, enquanto o material sem adição obteve 4,15 mm, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 – (a) Profundidade de carbonatação nas idades de 0, 4, 12 e 24 semanas de exposição. (b) Amostra com 24 semanas de exposição, sem adição, após aplicação da solução indicadora.

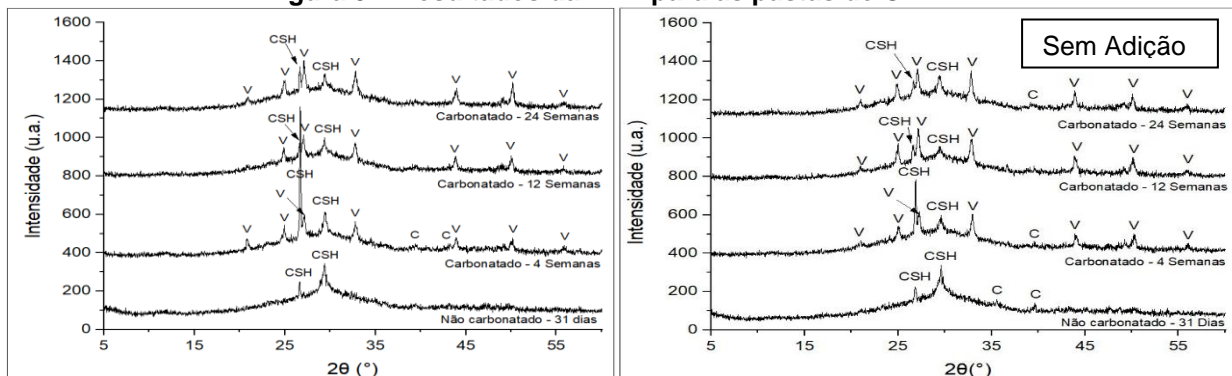


Fonte: Autoria própria.

Na idade de 12 semanas, em ambos os casos se observa um avanço na carbonatação, por outro lado, não houve diferença significativa entre os resultados. Já na idade de 24 semanas, a carbonatação continuou avançando para o concreto com adição, situação não observada no material sem adição. Esses resultados são coerentes com o observado nos ensaios de resistência à compressão, nos quais, o concreto com adição perdeu resistência entre 12 e 24 semanas, o que não ocorre no outro material. Assim sendo, essas circunstâncias indicam que de fato a carbonatação é responsável por diminuir a resistência do material, através, do que tudo indica, do consumo de C-S-H e, conseqüentemente, na geração de carbonato de cálcio, como será mostrado a seguir.

Na figura 3, é apresentada, respectivamente, a DRX das pastas com e sem adição. Na idade não carbonatada, ambos os concretos apresentam difratograma similares, onde se percebe picos de C-S-H próximos as faixas de 27° e 30°. Posteriormente, na idade de 4 semanas de carbonatação, o pico de C-S-H na faixa de 27° aumenta, enquanto o outro diminui e picos de vaterita (V) e calcita (C) surgem. Esses resultados são coerentes com os obtidos nos ensaios de resistência à compressão e carbonatação, nota-se que de fato houve a carbonatação e, conseqüentemente, consumo do C-S-H, porém, também continuou a hidratação e formou-se mais C-S-H, justificando o ganho de resistência nas 4 semanas. Nas idades de 12 e 24 semanas, para o caso sem adição, não se nota diferença significativa nos resultados. Por outro lado, no caso com adição, os picos de vaterita tiveram um leve aumento, enquanto o pico de C-S-H na faixa de 30° diminuiu.

Figura 3 – Resultados da DRX para as pastas de CAT



Fonte: Autoria própria.



CONCLUSÃO

Pode-se concluir que a adição autocicatrizante mostrou uma pequena melhora na resistência à carbonatação do concreto à base de cimento álcali ativado até a idade de 4 semanas, no entanto, na idade final, 24 semanas, o concreto sem adição teve um melhor desempenho. Embora as amostras com adição apresentaram uma profundidade média menor que as sem adição, na idade de 4 semanas, essa diferença não foi suficiente para impactar a resistência à compressão. Acredita-se que esse fato se deve a baixa variação das profundidades de carbonatação entre os dois materiais (0,65 mm). Com exceção do caso de 24 semanas, onde o material com adição obteve menor resistência, ambos os traços tiveram valores similares. Estes dados parecidos vão ao encontro da percepção do discreto efeito da adição no concreto à base de CAT, já que a redução da permeabilidade não foi significativa e ela que seria responsável por dificultar o acesso do CO₂ e, portanto, proteger o concreto da carbonatação. As análises de DRX confirmam a carbonatação das amostras: consumo de C-S-H para a formação de CaCO₃, principalmente na forma de vaterita, além do aumento do pico de C-S-H em outra faixa, na idade de 4 semanas, indicando a continuação do processo de hidratação após a cura de 31 dias.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Araucária pela bolsa de iniciação científica e à Central de Análises da UTFPR/PB pela realização das análises de microestrutura.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia Do Concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013.

LANGARO, E. A. **Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

CADORE, D. É. **Durabilidade de concretos à base de cimento álcali ativado: aspectos relacionados à carbonatação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

CAPPELLESSO, V. G. **Uso de impermeabilizante por cristalização para redução da permeabilidade do concreto**. Dissertação (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

PERARDT, M. **Melhoramento da resistência à carbonatação do cimento álcali ativado por meio de adições sob condições naturais e aceleradas de ensaio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.