

## AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS CONTENDO RESÍDUO DO PROCESSAMENTO DE BRITAGEM

**Thailane de Jesus Chagas dos Santos, Fernanda Nepomuceno Costa**

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia/Laboratório de Materiais de Construção, Rua Rui Barbosa, 710, Centro – 44380-000 – Cruz das Almas-BA, Brasil, thailanesantos@aluno.ufrb.edu.br, fernandacosta@ufrb.edu.br

### Resumo

O processo de carbonatação do concreto é um fenômeno que consiste na reação do dióxido de carbono, presente no ar, dissolvido no interior da fase aquosa dos poros de concreto, com os hidróxidos do cimento hidratado. Com o objetivo de avaliar o desempenho de concretos autoadensáveis (CAA) produzidos com incorporação de resíduo do processamento de britagem, a partir de um traço referencial, foi verificada a degradação dos concretos por meio da ação da carbonatação. Visto que, a ocorrência das reações de carbonatação depende de diversos fatores, como técnicas construtivas, condições ambientais, umidade, tipo de cimento e a relação água-cimento, foram avaliadas variadas formulações de CAA, utilizando areia de britagem, variando de 10 a 25%, em peso, os teores de substituição de areia natural por esses resíduos. Os concretos foram avaliados no estado fresco e no estado endurecido, com avaliação da profundidade de carbonatação por meio de uma câmara em comparação a cura ao ar. Os resultados indicaram o maior avanço da profundidade de carbonatação nos corpos de prova moldados com maior teor de incorporação de areia de britagem.

**Palavras-chave:** Resíduo. Areia de britagem. Sustentabilidade. Valorização. Durabilidade.

**Área do Conhecimento:** Engenharia Civil

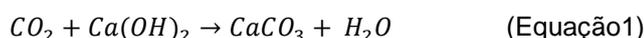
### Introdução

O concreto autoadensável (CAA) teve origem no Japão por volta de 1980, na Universidade de Tóquio, devido à escassez de mão de obra qualificada e a problemas relacionados à durabilidade das estruturas. É capaz de se ajustar às fôrmas de forma autônoma, preenchendo-as sem a necessidade de vibração ou compactação externa de qualquer tipo. Além disso, destaca-se por suas principais propriedades, como fluidez, capacidade de passagem e resistência à segregação (EFNARC, 2005).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2021), as duas propriedades mais importantes do CAA são a trabalhabilidade e a estabilidade. Essas características permitem que o concreto, em seu estado fresco, seja facilmente manuseado e lançado. Assim, o desempenho de qualquer tipo de concreto é crucial, sendo fundamental demonstrar resistência, trabalhabilidade e durabilidade para melhorar a qualidade das peças concretadas e garantir a segurança das obras.

Um dos principais desafios na construção civil é garantir a durabilidade das estruturas de concreto armado. A vida útil e a durabilidade dessas estruturas dependem não apenas das características do concreto e dos métodos de execução, mas, essencialmente, das condições ambientais a que serão expostas (Rebmann, 2011).

Um dos fenômenos que afeta a vida útil e durabilidade das edificações, conforme Silva (2007), é a corrosão das armaduras, sendo uma das manifestações patológicas mais frequentes em estruturas de concreto armado, representando 30% das anomalias identificadas. Um dos principais fatores que favorecem o desenvolvimento da corrosão é a carbonatação. Esse fenômeno reduz o pH da solução nos poros da matriz cimentícia, que, inicialmente, é de cerca de 13. O processo de carbonatação ocorre devido à reação do CO<sub>2</sub> com a portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>) na presença de água, resultando na formação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) (Ribeiro *et al.*, 2018). Esse processo pode ser ilustrado de forma simplificada pela Equação 1 a seguir.



Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é avaliar o desempenho de CAA produzidos com incorporação de resíduo do processamento de britagem em substituição parcial da areia natural (AN), a partir de um traço referência, verificando a degradação dos diferentes concretos por meio da ação da carbonatação.

## Metodologia

### Materiais

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizado no campus de Cruz das Almas. A amostra de CAA foi obtida a partir de um traço de referência fornecido por uma central de concreto situada na região do recôncavo da Bahia, utilizando insumos doados pela própria empresa. O desenvolvimento da pesquisa seguiu quatro etapas principais: i) caracterização e beneficiamento dos materiais; ii) produção dos diferentes traços de concreto; iii) realização de ensaios nos estados fresco e endurecido; iv) coleta e avaliação dos resultados.

Os materiais utilizados (Figura 1) na composição do CAA incluem: cimento Portland CP-V-ARI, fornecido pela Interceмент e fabricado na cidade de Campo Formoso-Ba; areia natural, extraída de uma jazida em Alagoinhas-Ba, e areia de britagem (popularmente chamada de pó de pedra), proveniente de Feira de Santana-Ba, como agregados miúdos; e brita de 12,5 mm, oriunda de pedreira localizada também em Feira de Santana, como agregado graúdo.

A água utilizada é potável, fornecida pelo sistema de abastecimento que atende ao município de Cruz das Almas. Os aditivos empregados são o polifuncional MIRA SET 148, fabricado pela GCP Applied Technologies, e o superplastificante POWERFLOW 1108, produzido pela MC-Bauchemie Brasil.

Figura 1 – Materiais utilizados na produção dos diferentes traços de CAA: (a) Cimento; (b) Areia natural; (c) Brita 12,5 mm; (d) Areia de britagem; (e) Aditivo PF 1108 MC Bauchemie; e (f) Aditivo Mira set 148 GCP.



Fonte: Autores.

### Métodos

Os traços utilizados para a produção dos diferentes tipos de CAA foram selecionados com base no estudo de Brandão (2023), com variações nos teores de AB a partir de um traço de referência (T.REF), disponibilizado pela concreteira, traço T5, com substituição de 5%, em peso, da AN pela AB; traço T7, com substituição de 7%, em peso, da AN pela AB; e no traço T10, com substituição de 10%, em peso, da AN pela AB. Os traços estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição dos traços de CAA utilizados na pesquisa.

Nome do traço	Variações	AN	AB	Brita	AP* (%)	AS** (%)	m (kg/kg)	c (kg/m <sup>3</sup> )	a/c (kg/kg)
T.REF	T.REF	43,4%	10,8%	45,8%	-	-	-	-	-
	Traço unitário	2,12	0,53	2,24	0,03861	0,06047	4,89	372,66	0,53
T5	5,0% de AB	38,4%	15,8%	45,8%	-	-	-	-	-
	Traço unitário	1,88	0,77	2,24	0,03865	0,06054	4,89	373,08	0,53
T7	7,0% de AB	36,4%	17,8%	45,8%	-	-	-	-	-
	Traço unitário	1,78	0,87	2,24	0,03867	0,06057	4,89	373,25	0,53
T10	10,0% de AB	33,4%	20,8%	45,8%	-	-	-	-	-
	Traço unitário	1,63	1,02	2,24	0,03869	0,06062	4,89	373,50	0,53

\*AP = aditivo polifuncional; \*\*AS=aditivo superplastificante. Fonte: Autores.

A relação água/cimento foi mantida constante em 0,53 para todos os traços, seguindo as orientações contidas na NBR 6118 (ABNT, 2023) para a classe de agressividade II (classe moderada), adequada para uso em zonas urbanas, cuja relação a/c deve ser inferior a 0,60.

Os teores de brita foram mantidos iguais em todas as formulações, mantendo-se a relação agregados secos/aglomerantes em massa ( $m=4,89$ ) constante em todos os traços estudados.

Após a produção de cada traço de CAA, foram realizados ensaios de caracterização no estado fresco, seguindo os requisitos contidos na NBR 15823 (ABNT, 2017) e suas partes. Para as avaliações no estado endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm (diâmetro x comprimento), conforme NBR 5738 (ABNT, 2015), para determinação da resistência à compressão axial das amostras de CAA nas idades 7, 14, 21 e 28 dias, sendo duas unidades de CP para cada idade estudada, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018).

Para a avaliação da degradação dos diferentes tipos de CAA, foi realizada a verificação da profundidade de carbonatação de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma ISO 1920-12 (ISO, 2015). Foram moldados dois corpos de prova cilíndricos para carbonatação acelerada e dois para carbonatação natural, todos com dimensões de 100 mm x 200 mm (diâmetro x comprimento), para cada um dos traços de CAA (T-REF, T5, T7 e T10), totalizando 16 amostras. As amostras foram submetidas à cura úmida até completarem 28 dias, sendo então cortadas com uma serra circular em três fatias de 60 mm de altura.

Após o corte, as laterais das fatias de concreto foram seladas com parafina, para garantir que o fluxo de difusão de  $\text{CO}_2$  ocorresse apenas nas superfícies planas superiores e inferiores dos discos (Parente, 2020). As amostras foram mantidas por 14 dias em laboratório, sob umidade relativa do ar de  $(75 \pm 5) \%$  e temperatura ambiente de  $(28 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , conforme ilustrado na Figura 2, para redistribuir a umidade e desobstruir os poros preenchidos com água durante a cura, completando assim 42 dias de idade das amostras. Em seguida, os discos selados foram distribuídos, mantendo-se 24 corpos de prova na câmara de carbonatação acelerada e 24 corpos de prova no lado externo da câmara.

Figura 2 – Sazonamento de corpos de prova cortados.



Fonte: Autores.

Os ensaios de carbonatação foram conduzidos sob temperatura de  $(28 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $(75 \pm 5) \%$ , permanecendo nessas condições por 21 dias. O modelo de câmara utilizado, desenvolvido por Coelho (2016), foi baseado em uma caixa de poliestireno expandido com 400 mm de comprimento, 310 mm de largura, 350 mm de altura interna e espessura das paredes de 30 mm, conforme ilustrado na Figura 3. As avaliações foram realizadas após 7, 14 e 21 dias de exposição.

Após a remoção das amostras da câmara nas datas previamente estabelecidas, os corpos de prova cilíndricos foram submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011). Em seguida, para a medição do avanço da frente de carbonatação, utilizou-se uma solução de fenolftaleína, solução aquosa-alcoólica indicadora de pH. Esta solução continha 1 g de fenolftaleína dissolvida em 100 ml de uma mistura de 70 ml de etanol (álcool etílico) e 30 ml de água deionizada.

Após alguns minutos da aplicação da solução, as amostras foram fotografadas a uma distância constante. Posteriormente, as imagens foram analisadas utilizando o *software* ImageJ, que auxilia na avaliação da área carbonatada.

Figura 3 – Câmara de carbonatação acelerada utilizada na pesquisa.



Fonte: Autores.

## Resultados

As propriedades físicas dos agregados usados na fabricação do CCA estão apresentadas na Tabela 2. Os resultados indicam que a areia de britagem possui um diâmetro máximo característico maior que a areia natural e, conseqüentemente, um módulo de finura superior. De acordo com Metha e Monteiro (2008), quanto maior o módulo de finura, mais graúdo é o agregado.

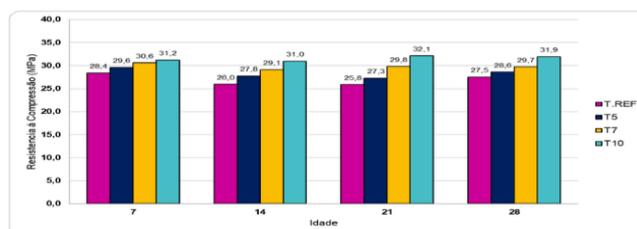
Tabela 2 - Caracterização físicas dos agregados utilizados.

Propriedade	Areia de Britagem	Areia Natural	Brita 12,5 mm
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,73±0,01	2,64±0,01	2,79±0,01
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	1,66±0,0021	1,62±0,0025	1,39±0,0030
Teor de material pulverulento (%)	12,42±0,37	2,19±0,15	0,5±0,11
Dimensão máxima	4,75	2,36	12,5
Módulo de Finura	3,9	2,4	6,62

Fonte: Autores.

Os resultados da resistência à compressão axial dos concretos nas idades 7, 14, 21 e 28 dias estão dispostos na Figura 4. Observa-se em todas as formulações um aumento no valor da resistência à compressão à medida que se aumenta o teor de substituição da AN pela AB, indicando que há um maior empacotamento dos grãos e, por conseqüência, uma maior compacidade nos corpos de prova. Esses resultados sugerem que, do ponto de vista do desempenho mecânico, o aumento no teor de utilização da areia de britagem foi benéfico aos concretos.

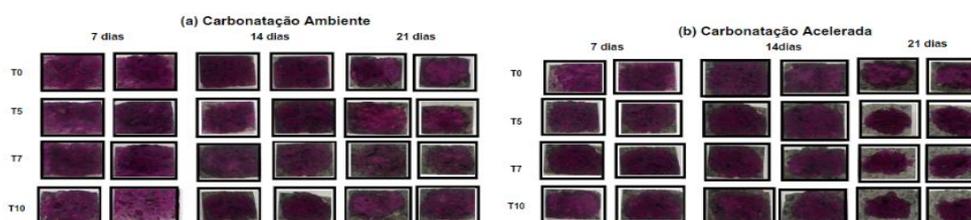
Figura 4 – Resultado de resistência à compressão axial no traço de CAA de referência e nos traços com substituição parcial da AN pela AB.



Fonte: Autores.

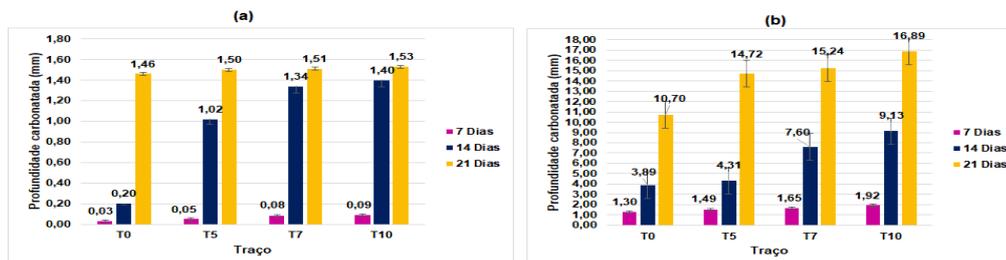
A Figura 5 apresenta imagens dos corpos de prova de CAA utilizados para avaliação da frente de carbonatação e realização das leituras, evidenciando as diferenças nas profundidades de carbonatação entre os quatro traços ao longo de quatro períodos de carbonatação acelerada e quatro idades de carbonatação natural. Já a Figura 6 mostra os resultados dos coeficientes de carbonatação obtidos nos ensaios de carbonatação acelerada e natural, permitindo uma comparação detalhada do comportamento de cada traço ao longo do tempo.

Figura 5 – Visualização da frente de carbonatação nos CP em cura (a) ambiente; e em (b) câmara.



Fonte: Autores.

Figura 6 – Resultados dos coeficientes de carbonatação nos CP em cura (a) ambiente; e em (b) câmara.



Fonte: Autores.

## Discussão

Os resultados de determinação da resistência à compressão dispostos na Figura 4 revelam que, aos 7 dias, independente do teor de areia de britagem utilizado, todas as amostras já apresentaram valores superiores a 25 MPa, resistência característica para o traço de referência, conforme informações da carta-traço disponibilizada pela concreteira. Aos 28 dias, para todos os traços os resultados de resistência foram superiores a 30 MPa.

A análise das médias da profundidade de carbonatação mostra diferenças significativas entre os ensaios realizados em ambiente externo e os realizados em câmara. Observa-se um aumento na profundidade de carbonatação com o tempo de exposição e com o incremento na quantidade de areia de britagem incorporada. Destaca-se que aos 7 dias de idade, a frente de carbonatação é praticamente inexistente nos ensaios realizados em ambiente externo.

O aumento da profundidade da frente de carbonatação pode ser atribuído à maior permeabilidade do concreto com o aumento da quantidade de areia de britagem, permitindo que o CO<sub>2</sub> penetre mais profundamente ao longo do tempo.

## Conclusão

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

- O desempenho mecânico dos CAA a partir das formulações que incorporaram areia de britagem (AB) foi superior ao desempenho do traço de referência, com todas as misturas apresentando resistências superiores a 25 MPa.
- No ensaio de carbonatação acelerada, embora a profundidade de carbonatação tenha sido maior nos traços com maior incorporação de AB em comparação com ao T.REF, as misturas T5, T7 e T10 apresentaram profundidades de penetração abaixo de 25 mm. Esse valor é considerado o mínimo de cobertura do concreto em ambientes urbanos, conforme estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2024).
- A incorporação de areia de britagem em combinação com areia natural demonstra a viabilidade econômica da utilização conjunta desses agregados miúdos, possibilitando a redução dos impactos ambientais associados à extração de areia natural.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823**: Concreto autoadensável - Partes 2 a 5. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2024.

ABNT. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de provas cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

BRANDÃO, M. C. S. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica da incorporação de areia de britagem em substituição parcial da areia natural para a produção de CAA a partir de um traço de uma usina**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2023.

COELHO, V. A. **Desenvolvimento de uma câmara de carbonatação acelerada com obtenção de CO<sub>2</sub> através de reação de dupla troca e controle de umidade**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

COSTA, F. N. **Valorização do resíduo de construção civil por meio de sua incorporação ao processo de clínquerização**. 2020. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

PARENTE, I. M. S. **Parâmetros de durabilidade de compósito sisal-cimento para uso como fôrmas permanentes de vigas de concreto armado**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2020.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; ALMEIDA, F. R.; CUNHA, M.; SOUSA, C.; LOURENÇO, M.; HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle, métodos de análise**. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2018.

SILVA, V. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. 2007. 281. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Estrutura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2021.

### Agradecimentos

Ao grupo de pesquisa em Valorização de Resíduos na Construção Civil da UFRB (Valora Civil), à FAPESB e ao PIBIC, pela bolsa de iniciação científica e apoio à pesquisa. À empresa Massa Fort Concreto pela doação de materiais utilizados nos experimentos.