Influência da areia de britagem no comportamento reológico dos concretos autoadensáveis

BRANDÃO, M. C. dos S. * COSTA, F. N. †

Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

Submitted: 26 fev.2025. **Approved**: 28 fev.2025. **Published**: 08 jun.2025.

Edition: 1ª. **Volume**: 6º.

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) é um tipo especial de concreto, derivado do concreto convencional (CCV), que possui a capacidade de fluir e adensar sem a necessidade de equipamentos externos, preenchendo formas e passando por armaduras, mantendo sua homogeneidade durante todas as etapas de preparação, transporte, lançamento e acabamento. Suas vantagens incluem a redução da mão de obra durante a concretagem, a possibilidade de preenchimento de estruturas esbeltas e a eliminação do ruído provocado pela vibração, permitindo trabalhos noturnos e em proximidade de áreas sensíveis, como escolas. Este estudo avaliou dez traços de concreto formulados a partir de um traço referência, com substituição parcial da areia natural por areia de britagem um resíduo do processamento de rochas graníticas na produção de concretos autoadensáveis, buscando reduzir custos e promover o aproveitamento de resíduos industriais. Os resultados indicaram que as misturas com areia de britagem mantiveram desempenho adequado nos estados fresco e endurecido, seguindo o comportamento do concreto de referência e atendendo aos requisitos das normas técnicas para CAA, configurando uma alternativa viável e sustentável para a produção deste tipo de concreto.

Palavras-chave: Areia de britagem. Resíduo industrial. Sustentabilidade. Substituição de agregados. Concreto autoadensável.

ABSTRACT

Self-Compacting Concrete (SCC) is considered a special type of concrete, derived from conventional concrete (CC). It has the ability to flow and self-consolidate without the need for external compaction, filling formworks and passing through reinforcements while maintaining homogeneity throughout all stages of preparation, transportation, placement, and finishing. Its advantages include reduced labor during pouring, the ability to fill slender structural elements, and the elimination of vibration noise, allowing for nighttime work and construction near sensitive areas such as schools. This study analyzed ten concrete mix designs formulated from a reference mix, evaluating the partial replacement of natural sand with crushed sand a by product of granite rock processing in the production of self-compacting concrete. The goal was to reduce costs and utilize industrial waste. The results showed that mixtures with crushed sand maintained adequate concrete performance in both fresh and hardened states, following the behavior trend of the reference concrete (without waste). These mixtures complied with the technical standards for self-compacting concrete, indicating a viable and sustainable alternative for SCC production.

Keywords: Crushed sand. Industrial waste. Sustainability. Aggregate replacement. Selfcompacting concrete.

Sumário

Sumário 1
Introdução 1
Procedimento Experimental 3
Materiais 3
Método 3
Resultados e Discussões 8
Conclusão 12
Referências 12

INTRODUÇÃO

A incorporação de outros elementos no concreto, como aditivos, adições minerais, pigmentos e fibras e o uso de técnicas de execução diferenciadas, como a cura a altas temperaturas, permite-se a obtenção de concretos de última geração, que poderiam, teoricamente, atender a qualquer solicitação de projeto, permitindo a execução de estruturas esbeltas, duráveis e seguras para o usuário final (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Concretos de alta resistência (CAR), autoadensáveis (CAA), de alto desempenho (CAD) e reforçado com fibras (CRF) são exemplos de misturas que trazem avanços para a construção civil, tanto pelas propriedades no estado fresco e endurecido, quanto pelo aspecto econômico, devido ao aumento da durabilidade da estrutura

* Medson Clinton dos Santos Brandão.
† Fernanda Nepomuceno Costa.

ISSN: 2763-8855
RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

(CHRIST; TUTIKIAN; HELENE, 2022).

Na tentativa de atender diversas exigências, foi desenvolvido o concreto autoadensável (CAA), que é considerado um grande avanço na construção civil, sendo primeiramente apresentado pelo professor Hajime Okamura, da Universidade de Tecnologia de Kochi, no Japão, na década de 80. Ao longo dos anos, o concreto autoadensável (CAA) tem sido amplamente reconhecido como o desenvolvimento mais avançado e inovador no campo da tecnologia do concreto (BADGUJAR; DWIVEDI, 2022).

A NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) descreve o CAA como o concreto capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento. Para a *European Federation of National Associations Representing for Concrete* (2002) uma mistura de concreto só poderá ser classificada como autoadensável se apresentar as seguintes propriedades básicas: capacidade de preenchimento, capacidade de escoamento e resistência a segregação.

Essa variação do concreto apresenta diversas vantagens em relação ao concreto convencional. Conforme Tutikian e Molin (2021), o CAA é descrito como umas grandes revoluções ocorridas na tecnologia do concreto para a construção nas últimas décadas, possibilitando vários ganhos, diretos e indiretos, entre os quais: acelera a construção, já que seu lançamento é muito rápido e dispensa o adensamento; reduz a mão de obra no canteiro, por eliminar a vibração e facilitar o espalhamento e o nivelamento do concreto; melhora o acabamento final da superfície; pode aumentar a durabilidade por ser mais fácil de adensar, evitando falhas de concretagem e grandes vazios resultantes de má vibração; torna o local de trabalho mais seguro, em função da diminuição do número de trabalhadores; permite obter um ganho ecológico, por poder utilizar em sua composição altos teores de resíduos industriais, como a cinza volante, a escória alto forno ou a cinza de casca de arroz; pode reduzir o custo final da estrutura, se computados economicamente todos os ganhos citados.

Devido às suas diversas vantagens, o concreto autoadensável vem sendo amplamente utilizado nas construções dos chamados "*Super-tall buildings*", que significa edifícios super altos (NEHDI, 2013). Uma aplicação emblemática no mundo da utilização do CAA como solução aos desafios impostos na construção foi no edifício Burj Khalifa, prédio mais alto do mundo, com 830 metros de altura, inaugurado em Dubai em 2010. Os engenheiros responsáveis pela obra optaram pela utilização do concreto autoadensável para a construção das quatro fundações que sustentam o edifício, sendo utilizados $12.500\ m^3$ de CAA para a concretagem destas fundações (BAKER; PAWLIKOWSKI; YOUNG, 2009).

Do ponto de vista reológico, o comportamento do CAA pode ser compreendido pelo modelo de Bingham (ROUSSEL; NGUYEN; COUSSOT, 2005), uma classificação amplamente aceita pela maioria dos autores. Esse fluido é caracterizado por dois parâmetros: a viscosidade plástica e a tensão de cisalhamento (TUTIKIAN; MOLIN, 2021). O CAA apresenta alta fluidez sem segregação, graças à baixa tensão de cisalhamento e à alta viscosidade, quando comparado ao CCV.

A viscosidade plástica e a tensão de cisalhamento do concreto são propriedades diretamente influenciadas pela sua composição, especialmente pela relação água-cimento e pela dosagem de superplastificante. A viscosidade plástica é conferida pelo aditivo superplastificante e pela água de amassamento, enquanto a tensão de cisalhamento resulta da ação dos materiais finos, incluindo o cimento (TUTIKIAN; MOLIN, 2021). Contudo, embora a água aumente a fluidez do concreto reduzindo significativamente sua viscosidade, o superplastificante proporciona maior trabalhabilidade com uma diminuição desprezível da viscosidade (OKAMURA, 1997).

Considerando que o cimento é um componente essencial para essas propriedades reológicas, seu crescente consumo global ressalta a necessidade de otimização das dosagens no concreto. A cada ano, a demanda por cimento na produção de concretos continua a aumentar, refletindo a expansão da construção civil (RUSLAN et al., 2022). Estima-se que a produção mundial ultrapasse 4 bilhões de toneladas anuais até 2040 (MCDONALD; GLASSER; IMBABI, 2019), o que reforça a importância de estudos que busquem eficiência no uso desse material, como a avaliação de substitutos parciais ou ajustes reológicos para reduzir impactos ambientais e custos.

Depois da água, a areia é o segundo recurso natural mais explorado e utilizado globalmente (SONNA et al., 2022), por ser muito versátil, podendo ser empregada na indústria da construção, na fabricação de esquadrias e também utilizada em componentes eletrônicos. Entre estas aplicações, o setor da construção, particularmente no contexto da produção de concreto, continua a ser o setor com maior procura de areia (PEDUZZI, 2014).

De acordo com Silva, Buest e Campiteli (2005), assim como nos concretos tradicionais, o concreto autoadensável também utiliza agregados miúdos, em geral,

ISSN: 2763-8855
RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

areia natural em sua composição. No entanto, a utilização de areia natural na produção de concretos e argamassas tem se tornado uma questão problemática. Isso ocorre devido ao alto custo envolvido no seu processo de extração e, principalmente, aos diversos impactos ambientais que acarreta. A demanda por areia natural é bastante elevada nos países em desenvolvimento devido ao crescimento rápido da infraestrutura que resulta da escassez de abastecimento (BENABED, 2018).

Essa escassez, atrelada a diversos fatores, vem levando a busca por agregados em regiões cada vez mais afastadas dos centros urbanos, onerando o valor final da areia natural (FERREIRA; JUNIOR, 2013).

Uma solução para reduzir o consumo de areia natural é a substituição parcial desta pela areia de britagem (AB) que, assim como os finos de rocha, é um resíduo proveniente da produção de britas, comumente disposto nos pátios das pedreiras (SIQUEIRA, 2020). O uso da areia de britagem só traz benefícios ao meio ambiente, pois os resíduos gerados da britagem de rochas, para a produção de agregados ao concreto são raramente utilizados, constituindo-se em um problema ecológico devido à dispersão destes pelo vento e pelas águas (KLEIN, 2008).

Observa-se, então, que a incorporação deste material em substituição parcial à areia natural resulta em benefícios econômicos e ambientais, uma vez que reduz a extração da areia natural, promove um destino adequado ao resíduo e diminui o custo com transporte, já que as pedreiras estão normalmente localizadas mais próximas dos principais centros de consumo de concreto e argamassa do que as jazidas de areia natural (ALMEIDA; SAMPAIO, 2002; KLEIN, 2008; ILANGOVANA; MAHENDRANA; NAGAMANIB, 2008; YAMEI; LIHUA, 2017).

A incorporação de finos pode, também, aumentar a resistência à segregação e a habilidade passante das misturas e, assim, resultar em matrizes mais homogêneas. Isso se dá pelo aumento da viscosidade, que acabam por garantir melhor distribuição de agregados no interior da mistura e auxiliar na passagem das formulações por barreiras físicas como as armaduras (ELYAMANY; ELMOATY; MOHAMED, 2014; SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016).

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a incorporação da areia de britagem (AB) em substituição parcial à areia natural (AN) na produção de concretos autoadensáveis, utilizando um traço referencial fornecido por uma empresa que comercializa concretos em cidades do recôncavo da Bahia.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

MATERIAIS

Os materiais empregados na pesquisa incluíram cimento *Portland* CP V-ARI, o qual possui massa especifica de $3,1369 \pm 0,025\ kg/dm^3$; areia natural com módulo de finura de $2,40\ mm$ e massa específica de $2,64 \pm 0,010\ kg/dm^3$; areia de britagem com módulo de finura de $3,90\ mm$ e massa específica de $2,73 \pm 0,010\ kg/dm^3$; brita $12,5\ mm$ com massa específica de $2,79 \pm 0,025\ kg/dm^3$; água fornecida pela rede de abastecimento local, além de dois aditivos, *PowerFlow* 1108 da MC-Bauchemie, que é um superplastificante sintético baseado na tecnologia de polímeros policarboxilatos com densidade $1,08\ kg/L$, sendo um aditivo redutor de água tipo 2 (RA2) e o segundo aditivo o Mira Set 148 da GCP Applied Technologies, aditivo redutor de água com densidade $1,105 \pm 0,20\ kg/L$ tipo RA1-R. Todos esses materiais foram armazenados no Laboratório de Materiais de Construção da UFRB, em recipientes com tampa, onde os experimentos foram realizados. A doação desses materiais foi feita por uma empresa que comercializa concreto usinado, localizada na região do recôncavo da Bahia.

A caracterização dos agregados foi baseada na NBR 7211 (ABNT, 2022b), sendo realizados os seguintes ensaios: distribuição granulométrica, de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022a); massa específica dos agregados miúdos NBR 16916 (ABNT, 2021a) e massa específica do agregado graúdo NBR 16917 (ABNT, 2021b); massa unitária conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021c) para os agregados miúdos e graúdo; e o teor de pulverulento utilizando o método de lavagem, segundo a NBR 16973 (ABNT, 2021d).

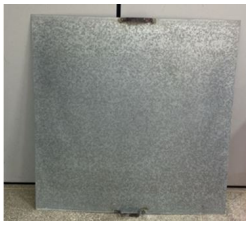
Para o cimento *Portland* foram utilizados resultados de pesquisas anteriores (COSTA, 2020), pois o laboratório da UFRB no campus de Cruz das Almas não dispõe de equipamentos para caracterização de aglomerantes.

MÉTODO

Tendo em vista que o laboratório da UFRB não dispunha de equipamentos para avaliar o CAA no estado fresco, conforme indicam as normas NBR 15823-2 (ABNT, 2017b), NBR 15823-3 (ABNT, 2017c), NBR 15823-4 (ABNT, 2017d) e NBR 15823-5 (ABNT, 2017e), foi necessária a elaboração dos projetos para a construção dos equipamentos em material metálico, conforme ilustram a Figura 1, a Figura 2, a Figura 3, a Figura 4 e a Figura 5.

ISSN: 2763-8855
RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

Figura 1 – Placa metálica ($100 \times 100\ cm^2$) utilizada para o ensaio de espalhamento (*Slump Flow Test*).

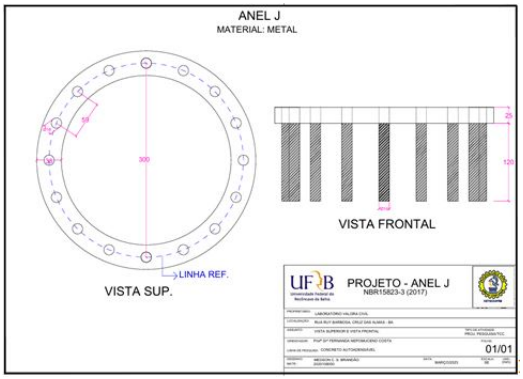


Fonte: Os Autores.

Com o propósito de examinar o comportamento e o desempenho do CAA com diferentes proporções de substituição da AN pela AB, foram conduzidas dez formulações a partir do traço de referência (T_{REF}) comercializado na Bahia como traço $25\ \mathrm{MPa}$ e com espalhamento (*Slump Flow* - SF) no estado fresco de $660\ mm$ (C25 - SF_2).

A variação das formulações estudadas foi realizada com aumentos de 1% no traço unitário da AB e redução de 1% na AN, mantendo a mesma relação m (relação agregado seco/aglomerante em massa).

Figura 2 – Anel J

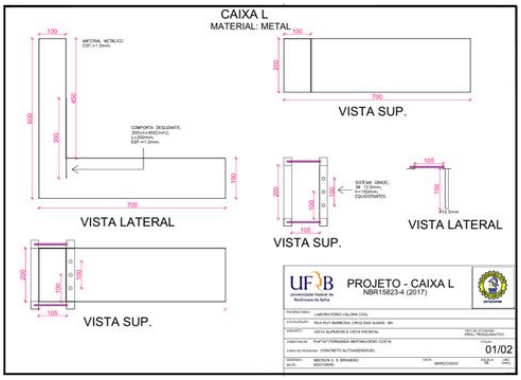


(a) Projeto para confecção do Anel J, com vistas superior e frontal

(b) Anel J

Fonte: Os Autores.

Figura 3 – Caixa L

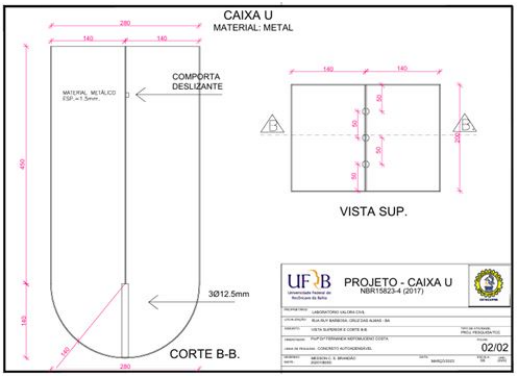


(a) Projeto para confecção da Caixa L

(b) Caixa L, confeccionada em metal, conforme o projeto.

Fonte: Os Autores.

Figura 4 – Caixa U



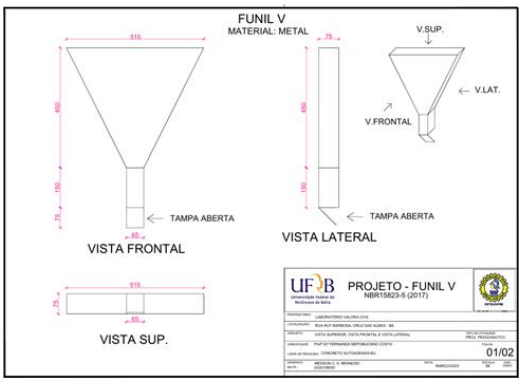
(a) Projeto para confecção da Caixa U;

(b) Caixa U finalizada, confeccionada em metal.

Fonte: Os Autores.

ISSN: 2763-8855
RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

Figura 5 – Funil V



(a) Projeto para confecção do Funil V;

(b) Funil V finalizado, confeccionado em metal.

Fonte: Os Autores.

O consumo de cimento *Portland* foi calculado de acordo com a Equação 1, tendo o fator água/cimento ($^{a}/_{c}$) fixado para todos os traços analisados.

$$C = \frac{1.000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{ab}{\gamma_{ab}} + \frac{b}{\gamma_b} + {}^{a}/_{c}} \quad (1)$$

onde:

- c : consumo de cimento *Portland*;
- γ_c : densidade do cimento *Portland*;
- γ_a : densidade da AN;
- γ_{ab} : densidade AB;
- γ_b : densidade da brita $12,5\ mm$;
- $^{a}/_{c}$ = fator água cimento;
- a : traço unitário da AN;
- ab : traço unitário da AB;
- b : traço unitário da Brita $12,5\ mm$.

A quantidade de aditivo foi mantida a mesma para todos os traços, sendo utilizado aditivo Miraset 148 ($0,41\%$ da massa de CP V-ARI) e PF1108 ($0,65\%$ da massa de CP V-ARI).

A composição dos traços é apresentada na Tabela 1, mostrando o traço referência (T_{REF}) e os traços com diferentes proporções de substituição dos agregados. Observa- se que, com essas formulações, a quantidade de cimento varia de $372,66\ kg/m^3$, partindo do traço de referência (T_{REF}), e chegando a $373,50\ kg/m^3$ (T_{10}), ao substituir 10% da AN pela AB. Isso representa um pequeno acréscimo de $0,84\ kg$ de cimento para cada m^3 de concreto, devido à diferença de valor da massa específica entre a areia de britagem e a areia natural, enquanto a quantidade de brita de $12,5\ mm$ permaneceu constante.

Como dito anteriormente, o fator água/cimento foi mantido constante, adotando $^{a}/_{c} = 0,56$ para todos os traços, seguindo as exigências da NBR 6118 (ABNT, 2023) para a classe de agressividade II (classe moderada), para uso em zona urbana, cuja relação $^{a}/_{c}$ deve ser menor que $0,60$.

Os ensaios para avaliar o comportamento do concreto autoadensável no estado fresco seguem a norma de concreto autoadensável NBR 15823 (ABNT, 2017a). Neste estudo, foram realizados os ensaios para verificação do espalhamento (*Slump Flow Test*); viscosidade plástica aparente sob fluxo livre (t_{500}) e viscosidade plástica aparente sob fluxo confinado (Funil V); índice de estabilidade visual (IEV); habilidade passante sob fluxo livre (Anel J) e confinado (Caixa U e Caixa L); além da moldagem de corpos de prova cilíndricos, com dimensões de $10 \times 20\ cm^2$ (diâmetro $\times$ altura), para posterior utilização dos resultados de resistência à compressão nas análises de desempenho no estado endurecido.

No ensaio de espalhamento (*Slump Flow* - SF), segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), a medida do espalhamento fornece indicações da fluidez do CAA e da sua habilidade de preenchimento. O SF é a média de duas determinações (em milímetro) do espalhamento da amostra estudada. Com o resultado do espalhamento, o concreto é classificado, seguindo as classes indicadas na NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), relacionando-as com suas aplicações. As classes de espalhamento do CAA estão apresentadas na Tabela 2. Este é o ensaio mais utilizado para analisar a fluidez e a existência de segregação no CAA, sendo que por meio deste ensaio tem-se uma medida do espalhamento do material, o qual indica se o concreto se encontra muito fluido ou muito coeso (SIQUEIRA, 2020).

O IEV, segundo a NBR 15823-2 (ABNT, 2017b), é o índice de estabilidade visual, determinado visualmente pela análise do concreto imediatamente após o término do escoamento (SF). Deve-se observar e registrar fotograficamente a distribuição dos agregados graúdos na mistura, a distribuição da fração de argamassa ao longo do perímetro e a ocorrência de exsudação. A Tabela 3 mostra a classe para cada IEV.

A viscosidade plástica aparente do concreto

ISSN: 2763-8855
RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

Tabela 1 – Composição dos traços de CAA estudados.

NOME DO TRAÇO	VARIAÇÕES	Areia natural	Areia de britagem	BRITA $(12,5\ mm)$	m (kg/kg)	c (kg/m^3)	a/c (kg/kg)
T_{REF}	T_{REF}	43,4%	10,8%	45,8%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	2,12	0,53	2,24	4,89	372,66	0,56
T_1	1,0%	42,4%	11,8%	45,8%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	2,07	0,58	2,24	4,89	372,72	0,56
T_2	2,00%	41,4%	12,8%	45,8%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	2,02	0,63	2,24	4,89	372,80	0,56
T_3	3,0%	40,4%	13,8%	45,80%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	1,98	0,67	2,24	4,89	372,89	0,56
T_4	4,0%	39,4%	14,8%	45,80%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	1,93	0,72	2,24	4,89	372,99	0,56
T_5	5,0%	38,4%	15,8%	45,8%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	1,88	0,77	2,24	4,89	373,08	0,56
T_6	6,0%	37,4%	16,8%	45,8%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	1,83	0,82	2,24	4,89	373,16	0,56
T_7	7,0%	36,4%	17,8%	45,8%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	1,78	0,87	2,24	4,89	373,25	0,56
T_8	8,0%	35,4%	18,8%	45,8%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	1,73	0,92	2,24	4,89	373,33	0,56
T_9	9,0%	34,4%	19,8%	45,8%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	1,68	0,97	2,24	4,89	373,42	0,56
T_{10}	10,0%	33,4%	20,8%	45,8%	-	-	-
	TRAÇO UNITÁRIO	1,63	1,02	2,24	4,89	373,50	0,56

Fonte: Os autores

Tabela 2 – Ensaio de espalhamento e as aplicações por classe.

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo
SF_1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos. Estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal do CAA.	Lajes, estacas e certas fundações profundas.
SF_2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes.	Paredes, vigas, pilares e outras.
SF_3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de dimensões (menor que $12,5\ mm$).	Pilares-parede, paredes-diafragma.

Fonte: Adaptado da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

ISSN: 2763-8855
RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

(t_{500} e Funil V) é uma propriedade relacionada à consistência da mistura (coesão) e influência na resistência do concreto ao escoamento. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior é sua resistência ao escoamento. De acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), a determinação da viscosidade plástica aparente do concreto é importante quando se requer um bom acabamento superficial ou quando a densidade de armadura é expressiva. O CAA com baixa viscosidade apresenta um rápido espalhamento, porém curta duração; por outro lado, o CAA com alta viscosidade pode continuar a se mover de forma lenta e progressiva por um período maior. Isso pode ser avaliado igualmente pela medida do t_{500} (fluxo livre) realizado durante o ensaio de espalhamento conforme a NBR 15823-2 (ABNT, 2017b), ou pelo tempo medido no ensaio do Funil V (fluxo confinado) conforme a NBR 15823-5 (ABNT, 2017e).

A NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) define a capacidade do concreto autoadensável de fluir dentro da fôrma, passando entre os embutidos (eletrodutos, caixas de luz, espaçadores plásticos), sem obstrução do fluxo ou segregação. A resistência à segregação é definida como a capacidade do concreto de manter sua composição homogênea durante as etapas de transporte, lançamento e acabamento, conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a). A habilidade passante sob fluxo livre consiste em posicionar o Anel J no centro da placa base e posicionar o cone de Abrams de forma invertida, no centro do anel.

Em seguida, procede-se ao preenchimento do cone com concreto autoadensável de forma contínua e a desmoldagem deve ser feita com velocidade constante. Após o escoamento do concreto, faz-se a média entre duas medidas (jF) perpendiculares. O cálculo do PJ Equação 2 é a diferença entre o diâmetro médio de espalhamento (*Slump Flow Test*) e o espalhamento com o Anel J (jF), a classificação apresentada conforme a Tabela 4.

$$\mathrm{PJ} = \mathrm{SF} - \mathrm{jF}. \tag{2}$$

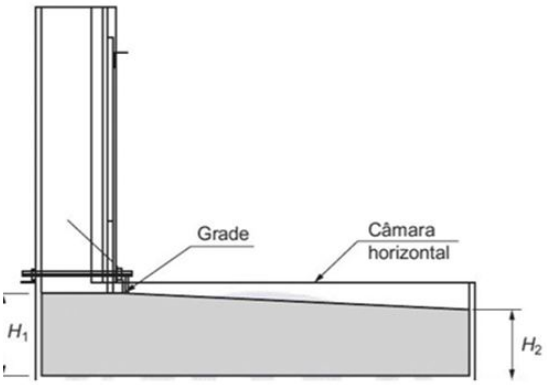
Tabela 4 – Classe da habilidade passante sob fluxo livre.

Classe	**Anel J** (mm)	**Método de ensaio**
PJ_1	0 a 25 com 16 barras de aço	ABNT NBR 15823-3
PJ_2	25 a 50 com 16 barras de aço	

Fonte: Adaptado da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a)

A habilidade passante sob fluxo confinado (Caixa L e Caixa U) mede a fluidez do concreto simultaneamente com a habilidade desse de passar por obstáculos, permanecendo coeso. O equipamento consiste em uma caixa em forma de "L", com uma porta móvel separando a parte vertical da horizontal e, junto com a divisória, barras de aço, que simula a armadura real da estrutura de concreto armado, criando um obstáculo à passagem do concreto (TUTIKIAN; MOLIN, 2021). A classe da habilidade passante sob fluxo confinado é a dada por H_2/H_1, conforme Figura 6 e a classificação conforme a Tabela 5.

Figura 6 – Corte lateral da Caixa L, mostrando a posição da grade, a câmara horizontal e as alturas H_1 e H_2.



Fonte: NBR 15823-4 (ABNT, 2017d).

Tabela 5 – Classe da habilidade passante sob fluxo confinado Caixa L.

Classe	Caixa L (H_2/H_1)	Método de ensaio
PL_1	$\geq$ 0,80 com duas barras de aço.	ABNT NBR 15823-4
PL_2	$\geq$ 0,80 com três barras de aço.	

Fonte: Adaptado da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

A Caixa U, composta por perfil em formato de "U", possui uma comporta que permite a passagem do CAA por barras de aço, de forma similar a Caixa L. A Equação 3 define o PU - a habilidade passante sob fluxo confinado (Caixa U) e que está apresentada na Tabela 6.

$$\mathrm{PU} = H_2 - H_1. \tag{3}$$

Tabela 6 – Classe de habilidade passante sob fluxo confinado utilizando a Caixa U.

Classe	**Caixa U** $(H_2 - H_1)$	**Método de ensaio**
PU	$\leq 30\ mm$	ABNT NBR 15823-4

Fonte: Adaptado da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

Após a realização dos ensaios no estado fresco, são realizados os procedimentos para os ensaios no estado endurecido. Para a moldagem e cura dos corpos de

ISSN: 2763-8855
RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

Tabela 3 – Classe do Índice de Estabilidade Visual.

Classe	Comportamento	Descrição
IEV_0	Altamente estável	Sem evidencia de segregação ou exsudação.
IEV_1	Estável	Sem evidencia de segregação e leve exsudação.
IEV_2	Instável	Presença de pequena auréola de argamassa ($\leq 10\ mm$) e/ou empilhamento de agregados no centro do CAA.
IEV_3	Altamente Instável	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa $> 10\ mm$).

Fonte: Adaptado da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

prova foram seguidas as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo utilizadas fôrmas metálicas cilíndricas ($10 \times 20\ cm^2$) e moldados 9 exemplares para cada traço de CAA. Para facilitar a desforma, foi usado desmoldante na parte interna das fôrmas. Em seguida, os exemplares foram colocados em cura submersa em um reservatório com água saturada com cal.

O procedimento empregado para determinar a resistência à compressão axial seguiu as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018). Os ensaios foram conduzidos nas idades de 1, 7 e 28 dias, com a moldagem de 3 corpos de prova para cada idade. Utilizou-se a máquina de ensaio da *Time Group Inc.*, modelo YAM-2000D, com capacidade para 200 toneladas, aplicando uma carga constante de $0,50\ \text{MPa}/s$, seguindo o que determina o item 5.6 ($0,45 \pm 0,15\ \text{MPa}/s$) da NBR 5739 (ABNT, 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As principais propriedades físicas dos agregados utilizados na produção dos diferentes traços de CAA estão apresentadas na Tabela 7. Os resultados indicam que a areia de britagem possui diâmetro máximo característico dos grãos maior que a areia natural e, consequentemente, um maior módulo de finura. Observa-se que a areia de britagem possui um maior teor de material pulverulento, o que também justifica uma maior demanda de água na mistura à medida que se aumenta o teor de substituição da AN pela AB.

A Tabela 8 mostra a caracterização do cimento *Portland* CP V-ARI, que foi produzido na mesma fábrica do cimento utilizado por Costa (2020). Tem-se que o cimento possui a maior massa específica dentre todos os materiais utilizados na produção do CAA.

Tabela 8 – Caracterização do cimento *Portland* CP V-ARI.

Cimento	**CP V-ARI**
Massa específica (kg/dm^3)	$3,1369 \pm 0,0023$
Área superficial Blaine (cm^2/g)	$3.716,00$
Área superficial BET (cm^2/g)	$13.193,00$
$\mathbf{D_{50}}$ (μm)	$15,7$
$\mathbf{D_{90}}$ (μm)	$40,1$

Fonte: (COSTA, 2020).

Figura 7 – Ensaios

(a) Ensaio de espalhamento (SF) para avaliar a fluidez do CAA;

(b) Ensaio do Anel J para verificar a habilidade passante do CAA sob fluxo livre.

Fonte: Os Autores.

ISSN: 2763-8855
RECT Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

Tabela 7 – Resultados da caracterização dos agregados.

Propriedade	Areia de britagem	Areia natural	Brita
Massa específica (kg/dm^3)	$2,73 \pm 0,010$	$2,64 \pm 0,010$	$2,79 \pm 0,025$
Massa unitária (kg/dm^3)	$1,66 \pm 0,0021$	$1,62 \pm 0,0025$	$1,39 \pm 0,0030$
Teor de material pulverulento $(\%)$	$12,42 \pm 0,37$	$2,19 \pm 0,15$	$0,5 \pm 0,11$
Dimensão máxima (mm)	$4,75$	$2,36$	$12,50$
Módulo de finura	$3,90$	$2,40$	$6,62$

Fonte: Os Autores.

Figura 8 – Ensaio para verificar a viscosidade plástica aparente sob fluxo confinado.

Fonte: Os Autores.

Figura 9 – Realização de ensaios para avaliar a habilidade passante sob fluxo confinado com,

(a) a Caixa L;

(b) a Caixa U.

Fonte: Os Autores.

Com a caracterização dos materiais utilizados nas diferentes formulações do CAA, a etapa seguinte foi a realização das misturas. Após a produção de cada traço de concreto autoadensável estudado, foram realizados ensaios para avaliar suas propriedades no estado fresco, permitindo analisar a capacidade de fluir livremente sem segregação, para se determinar a classe de espalhamento dos concretos, viscosidade plástica aparente (t_{500}) e a habilidade de passagem sob fluxo livre utilizando o método do Anel J Figura 7.

Em seguida, foi determinada a viscosidade plástica aparente sob fluxo confinado utilizando o ensaio do Funil V, conforme Figura 8, em todos os traços estudados. Em continuação, foi analisada a habilidade passante sob fluxo confinado por meio da Caixa L e da Caixa U, como mostra a Figura 9.

Para o ensaio da Caixa L, todos os concretos obtiveram a mesma classificação; já na avaliação da habilidade passante sob fluxo confinado por meio da Caixa U apenas os traços T_7, T_8 e T_9 apresentaram valores dentre os parâmetros estabelecidos pela NBR 15823-4 (ABNT, 2017d). Segundo Felekoglu (2007), finos de pedreira de origem calcária aumentam a viscosidade do concreto autoadensável, melhorando a estabilidade das misturas e reduzindo a segregação dos materiais constituintes, sendo considerados excelentes modificadores de viscosidade.

A Tabela 9 resume os resultados de todos os ensaios no estado fresco, identificando cada traço e as características encontradas. Ao comparar o desempenho dos traços T_1 ao T_{10} com o traço de referência, percebe-se a partir dos resultados coletados que a incorporação da areia de britagem (AB) junto aos finos de rocha graníticas (FRG) melhora a reologia dos concretos estudados.

A partir dos resultados encontrados por meio dos ensaios no estado fresco, classificam-se os concretos produzidos nas 10 formulações além do concreto de referência, conforme Tabela 10. Quanto à classe de espalhamento (Slump Flow Test), todas as amostras apresentaram características para ser enquadradas na mesma classe de espalhamento SF_2, o que permite sua utiliza-

ISSN: 2763-8855
RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

Tabela 9 – Resultados dos ensaios no estado fresco nos diferentes traços de CAA.

Traço	**Espalhamento** (mm)	t_{500} (s)	IEV	**Anel J** (mm)	**Caixa L** (H_2/H_1)	**Caixa U** (H_2-H_1)	**Funil V** (s)
T_{REF}	665	1,87	0	530	0,85	40	7,8
T_1	670	1,69	0	580	0,84	37	8,0
T_2	680	1,65	0	610	0,86	35	7,8
T_3	680	1,45	0	610	0,86	38	7,7
T_4	690	1,61	0	610	0,84	40	7,5
T_5	680	1,53	0	570	0,83	45	7,8
T_6	675	1,65	0	625	0,85	40	7,5
T_7	690	1,58	0	600	0,86	18	6,5
T_8	660	1,40	0	620	0,87	24	7,0
T_9	660	1,50	0	610	0,85	16	6,8
T_{10}	680	1,57	0	600	0,84	37	7,5

Fonte: Os Autores.

ção em diversas aplicações, como concretagem de paredes estruturais, vigas e pilares. A classe de viscosidade sob fluxo livre (t_{500}) e fluxo confinado (Funil V) também permaneceu constante, apresentando o melhor desempenho possível para a fluidez do CAA. Todas as amostras demonstraram alta estabilidade visual (IEV $=$ 0), mantendo-se homogêneas e sem segregação ou exsudação.

Os ensaios de habilidade passante sob fluxo livre (Anel J) mostraram desempenho satisfatório apenas para os traços T_6, T_8 e T_9, resultando em concretos com propriedades de habilidade passante sob fluxo livre superiores, adequados para concretagens em elementos estruturais com espaçamento de 80 a 100 mm, conforme o item A.2.3 da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

A habilidade passante sob fluxo confinado pela Caixa L apresentou o melhor desempenho possível para todas as amostras, indicando que os traços podem ser utilizados em concretagens de vigas, pilares, tirantes e peças pré-moldadas. Além disso, é possível realizar concretagens em elementos estruturais com espaçamentos entre 60 e 80 mm, conforme a Tabela A.3 da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

Para a Caixa U, os traços T_7, T_8 e T_9 mostraram bom desempenho, indicados por esse ensaio estarem aptos para concretagens de elementos estruturais com espaçamentos entre 60 e 80 mm, sendo este ensaio opcional, segundo (TUTIKIAN; MOLIN, 2021).

A avaliação de desempenho dos concretos no estado endurecido, realizada a partir dos ensaios para a determinação da resistência à compressão axial, encontram-se na Figura 10. Observa-se que para a idade de 1 dia, todas as amostras obtiveram resultados superiores a 12 MPa e, para a idade de 28 dias, os concretos apresentaram resultados superiores a 30 MPa, um valor superior ao da resistência característica à compressão do concreto f_{ck} de 25 MPa, projetado para o traço referência desse CAA industrializado. Pode-se atribuir essa elevada resistência aos 28 dias à margem de segurança ao comercializar esse concreto.

Então, observou-se que todas as formulações tiveram resultados de resistência à compressão acima de 25 MPa, resistência planejada para o traço de referência, como dito anteriormente, e espalhamento classificado como SF_2 para todos os traços de CAA ensaiados.

Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente, por meio da análise de variância (ANOVA), sendo apresentados na Tabela 11. A análise indicou que a resistência à compressão para as idades de 1, 7 e 28 dias com a substituição parcial de areia de britagem nos traços estudados de CAA não são estatisticamente distintas para o nível de significância de 5%.

Tabela 11 – Confiança estatística para a resistência à compressão dos concretos produzidos com substituição parcial de areia natural por areia de britagem, por meio de análise de variância (ANOVA).

Idade (dias)	SS[1]	MS[2]	F-Value[3]	P-Value[4]
1	86,60273	8,66027	1,41287	0,28901
7	104,66818	10,46682	0,94261	0,53324
28	99,87091	9,98709	2,16961	0,10997

[1] Soma Quadrada;
[2] Média Quadrada;
[3] Valor calculado de F;
[4] Valor do modelo teste.

Fonte: Os Autores.

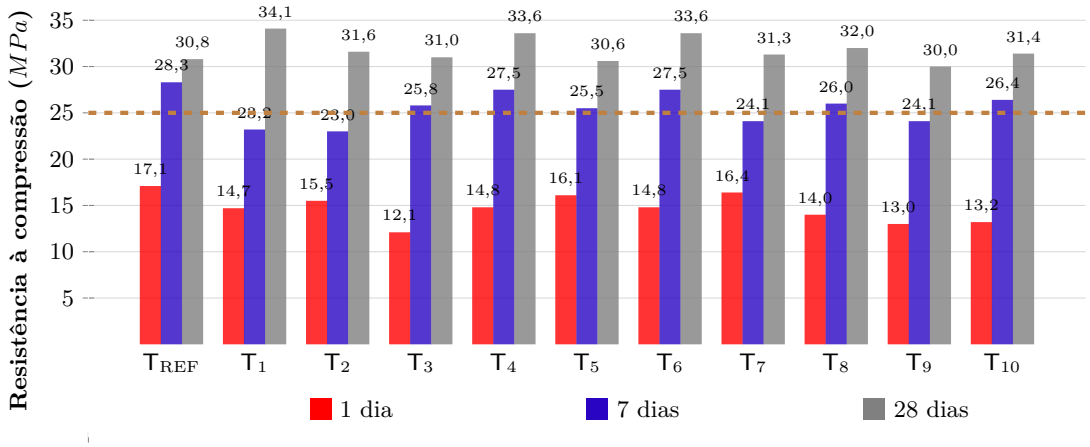
ISSN: 2763-8855
RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

Tabela 10 – Classificação dos concretos autoadensáveis estudados.

Traço	Espalhamento	t_{500}	IEV	Anel J	Caixa L	Caixa U	Funil V
T_{REF}	SF_2	VS_1	0	-	PL_2	-	VF_1
T_1	SF_2	VS_1	0	-	PL_2	-	VF_1
T_2	SF_2	VS_1	0	-	PL_2	-	VF_1
T_3	SF_2	VS_1	0	-	PL_2	-	VF_1
T_4	SF_2	VS_1	0	-	PL_2	-	VF_1
T_5	SF_2	VS_1	0	-	PL_2	-	VF_1
T_6	SF_2	VS_1	0	PJ_2	PL_2	-	VF_1
T_7	SF_2	VS_1	0	-	PL_2	PU	VF_1
T_8	SF_2	VS_1	0	PJ_2	PL_2	PU	VF_1
T_9	SF_2	VS_1	0	PJ_2	PL_2	PU	VF_1
T_{10}	SF_2	VS_1	0	-	PL_2	-	VF_1

Fonte: Os Autores.

Figura 10 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão nos traços de CAA.



A Tabela 11 mostra os resultados do Teste de Tukey, cujas análises indicam que não existe diferença significativa para a resistência à compressão entre os traços estudados, permanecendo todas as amostras ao mesmo grupo.

Sabe-se que o elevado teor de finos na mistura do CAA, proporcionado pela utilização do resíduo do processamento de britas, leva a uma melhor distribuição granulométrica do agregado utilizado no concreto, resultando em uma matriz mais compacta e densa, o que influencia positivamente no desempenho mecânico. Além disso, sua fluidez proporciona melhor distribuição do material dentro das fôrmas, contribuindo para a inexistência de falhas de concretagem (MELO, 2005). Também, há melhorias na mitigação da atuação de agentes agressivos, o que tem relação direta com a durabilidade das estruturas em concreto.

Nesse sentido, em concordância com a pesquisa de Siqueira (2020), os concretos com incorporação de areia de britagem e finos de rocha granítica demonstram altos níveis de resistência à segregação, destacando a viabilidade da incorporação desses materiais em concretos autoadensáveis. Devido à utilização de cimento CP V-ARI, é esperado um elevado ganho de resistência na idade de 1 dia. Pode-se perceber que todos os traços apresentaram desempenho mecânico superior ao esperado, sendo que o traço T_5 obteve o melhor resultado com a idade de 1 dia, destacando-se com valor acima de 18 MPa. A incorporação de areia de britagem possui finos de rocha em sua composição, material que pode preencher os vazios deixados pela areia natural, formando uma matriz mais sólida em comparação ao traço de referência, apresentando bom desempenho mecânico no ensaio de resistência à compressão.

Fazendo um comparativo entre o consumo de AB e AN para cada traço, ao considerar o traço denominado T_{10}, em que a areia natural foi substituída por 10% de areia de britagem, é possível perceber uma redução de $180\ kg$ no consumo de areia natural por m^3 de CAA

ISSN: 2763-8855
RECT Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

Tabela 12 – Resultados do Teste de Tukey para comparações múltiplas entre os traços de CAA estudados.

Idade (dias)		T_{REF}	T_1	T_{10}	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}
1	**Média**	16,55	13,35	14,25	10,05	14,40	14,55	14,90	16,20	13,50	12,00	10,60
	Grupo	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
7	**Média**	25,65	18,60	22,50	24,90	27,25	22,25	22,40	23,55	25,00	23,55	22,20
	Grupo	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
28	**Média**	28,40	34,05	32,80	29,00	33,30	29,80	27,85	30,65	31,00	26,50	30,70
	Grupo	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Fonte: Os Autores.

produzido, em relação ao traço comercializado pela empresa de concreto (T_{REF}), e um acréscimo no consumo de areia de britagem de até $182,39\ kg$. Essa diminuição na utilização da areia natural tem impacto direto na redução da sua extração e, como consequência, tem-se um maior consumo de areia de britagem, que deixa de ser um resíduo a ser descartada e passa a ter um valor no processo produtivo do concreto.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que, quanto ao desempenho do CAA no estado fresco, a utilização de AB resultou em concretos com características similares no estado fresco, podendo ser utilizados nas mesmas aplicações do traço referência.

Quanto ao desempenho mecânico no estado endurecido dos diferentes CAA formulados, a utilização da AB resultou em concretos com desempenho equivalente a dosagem de referência no estado endurecido, pois todos os valores de resistência à compressão ficaram acima do esperado, de acordo com o traço referência. Todos os traços ensaiados apresentaram resistência à compressão superiores a $25\ \mathrm{MPa}$ com 28 dias.

Quanto à diminuição da extração de areia natural e a redução do descarte de areia de britagem, o estudo mostrou a viabilidade técnica da utilização deste material em substituição parcial à areia natural, possibilitando, assim, a redução de impactos ambientais devido à extração de areia natural. O estudo indicou que é possível reduzir em até $180\ kg$ de areia natural por m^3 de CAA produzido, além de consumir $182,39\ kg$ de resíduo do processamento de britas (popularmente denominado pó de pedra) por m^3 de CAA.

Referências

ABNT. *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 8.

ABNT. *NBR 15823-1: Concreto autoadensável - Parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado 6 vezes nas páginas 2, 5, 6, 7, 8 e 10.

ABNT. *NBR 15823-2: Concreto autoadensável - Parte 2: determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado 3 vezes nas páginas 3, 5 e 7.

ABNT. *NBR 15823-3: Concreto autoadensável - Parte 3: determinação da habilidade passante - Método do anel J*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 3.

ABNT. *NBR 15823-4: Concreto autoadensável - Parte 4: determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado 3 vezes nas páginas 3, 7 e 9.

ABNT. *NBR 15823-5: Concreto autoadensável - Parte 5: determinação da viscosidade - Método do funil V*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 7.

ABNT. *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 8.

ABNT. *NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 3.

ABNT. *NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 3.

ISSN: 2763-8855

RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

ABNT. *NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 3.

ABNT. *NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de* $75\ \mu m$ *por lavagem*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 3.

ABNT. *NBR 17054: Agregados - determinação da composição granulométrica - método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 3.

ABNT. *NBR 7211: Agregados para concreto*. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 3.

ABNT. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.abnt.org.br>. Citado na página 5.

ALMEIDA, S. L. M.; SAMPAIO, J. A. Obtenção de areia artificial com base em finos de pedreiras. *Revista Areia & Brita*, p. 32–36, 2002. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2002/ENTMME2002-25.pdf>. Citado na página 3.

BADGUJAR, S.; DWIVEDI, A. K. Microstructural analysis of self-compacting concrete a review. *Materials Today: Proceedings*, v. 65, p. 1250–1259, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322023203>. Citado na página 2.

BAKER, W. F.; PAWLIKOWSKI, J. J.; YOUNG, B. S. The challenges in designing the world's tallest structure: The burj dubai tower. In: *Structures*. [s.n.], 2009. p. 1471–1480. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41031(341)160>. Citado na página 2.

BENABED, B. Effect of combined use of crushed sand and algerian desert dune sand on fresh properties and strength of self-compacting concrete. *Epitoanyag Journal of Silicate Based & Composite Materials*, v. 70, n. 5, p. 155–166, 2018. Disponível em: <https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A6%3A30278438/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A133660628&crl=c&link_origin=scholar.google.com.br>. Citado na página 3.

CHRIST, R.; TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Concreto de ultra alto desempenho: UHPC fundamentos, propriedades e dosagem. *Leud*, São Paulo, 2022. Citado na página 2.

COSTA, F. N. *Valorização do resíduo de construção civil por meio de sua incorporação ao processo de clinquerização*. Tese (Tese de Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/33041>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.

EFNARC, E. F. o. N. A. R. f. C. *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. United Kingdom, 2002. Citado na página 2.

ELYAMANY, H. E.; ELMOATY, A. E. M. A.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self-compacting concrete and flowable concrete. *Alexandria Engineering Journal*, v. 53, n. 2, p. 295–307, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016814000313>. Citado na página 3.

FELEKOGLU, B. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). *Resources, Conservation and Recycling*, v. 51, n. 4, p. 770–791, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344907000031>. Citado na página 9.

FERREIRA, G. E.; JUNIOR, C. A. F. F. Mercado de agregados no brasil. In: *XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology*. Goiânia, GO, Brasil: [s.n.], 2013. Citado na página 3.

ILANGOVANA, R.; MAHENDRANA, N.; NAGAMANIB, K. Strength and durability properties of concrete containing quarry rock dust as fine aggregate. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 3, n. 5, p. 20–26, 2008. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56184252/10.1.1.564.63-libre.pdf?1522264592=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSTRENGTH_AND_DURABILITY_PROPERTIES_OF_CO.pdf&Expires=1749126123&Signature=SCjjAJRfYm8gvxMnfdP249JfOFUMG1m9ZBB0lW-DbFH7V9q7pSOzQVia6Kl-6RsfsDzpi6C8upIFdAN2DozTtmluJUQoOOTIv5eXfFGtf7n0HYy0yXaZzRdSSlsqJtKg3WeZLx1acCw8w2ngkUIAe6hZxxUjlj9Pev6DPYRhDbgZd2M6aaSBI6tbPVw98pUcO8mcIbDvbKrugOkie4Ff9Wfy7emu8~ljlxdW0aI9dgD3Uh6RJFzNthgQap-vIDoPbEsw1U-EYmYX5V2MJgc0ZdAzrAYJWGOXiSQefHLteSERsRfrOj2FYr52lcnEbJv4xlsL9vuHYSkAJm~0wQDZhNQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA>. Citado na página 3.

KLEIN, N. S. *Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável*. 180 p. Dissertação (Dissertação) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008. Disponível em: <https://repositorio.uel.br/srv-c0003-s01/api/core/bitstreams/ba102ae5-7c75-42d6-a2eb-cc53591b91a4/content>. Citado na página 3.

MCDONALD, L.; GLASSER, F. P.; IMBABI, M. S. A new, carbon-negative precipitated calcium carbonate admixture (pcc-a) for low carbon portland cements. *Materials*, v. 12, n. 4, p. 554, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/4/554>. Citado na página 2.

MELO, K. A. d. *Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário*. 183 p. Dissertação (Dissertação) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/101755/211742.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Citado na página 11.

NEHDI, M. L. Only tall things cast shadows: Opportunities, challenges and research needs of self-consolidating concrete in super-tall buildings. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 80–90, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813005692>. Citado na página 2.

OKAMURA, H. Self-compacting high-performance concrete. *Concrete International*, v. 19, n. 7, p. 50–54, 1997. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=52>. Citado na página 2.

PEDUZZI, P. Sand, rarer than one thinks: Unep global environmental alert service (geas). *United Nations Environment Programme*, 2014. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8665>. Citado na página 2.

ISSN: 2763-8855

RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas

ROUSSEL, N.; NGUYEN, T. L. H.; COUSSOT, P. Yield stress measurements using stoppage tests. In: *Fourth International RILEM Symposium on Selfcompacting Concrete*. Chicago, EUA: [s.n.], 2005. Citado na página 2.

RUSLAN, H. N. et al. Efeito da casca de berbigão triturada como substituição parcial de agregado miúdo na trabalhabilidade e resistência do concreto leve. *Materials Today: Proceedings*, v. 48, p. 1826–1830, 2022. Citado na página 2.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, v. 121, p. 19–32, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616002043?casa_token=wxZZEsbID3oAAAAA:Hs8yKGAWUROTNEQGeyazEA7WaLT2tbEBmC2DvrC8BzzDQtY2fj-VOX-e_IVpnhsaBcOReRtF5lU>. Citado na página 3.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. Argamassas com areia britada: Influência dos finos e da forma das partículas. In: *VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 12–22. Citado na página 2.

SIQUEIRA, T. *Uso de finos de rocha granítica (FRG) e areia de britagem, produzidos na região metropolitana de Salvador (RMS), para a produção de concreto autoadensável*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/33040>. Citado 3 vezes nas páginas 3, 5 e 11.

SONNA, O. H. et al. Sand mining: Economic gains, environmental ethics, and policy implications. *Sustainable Development*, v. 5, n. 2, p. 119–138, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Henry-Ojukwu-2/publication/361402891_SAND_MINING_ECONOMIC_GAINS_ENVIRONMENTAL_ETHICS_AND_POLICY_IMPLICATION/links/6318805f70cc936cd3eb83f7/Sand-Mining-Economic-gains-Environmental-Ethics-and-Policy-Implications.pdf>. Citado na página 2.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra alto desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 2, p. 1283–1325. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc53.pdf>. Citado na página 1.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D. *Concreto Autoadensável*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2021. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/51877932/Bernardo_F._Tutikian_-_Concreto_Auto-adensavel-libre.pdf?1487641352=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCONCRETO_AUTO_ADENSAVEL.pdf&Expires=1749127479&Signature=SjBca19rxTjp2UW3XIrEla40x7tAA4i8WvL0gpUXI5MMlrVIPaoErgEla4oSpU9vCKmzYZEM7ZoKVGWoG3EqiVKCo-bYNfL2zyVRGmUZFSxCQn~PAxXIEFzjkLG9YvUHa~fSRt-8u0u7jIPxpmR2hIFC1DWuwhOfpSjHwLMXojkwrflueScOt07zEz4gTDuYLfbN2swpRdxeLAiha54y9hFpEG9eDwRK-h2hi1Ys7CIJVVQqOa63Yy3FYeF2f1nKGM1q-3M5RrmDZssPKWMQ8zdghMbQcm1UM0Q7ZEHfzpJDriPK6mX2EESpBjvu5YSu3fl2uOVTwlt5b3OJMB2cHA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA>. Citado 3 vezes nas páginas 2, 7 e 10.

YAMEI, H.; LIHUA, W. Effect of particle shape of limestone manufactured sand and natural sand on concrete. *Procedia Engineering*, v. 210, p. 87–92, 2017. Citado na página 3.

©2025 by RECET. Este é um artigo de acesso livre, distribuído sob os termos e condições da licença Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0).

ISSN: 2763-8855

RECET Revista Eletrônica de Ciências Exatas e Tecnológicas