FRAÇÃO DENSA DA CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO AGREGADO MIÚDO: INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DE ARGAMASSAS

Dense fraction of sugarcane bagasse ash as fine aggregate: influence on the compressive strength and absorption of mortars

Mayara Lopes Souza de Castro Maciel
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro | Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro | mayara14.lopes @gmail.com

Guilherme Chagas Cordeiro
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro | Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro | gcc@uenf.br

RESUMO

Este trabalho investigou o potencial da fração densa da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo com vistas à sua produção e o desempenho em argamassa de 30 MPa. Para isso, um método de separação úmida foi desenvolvido, o que permitiu a segregação de uma cinza de caldeira em frações densa e leve. Em seguida, a areia derivada da cinza foi comparada com uma areia natural de quartzo, com a avaliação do impacto da granulometria controlada na resistência à compressão, absorção de água e empacotamento de argamassas. Os resultados indicaram que as argamassas com 100% de substituição da areia natural pela areia de cinza apresentaram os maiores valores de resistência à compressão, com incrementos de 23% aos 28 dias e 41% aos 120 dias em relação à referência. Os resultados de empacotamento e de absorção de água corroboraram a melhoria significativa da resistência à compressão da argamassa.

Palavras-chave: Cinza do bagaço de cana-de-açúcar; Areia artificial; Separação densimétrica; Resistência à compressão; Empacotamento.

ABSTRACT

This study investigated the potential of the dense fraction of sugarcane bagasse ash as a fine aggregate, focusing on its production and performance in 30 MPa mortar. For this purpose, a wet separation method was developed, enabling the segregation of boiler ash into dense and light fractions. Subsequently, the ash-derived sand was compared to natural quartz sand, with an assessment of the impact of controlled particle size distribution on compressive strength, water absorption, and mortar packing. The results indicated that mortars with 100% replacement of natural sand by ash sand showed the highest compressive strength values, with increases of 23% at 28 days and 41% at 120 days compared to the reference. The packing and water absorption results supported the significant improvement in mortar compressive strength.

Keywords: Sugarcane bagasse ash; Artificial sand; Densimetric fractionation; Compressive strength; Packing density.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por concreto e outros produtos cimentícios tem impulsionado o consumo massivo de agregados naturais, principalmente a areia, cuja extração anual já ultrapassa 10 bilhões de toneladas (Zhang; Li; Wang, 2020), ocasionando impactos ambientais severos, sobretudo em ecossistemas fluviais. Se o atual ritmo de consumo persistir, a reserva de areia natural poderá se esgotar até 2050 (Rentier; Cammeraat, 2022), o que reforça a urgência na busca por alternativas sustentáveis que minimizem os danos ambientais decorrentes da produção de argamassas e concretos.

Nesse cenário, a incorporação de resíduos na formulação de materiais cimentícios e agregados é uma estratégia promissora. Entre os subprodutos disponíveis, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) destaca-se, principalmente em regiões tropicais e subtropicais, pela abundância da cana e pelo potencial de aproveitamento de aproximadamente 12 milhões de toneladas de cinza provenientes das unidades sucro-alcooleiras. Estudos têm demonstrado que a utilização de CBCA como material cimentício suplementar (MCS) pode aumentar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto (Cordeiro *et al*., 2018; Zareei; Ameri; Bahrami, 2018). Entretanto, desafios relativos à variabilidade de sua composição química mineralógica e inconsistências na granulometria têm limitado sua aplicação em larga escala, o que motivou o desenvolvimento de métodos de processamento para otimizar suas propriedades pozolânicas, como peneiramento (Arenas-Piedrahita *et al*., 2016), moagem controlada (Cordeiro; Andreão; Tavares, 2019), recalcinação (Cordeiro; Barroso; Toledo Filho, 2018) e tratamentos químicos (Farirai; Mupa; Daramola, 2020).

Além de seu papel como MCS, a CBCA tem potencial como agregado miúdo, especialmente a cinza de fundo de caldeira, que é rica em quartzo. Estudos mostram que a cinza de fundo apresenta viabilidade como substituta parcial da areia natural e proporciona melhorias em resistência à compressão, resistência à tração e trabalhabilidade, bem como na redução da absorção de água, desde que o teor de substituição não seja superior a 30% (Modani; Vyawahare, 2013; Moretti *et al*., 2016; De Sande *et al*., 2021). O presente estudo propõe um método inovador de separação da CBCA, dividindo a cinza de caldeira em uma fração leve, com alta atividade pozolânica (Cordeiro; Linhares; Lemos, 2022), e uma fração densa, apta a ser utilizada como agregado miúdo.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

A CBCA estudada foi coletada em uma destilaria de álcool situada na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ (Brasil). Após a coleta, a cinza foi submetida a um processo de fracionamento densimétrico para separação das frações leve e densa. Inicialmente, preparou-se um recipiente com 15 L de água, ao qual foram adicionados 2 L de cinza. A mistura foi agitada manualmente por 1 minuto e, em seguida, deixada em repouso por 3 minutos, permitindo a decantação do material denso. Este material foi então separado e reservado para secagem, enquanto aproximadamente 10 L da solução remanescente com a parte leve foram retirados. O rendimento médio de material denso foi de 85% em massa.

A partir da fração densa da cinza foi produzido um agregado miúdo (Areia-C) por meio de classificação mecânica utilizando onze peneiras com aberturas entre 0,075 e 4,75 mm. Para ajustar a granulometria, foi empregada a norma brasileira NBR 7211 (ABNT, 2005) e um protocolo de empacotamento (De Larrard, 1999), visando minimizar o descarte de material. A Tabela 1 apresenta o percentual retido em cada peneira, bem como o material descartado, que, após a classificação, correspondeu a 15%.

Para a confecção das argamassas foram utilizados, além de Areia-C, um cimento Portland Classe G, uma areia natural de mesma granulometria (Areia-N), superplastificante policarboxilato e água deionizada. As duas areias foram caracterizadas com ensaios de massa específica (ABNT, 2009a), absorção de água (ABNT, 2021), forma (esfericidade e arredondamento), que foi conduzida de acordo com Cordeiro, Alvarenga e Rocha (2016), e mineralogia por difração de raios X (Rigaku Miniflex 600, Cu-kα 40 kV e 15 mA, $10 \leq 2\theta \leq 70$, 0,03°/s e 5°/min).

Tabela 1: Classes granulométricas para produção de Areia-C e Areia-N.

Abertura de peneira (mm)	Massa retida (%)
4,75	1,7
2,36	10,2
2,00	2,6
1,70	2,6
1,18	8,5
0,85	11,1
0,60	10,2
0,30	25,5
0,15	10,2
0,075	2,6
Descarte	15,0

2.1 DOSAGEM, PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

As argamassas foram dosadas com base no Modelo de Empacotamento Compressível – CPM (De Larrard, 1999), que minimiza o índice de vazios de uma mistura a partir da granulometria e densidade de empacotamento de seus constituintes. Dessa forma, foi dosada uma argamassa de referência (A-REF) foi dosada para uma resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias e consistência na faixa entre 200 e 220 mm (ABNT, 2019).

A mistura A-REF apresentou apenas Areia-N como agregado miúdo e foi dosada com relações água-cimento e areia-cimento de 0,48 e 3,0, respectivamente. Assim, A-REF foi formulada com um consumo de cimento de 508,8 kg/m³ e teor de superplastificante de 0,03% (0,53 kg/m^3). Em seguida, seis misturas foram preparadas com a substituição de Areia-N por Areia-C em proporções de 20, 35, 50, 65, 80 e 100% em massa (denominadas A-AC*x*, onde *x* representa o percentual de Areia-C na mistura). A Tabela 2 apresenta as dosagens e os valores de consistência das argamassas estudadas.

Tabela 2: Dosagem e valores de consistência das argamassas.

Mistura	Cimento (kg/m^3)	Areia-N (kg/m^3)	Areia-C (kg/m^3)	Água (kg/m^3)	SP* (%)**	Consistência (mm)
A-REF	508,8	1526,3	–	243,8	0,03	245
A-AC20	509,2	1222,2	305,5	244,1	0,03	235
A-AC35	509,6	993,7	535,0	244,2	0,03	240
A-AC50	509,9	764,9	995,0	244,4	0,03	245
A-AC65	510,2	535,8	764,9	244,5	0,03	240
A-AC80	510,6	306,4	1225,4	244,7	0,03	245
A-AC100	511,0	–	1533,1	244,9	0,03	250

* SP: superplastificante. ** Massa de superplastificante em relação à massa de cimento.

Todas as argamassas foram preparadas em um misturador padrão em conformidade com a NBR 7215 (ABNT, 2019). Após a moldagem, os corpos de prova cúbicos (aresta 50 mm) foram mantidos em câmara úmida por 24 h e, em seguida, foram desmoldados e curados por imersão em solução saturada de cal a 25 ± 0,5°C. O empacotamento foi obtido utilizando o CPM com o auxílio do programa Betonlab Pro3. A resistência à compressão das argamassas aos 7, 28 e 120 dias de cura foi obtida a partir da ruptura dos corpos de prova (3 por mistura e idade) em uma máquina servo-hidráulica Shimadzu UH-F500kNI, com taxa de deslocamento constante de 0,5 mm/min. A absorção de água das argamassas foi obtida aos 28 dias de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009b). Os dados de resistência à compressão e absorção de água foram comparados por meio da análise de variância (ANOVA) com o teste de comparações múltiplas de Duncan ($p \leq 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

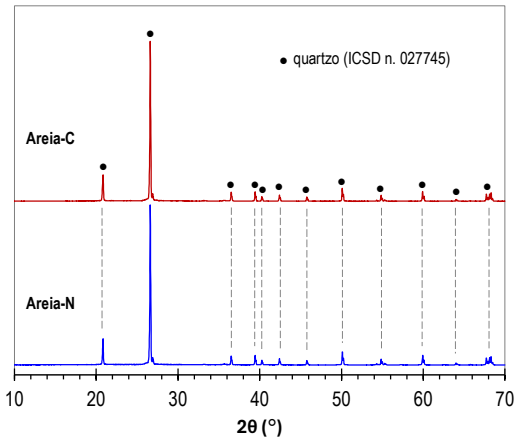
A Tabela 3 apresenta os resultados de caracterização das duas areias. Observa-se que tanto a massa específica quanto os parâmetros morfológicos (esfericidade e arredondamento) apresentaram valores similares, compatíveis com os de agregados quartzosos de alta qualidade, conforme descrito por Cordeiro, Alvarenga e Rocha (2016). A variação de apenas 8% nos valores de massa específica entre as duas areias reforça essa similaridade. O quartzo foi o único mineral presente nas amostras analisadas por difratometria de raios X (Figura 1). Tais evidências sugerem que a substituição da areia natural pela Areia-C pode ser efetuada sem prejuízo à trabalhabilidade das argamassas, o que ficou claro na dosagem das argamassas

com um teor fixo de superplastificante (Tabela 2). Ambas as areias apresentaram valores de absorção de água inferiores a 1% (Tabela 3). A maior absorção da Areia-C pode ser atribuída à presença de partículas originais da CBCA, comportamento similar ao observado por Muthadhi e Banupriya (2021).

Tabela 3: Características dos agregados miúdos.

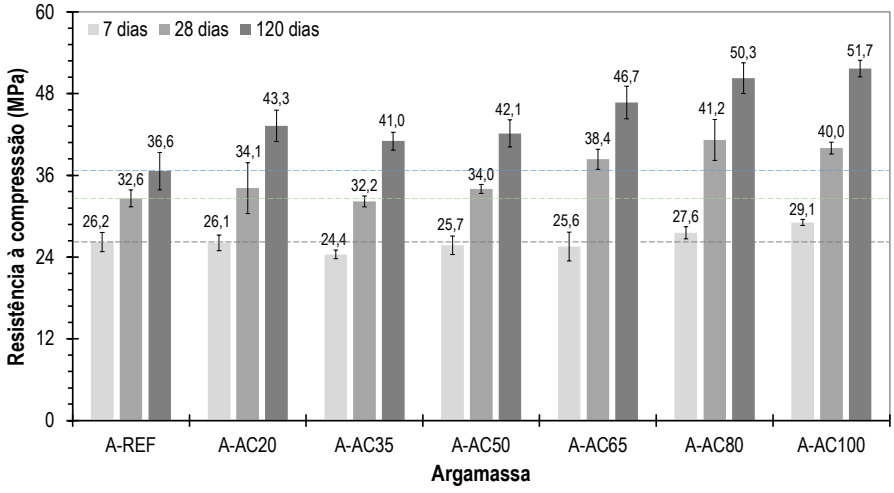
Característica	Areia-C	Areia-N
Massa específica (g/cm^3)	2,62	2,64
Absorção de água (%)	0,56	0,96
Esfericidade	0,65	0,61
Arredondamento	0,80	0,78

Figura 1: Difratogramas de raios X dos agregados miúdos.



No que se refere à resistência à compressão das argamassas, os ensaios mostraram diferenças significativas ao longo do tempo de cura (Figura 2). Aos 7 dias, A-REF e as misturas contendo até 80% de Areia-C não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Entretanto, a mistura A-AC100, composta exclusivamente por Areia-C como agregado, apresentou um desempenho superior em relação às demais. Após 28 dias de cura, observou-se que as argamassas A-REF, A-AC20, A-AC35 e A-AC50 mantiveram resistências estatisticamente iguais. As formulações com maiores teores de Areia-C (65, 80 e 100%) também exibiram resultados sem diferenças significativas entre si, porém superiores às demais. Aos 120 dias, a formulação A-AC65 superou aquelas com menores taxas de substituição, incluindo A-REF, mas foi superada por A-AC80 e A-AC100. O valor máximo de resistência foi registrado para A-AC100 (51,7 MPa), que correspondeu a um incremento de 41% em comparação com A-REF (36,6 MPa) na mesma idade. Esses resultados reforçam a hipótese de que a incorporação de Areia-C contribuiu de forma significativa para a melhoria do desempenho mecânico das argamassas.

Figura 2: Valores médios de resistência à compressão das diferentes argamassas.



O aumento significativo de resistência das argamassas com altos teores de Areia-C pode ser explicado, primeiramente, pelo aumento no empacotamento de partículas (Tabela 4), que resulta em uma matriz

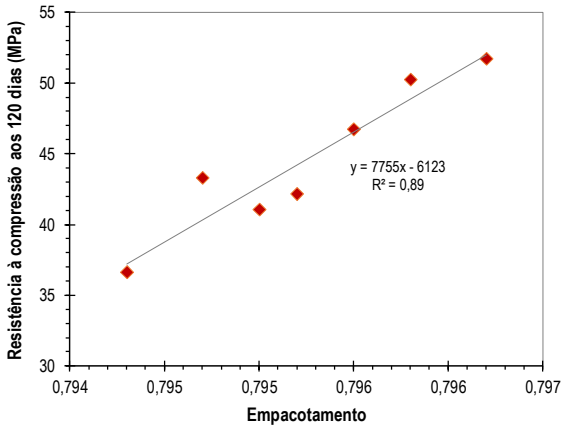
cimentícia mais densa e com menor volume de vazios. A correlação estabelecida entre os valores de resistência à compressão e o índice de empacotamento (Figura 3) corrobora essa observação. Além disso, a presença de partículas oriundas da CBCA na Areia-C, especialmente nas frações mais finas, pode favorecer a ocorrência de reações pozolânicas ao longo do tempo, conforme sugerido por Subedi *et al*. (2021). Esse mecanismo justifica os incrementos mais acentuados na resistência observados nas argamassas com maiores proporções de substituição da areia natural.

Tabela 4: Valores de empacotamento e de absorção de água das argamassas.

Propriedade	A-REF	A-AC20	A-AC35	A-AC50	A-AC65	A-AC80	A-AC100
Empacotamento	0,7943	0,7947	0,7950	0,7952	0,7955	0,7958	0,7962
Absorção de água (%)	5,74 (± 0,10)	5,79 (± 0,17)	5,84 (± 0,10)	5,85 (± 0,12)	5,73 (± 0,10)	5,66 (± 0,07)	5,47 (± 0,09)

Os ensaios de absorção de água realizados após 28 dias de cura (Tabela 4) complementam os resultados referentes à resistência à compressão. De modo geral, diferenças significativas não foram observadas na absorção de água entre as argamassas, com exceção da A-AC100, que apresentou uma redução de 5% em relação à A-REF. Essa diminuição está diretamente relacionada ao maior empacotamento e à menor porosidade da matriz cimentícia, o que leva a uma redução da permeabilidade ao longo do tempo. Esses resultados encontram consonância com os relatados por Ramakrishnan *et al*. (2021).

Figura 3: Correlação entre empacotamento e resistência média à compressão aos 120 dias de cura.



4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, as seguintes conclusões podem ser estabelecidas:

- As duas areias analisadas apresentaram propriedades físicas e morfológicas similares, com apenas 8% de variação na massa específica, o que permitiu a substituição da areia natural pela Areia-C sem comprometer a trabalhabilidade das argamassas;
- Embora a Areia-C exiba absorção de água superior à da Areia-N devido à presença de partículas originais da CBCA, ambas mantêm índices inferiores a 1%;
- Os ensaios de resistência à compressão demonstraram que, a partir de teores de substituição maiores que 50%, as argamassas alcançaram desempenhos mecânicos significativamente superiores, com a formulação 100% Areia-C alcançando 51,7 MPa aos 120 dias, o que representou um ganho de 41% em relação à referência;
- O aumento na resistência à compressão da argamassa com 100% de Areia-C pode ser explicado pelo melhor empacotamento das partículas, que densificou a matriz cimentícia e reduziu a absorção de água da argamassa.

Dessa forma, a substituição parcial ou total da Areia-N por Areia-C apresenta um grande potencial para o desenvolvimento de materiais cimentícios de alta durabilidade e sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. O também contou com o apoio do Conselho

Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e foi financiado pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), Processo SEI E-26/201.053/2022.

REFERÊNCIAS

ARENAS-PIEDRAHITA, J. C.; MONTES-GARCÍA, P.; MENDOZA-RANGEL, J. M.; LÓPEZ CALVO, H. Z.; VALDEZ-TAMEZ, P. L.; MARTÍNEZ-REYES, J. Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 69-81, 2016. ISSN 0950-0618. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916:** Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

____ **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

____ **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

____ **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009b.

____ **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.

CORDEIRO, G. C.; ALVARENGA, L. M. S. C.; ROCHA, C. A. A. Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 766-773, 2016. ISSN 0950-0618. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.178.

CORDEIRO, G. C.; ANDREÃO, P. V.; TAVARES, L. M. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. **Heliyon**, v. 5, p. e02566, 2019. ISSN 2405-8440. doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02566.

CORDEIRO, G. C.; BARROSO, T. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Enhancement the properties of sugar cane bagasse ash with high carbon content by a controlled re-calcination process. **KSCE Journal of Civil Engineering,** v. 22, p. 1250-1257, 2018. ISSN 1226-7988. https://doi.org/10.1007/s12205-017-0881-6.

CORDEIRO, G. C.; LINHARES, B. D. F.; LEMOS, M. N. Production of a highly pozzolanic sugarcane bagasse ash via densimetric fractionation and ultrafine grinding. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4, p. 49-58, 2022. ISSN 1678-8621. doi: http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000400627.

CORDEIRO, G. C.; PAIVA, O. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; TAVARES, L. M. Long-term compressive behavior of concretes with sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, p. 564-573, 2018. ISSN 0090-3973. doi: https://doi.org/10.1520/JTE20160316

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: A scientific approach**, 1 ed., London: E&FN Spon, 1999.

DE SANDE, V. T.; SADIQUE, M.; PINEDA, P.; BRAS, A.; ATHERTON, W.; RILEY, M. Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 39, p. 102277, 2021. ISSN 2352-7102. doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102277.

FARIRAI, F.; MUPA, M.; DARAMOLA, M. O. An improved method for the production of high purity silica from sugarcane bagasse ash obtained from a bioethanol plant boiler. **Particulate Science and Technology**, v. 39, n.2, p. 252-259, 2020. ISSN 0272-6351. doi: https://doi.org/10.1080/02726351.2020.1734700.

MODANI, P. O.; VYAWAHARE, M. R. Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete. **Procedia Engineering**, v. 51, p. 25-29, 2013. ISSN 1877-7058. doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.007.

MORETTI, J. P.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; REZENDE, M. A. M.; GROMBONI, P. P. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 317-323, 2016. ISSN 0950-0618. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.062.

MUTHADHI, A.; BANUPRIYA, S. Production of self-compacting concrete with fly ash using bagasse ash as fine aggregate. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 46, p. 2187-2200, 2022. ISSN 2364-1843. doi: https://doi.org/10.1007/s40996-021-00719-3.

RAMAKRISHNAN, K.; GANESH, V.; VIGNESH, G.; VIGNESH, M.; SHRIRAM, V.; SURYAPRAKASH, R. Mechanical and durability properties of concrete with partial replacement of fine aggregate by sugarcane bagasse ash (SCBA). **Materials Today: Proceedings**, v. 42, p. 1070-1076, 2021. ISSN 2214-7853. doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.172.

RENTIER, E. S.; CAMMERAAT, L. H. The environmental impacts of river sand mining. **Science of The Total Environment**, v. 838, p. 155877, 2022. ISSN 0048-9697. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877.

SUBEDI, S.; ARCE, G. A.; NOORVAND, H.; HASSAN, M. M.; BARBATO, M.; MOHAMMAD, L. N. Properties of engineered cementitious composites with raw sugarcane bagasse ash used as sand replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 9, 2021. ISSN 0899-1561. doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003892.

ZAREEI, S. A.; AMERI, F.; BAHRAMI, N. Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 258-268, 2018. ISSN 0950-0618. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153.

ZHANG, J. F.; LI, D.; WANG, Y. H. Toward intelligent construction: Prediction of mechanical properties of manufactured-sand concrete using tree-based models. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120665, 2020. ISSN 0959-6526. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120665.