Industrialização, Digitalização, Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 5º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos

FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

[1]Desempenho Mecânico e Durabilidade do Concreto com Substituição do Agregado Miúdo por Cinza de Bagaço de Cana

Mechanical Performance and Durability of Concrete with Fine Aggregate Replacement by Sugarcane Bagasse Ash

João Paulo de Jesus da Silva
Universidade Estadual de Maringá (UEM) | Maringá, Paraná | pg404637@uem.br

Silvia Paula Sossai Altoé
Universidade Estadual de Maringá (UEM) | Maringá, Paraná | spsaltoe@uem.br

RESUMO

Nos últimos anos, a crescente preocupação com a sustentabilidade tem impulsionado a busca por alternativas que visem a redução do impacto ambiental na construção civil e na indústria sucroalcooleira. A construção civil, por sua vez, exige grandes quantidades de recursos naturais, enquanto a produção de açúcar e etanol gera resíduos em larga escala, como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, oriunda da queima para geração de energia. Nesse contexto, a substituição parcial do agregado miúdo por areia derivada dessa cinza surge como uma solução sustentável, com o potencial de melhorar o desempenho mecânico do concreto e mitigar os impactos ambientais associados à extração de recursos naturais. Este estudo investigou a viabilidade do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como substituto parcial do agregado miúdo natural no concreto, em substituições de 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, mantendo uma relação água/cimento de 0,55. Para a avaliação do comportamento mecânico do material, foram realizados ensaios não destrutivos para determinação do módulo de elasticidade dinâmico e estático. Os resultados demonstraram que a substituição parcial de ACBC proporcionou aumentos significativos na resistência à compressão e resistividade elétrica, destacando o traço de 25% como o de melhor desempenho nos ensaios realizados.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Concreto, Cinza do bagaço de cana-de-açúcar, Durabilidade.

ABSTRACT

In recent years, the growing concern for sustainability has driven the search for alternatives aimed at reducing environmental impacts in the construction industry and the sugar-energy sector. The construction industry, in particular, requires large quantities of natural resources, while the production of sugar and ethanol generates large-scale waste, such as bagasse ash from sugarcane, which is a byproduct of burning for energy generation. In this context, the partial replacement of fine aggregates with sand derived from this ash emerges as a sustainable solution, with the potential to improve the mechanical performance of concrete and mitigate the environmental impacts associated with the extraction of natural resources. This study investigated the feasibility of using sugarcane bagasse ash (SCBA) as a partial substitute for natural fine aggregate in concrete, with replacement levels of 10%, 15%, 20%, 25%, and 30%, while maintaining a water-to-cement ratio of 0.55. To evaluate the mechanical behavior of the material, non-destructive testing was conducted to determine both dynamic and static elastic modulus. The results demonstrated that the partial substitution of SCBA led to significant increases in compressive strength and electrical resistivity, with the 25% replacement ratio showing the best performance in the tests conducted.

Keywords: *Sustainability, Concrete, Sugarcane Bagasse Ash, Durability.*

[1]SILVA, J. P. J. S.; ALTOE, S. P. S. Desempenho mecânico e durabilidade do concreto com substituição do agregado miúdo por cinza de bagaço de cana. In: V WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS, 2025, Florianópolis. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2025.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, essencial para o desenvolvimento econômico global, enfrenta o desafio constante de adotar práticas mais sustentáveis e eficientes. Nesse contexto, a busca por materiais alternativos que reduzam o impacto ambiental sem comprometer o desempenho estrutural ganha relevância crescente. O concreto, um dos materiais mais consumidos no setor, demanda grandes quantidades de agregados naturais, cuja extração intensiva pode causar impactos ambientais significativos (IBGE, 2022).

A cana-de-açúcar, uma das principais culturas agrícolas do Brasil, não apenas contribui significativamente para a economia nacional como também gera subprodutos de alto potencial, como o bagaço. Para cada tonelada de cana processada na produção de açúcar e etanol, estima-se a geração de 250 a 300 kg de bagaço, o qual, quando queimado para geração de energia, resulta na formação de cinza. Estudos indicam que cada tonelada de cana-de-açúcar produz aproximadamente 6 kg de cinza, totalizando uma estimativa de 4,14 milhões de toneladas para a safra 2024/25 (CONAB, 2024).

A areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) surge como uma alternativa promissora na produção de concretos sustentáveis. Tradicionalmente, parte das cinzas geradas na indústria sucroalcooleira é reaproveitada como fertilizante, enquanto outra parcela é descartada em aterros sem um destino produtivo. No entanto, a reutilização desses resíduos na construção civil pode reduzir a extração de recursos naturais e promover materiais alternativos de menor custo. A substituição parcial do agregado miúdo por ACBC pode resultar em melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, devido ao refinamento da estrutura porosa e ao aumento da resistência à compressão, que pode atingir até 30% de ganho em comparação com concretos convencionais (Lima, 2020).

A exploração desenfreada da areia, especialmente na construção civil, tem gerado impactos ambientais significativos, exigindo uma nova abordagem para sua extração e uso sustentável. Segundo a ONU (2022), a areia é o segundo recurso mais utilizado no mundo, atrás apenas da água, com um consumo anual de 50 bilhões de toneladas. Sua extração descontrolada em rios, ecossistemas costeiros e marinhos resulta em erosão, salinização de aquíferos e perda da proteção contra tempestades, além de ameaçar a biodiversidade e setores essenciais como abastecimento de água, pesca e turismo. Apesar de ser fundamental para o desenvolvimento econômico, compondo infraestruturas essenciais, seu papel ambiental também é crítico, pois fornece habitats e contribui para a captura de carbono. Diante da tripla crise planetária – mudança climática, poluição e perda da biodiversidade –, é urgente reconhecer a areia como um recurso estratégico e implementar práticas de gestão sustentável para minimizar seus impactos (ONU, 2022).

A utilização sustentável da areia na construção civil contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, 11 e 12 da ONU. O ODS 9 promove práticas inovadoras para reduzir impactos ambientais, o ODS 11 enfatiza um planejamento urbano responsável, e o ODS 12 destaca a importância de extrair e usar a areia de forma equilibrada, evitando desperdícios e danos à biodiversidade. A gestão eficiente da areia apoia o desenvolvimento sustentável e resiliente, alinhado às metas globais da ONU (ONU, 2015).

Este artigo tem como objetivo analisar o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto com substituição parcial do agregado miúdo por ACBC, focando na resistência à compressão, permeabilidade e longevidade do material. Além disso, discute os impactos ambientais e econômicos dessa prática na construção civil, destacando a contribuição para a sustentabilidade do setor e a importância da gestão adequada de resíduos agroindustriais, alinhando-se às tendências globais de economia circular e inovação em materiais de construção.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da Areia de Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar (ACBC)

As amostras de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) foram coletadas de um pátio de usina em Iguatemi, Paraná, e passaram por um processo de preparação e caracterização. O material foi seco em estufa a 105 ± 5 °C por 30 horas para eliminar a umidade residual. Após a secagem, foi armazenado para evitar contaminação e reabsorção de umidade. Impurezas foram removidas por peneiramento, e a ACBC passou por um peneiramento final com peneira de abertura #4,8, garantindo a uniformidade granulométrica para sua

utilização como substituto parcial do agregado miúdo no concreto. Na Figura 01, é possível visualizar a variação no estado do material após o procedimento de secagem em estufa, seguido pelo processo de remoção de impurezas através do peneiramento.

Figura 1: Cinza antes e depois do peneiramento.



Antes Depois

Fonte: Autor (2024)

2.2 Caracterização do Agregado Miúdo - Areia

A areia média utilizada como agregado miúdo foi obtida de fornecedores locais da região de Maringá e permaneceu armazenada na área destinada ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá, situada no Bloco P02, onde são desenvolvidas atividades de pesquisa. Antes da coleta, foi realizada uma análise preliminar do material descartado pelas usinas, com o objetivo de evitar a coleta de amostras contendo impurezas, como bagaço, fuligem ou outros materiais indesejáveis. Para a caracterização do material, foram realizados ensaios abrangentes, contemplando a análise granulométrica, a determinação da densidade e da massa unitária, conforme os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas vigentes.

2.3 Definição dos traços de concreto

As amostras foram moldadas conforme as diretrizes da ABNT NBR 5738:2015, apresentando dimensões de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Após a moldagem, permaneceram nas formas por um período de 24 horas para assegurar a desmoldagem adequada. Em seguida, foram devidamente identificadas e transferidas para uma câmara úmida, onde permaneceram por 28 dias sob condições controladas até a realização dos ensaios. Durante esse período, as amostras foram armazenadas em temperatura ambiente de aproximadamente 23 ± 2 °C.

O cimento utilizado foi o CP V ARI, da marca CAUÊ, escolhido por ser isento de adições e conter apenas os componentes usuais do cimento Portland. O agregado graúdo empregado foi brita 1, adquirida na região de Maringá, com granulometria entre 5 e 19 mm. A caracterização preliminar do material foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá. A Tabela 1 apresenta os traços utilizados na confecção dos corpos de prova, com base no traço inicial (0%) como referência comparativa nos ensaios.

Tabela 1:Quantitativo de material para produção dos corpos de prova

TRAÇO	CIMENTO (kg)	ACBC (kg)	AREIA (kg)	ÁGUA (kg)	FATOR A/C
0%	1,00	0,00	1,96	0,62	0,55
10%	1,00	0,20	1,76	0,62	0,55
15%	1,00	0,29	1,67	0,62	0,55
20%	1,00	0,39	1,57	0,62	0,55
25%	1,00	0,49	1,47	0,62	0,55
30%	1,00	0,59	1,37	0,62	0,55

Fonte: Autor (2024).

2.4 Ensaio de Velocidade de Propagação de Onda de Ultrassom (VPU)

Após o período de cura, foram realizados ensaios para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, seguindo os procedimentos descritos na ABNT NBR 8802:2019, que estabelece diretrizes para ensaios não destrutivos em elementos de concreto.

Antes dos ensaios, os corpos de prova foram preparados, garantindo superfícies planas, lisas e sem impurezas. Nos caso de irregularidades, optou-se pela regularização mecânica com uma retificadora para precisão. Em seguida, aplicou-se uma fina camada de gel nos transdutores e nos corpos de prova para otimizar o contato e minimizar perdas na transmissão das ondas.

Existem três arranjos possíveis para a disposição dos transdutores no ensaio de propagação de ondas ultrassônicas: direto, indireto e semidireto. Neste estudo, foi adotado o arranjo de transmissão direta, no qual os transdutores são posicionados em extremidades opostas do corpo de prova. Esse arranjo foi escolhido por garantir uma recepção mais intensa das ondas e maior confiabilidade na determinação da velocidade de propagação. A Figura 2 apresenta o equipamento e a configuração utilizados nas medições, com o emissor, com frequência superior a 20 kHz, e o receptor posicionados nas faces opostas do corpo de prova, utilizando gel acoplante para assegurar o contato eficiente entre as superfícies.

Figura 2: Realização do ensaio de VPU.



Fonte: Autor (2024).

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, pode ser utilizando a velocidade encontrada e aplicando os dados, conforme especificado na Equação (1) da norma ASTM C 597, (2022).

$$E_d = V^2.\rho.\frac{(1+\mu)\cdot(1-2\mu)}{(1-\mu)} \qquad (1)$$

em que: E_d: módulo de elasticidade dinâmico;

μ: coeficiente de Poisson (0,20);
V: velocidade do pulso (m/s);
ρ: massa específica do concreto (kg/m³).

Já para o cálculo da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, foi determinado a partir da Equação (2) apresentado abaixo.

$$V = \frac{L}{t} \qquad (2)$$

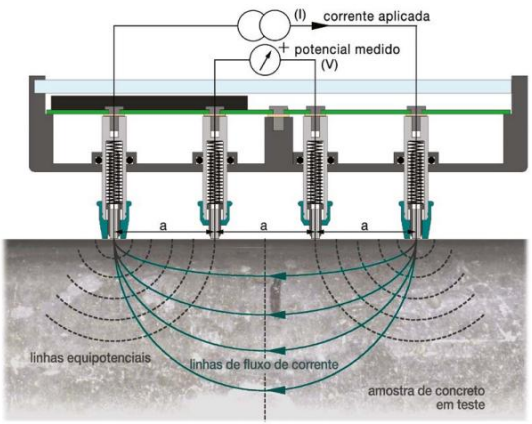
em que: V: velocidade de propagação da onda ultrassônica (mm/µs);
t: tempo registrado em micro segundos;
L: distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (mm).

2.5 Ensaio de Resistividade Elétrica pelo Método de Werner

A migração iônica foi avaliada com uma diferença de potencial de 60 V entre os eletrodos, monitorando-se a corrente por 6 horas. A resistividade elétrica foi analisada pelo método dos quatro eletrodos, com corrente aplicada entre os eletrodos externos e a diferença de potencial medida entre os internos. Esse ensaio utiliza baixa voltagem (5 V) e permite medições rápidas, diferindo do método de alta voltagem em termos de fluxo de corrente e tempo de execução.

A determinação da resistência ao fluxo de corrente elétrica nos concretos avaliados foi realizada utilizando-se o método dos quatro eletrodos com sonda Wenner, conforme as diretrizes das normas ASTM G57, (2012) e RILEM TC 154 (VENNESLAND; RAUPACH; ANDRADE, 2007). Os ensaios foram conduzidos no laboratório de ensaios não destrutivos do Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Estruturas – Maringá-PR, utilizando o equipamento Resipod da marca Proceq, modelo com espaçamento de 50 mm entre as sondas. Esse método consiste na aplicação de corrente elétrica através das sondas externas, enquanto a diferença de potencial é medida entre as sondas internas, permitindo a determinação da resistividade elétrica do concreto, conforme ilustrado na Figura 3 e 4.

Figura 3: Esquematização do ensaio de quatro pontos.



Fonte: (Proceq, 2017).

Figura 4: Equipamento utilizado - Resipod.





Fonte: Autor (2024).

Neste ensaio, a etapa de pré-saturação é essencial, uma vez que a condução da corrente elétrica ocorre por meio dos íons dissolvidos na solução aquosa presente nos poros do concreto. As medições foram expressas em kΩ·cm, sendo calculadas as médias das leituras obtidas em três amostras para cada traço avaliado. Em cada amostra, realizaram-se quatro medições distintas. Com base nos valores obtidos, classificou-se a probabilidade de corrosão dos concretos analisados de acordo com a resistividade elétrica, conforme apresentado na Tabela 2, seguindo as diretrizes estabelecidas pelo boletim europeu COST 509, (1997) e pela (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB), (1989).

Para a obtenção de medições precisas, é imprescindível garantir que a superfície do concreto esteja isenta de contaminantes, como óleos e poeira. Além disso, as pontas das sondas devem permanecer úmidas, a fim de garantir um contato elétrico adequado entre o equipamento de medição e o material avaliado.

Tabela 2:Quantitativo de material para produção dos corpos de prova

RESISTIVIDADE (kΩ.cm)		
CEB-12	**COST 509**	**RISCO DE CORROSÃO**
> 20	> 100	Desprezível
10 a 20	50 a 100	Baixo
---	10 a 50	Moderado
5 a 10	< 10	Alto
< 5	---	Muito Alto

Fonte: Autor (2024).

2.6 Ensaio de Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão foi conduzido de acordo com a ABNT NBR 5739:2018, utilizando a prensa localizada no laboratório P02 da Universidade Estadual de Maringá, conforme ilustrado na Figura 5 Para a realização dos testes, foram moldados seis corpos de prova para cada traço de concreto, totalizando 72 amostras com dimensões de 10 × 20 cm.

Após 28 dias de cura em câmara úmida, os corpos de prova foram retificados para garantir superfícies regulares e adequadas ao ensaio. A pesquisa analisou a resistência à compressão axial de concretos com diferentes composições, considerando um traço de referência sem adição de cinza e cinco traços contendo Areia de Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar (ACBC), com substituições do agregado miúdo em 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Figura 5: Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autor (2024).

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização do Material Substituído

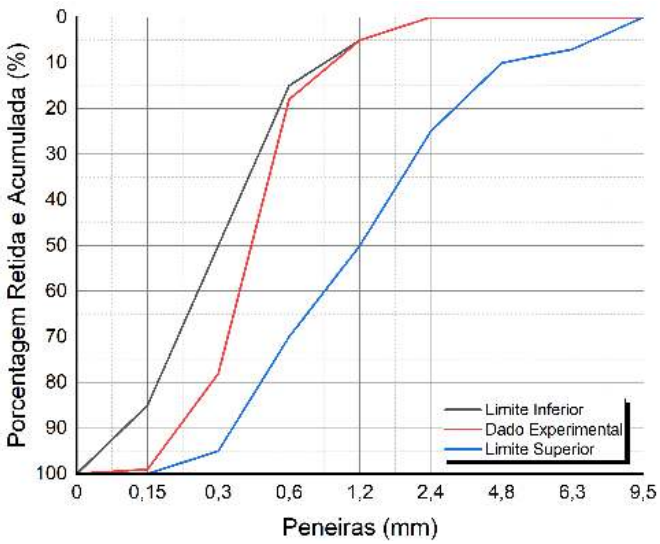
A Tabela 3 apresenta a caracterização do agregado miúdo, realizada conforme as normas ABNT NBR 17054:2022, ABNT NBR 16972:2021 e ABNT NBR 16916:2021. A Figura 6 exibe a curva granulométrica correspondente ao mesmo material, que foi parcialmente substituído pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar na composição do concreto.

Tabela 3:Caracterização do agregado miúdo

CARACTETÍSTICAS	UNIDADE	RESULTADOS
Massa Específica	g/cm 3	2,636
Massa Unitária no Estado Solto	g/cm 3	1,520
Diâmetro Máximo Característico	mm	1,200
Módulo de Finura	-	2,000

Fonte: Autor (2024).

Figura 6: Curva característica do agregado miúdo.



Fonte: Autor (2024).

3.2 Ensaios de resistência a compressão

Para a determinação da resistência à compressão foram ensaiados 6 corpos de prova para cada traço com as idades de 28 dias. Na tabela 4 é apresentado para a ideia de 28 dias.

Tabela 4 :Resistência a compressão média.

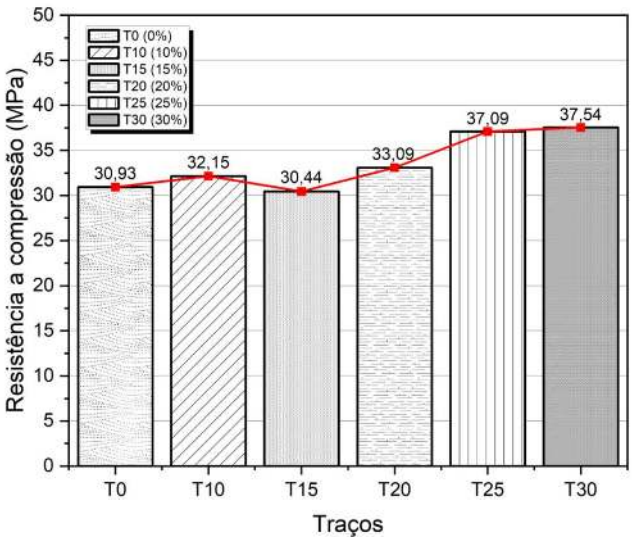
TRAÇO	Fcm (Mpa)	fck (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação
0%	30,93	29,36	0,95	0,55
10%	32,15	29,14	1,83	1,06
15%	30,44	26,72	2,25	1,31
20%	33,09	30,13	1,79	1,04
25%	37,09	33,78	2,01	1,17
30%	37,54	35,11	1,47	0,86

Fonte: Autor (2024).

A análise dos resultados apresentados na Tabela 4 e na Figura 7 apresenta um aumento da resistência à compressão do concreto com a substituição parcial do agregado miúdo. O traço de referência apresentou resistência aos 28 dias de 30,93 MPa. Os traços contendo substituições do agregado miúdo demonstraram desempenho superior, especialmente aqueles com 30% e 25% de substituição, indicando o potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) como um material alternativo para essa aplicação.

O traço com 15% de substituição apresentou valores semelhantes ao concreto de referência, o que pode estar associado a possíveis falhas na execução e moldagem ou à influência das condições ambientais no momento da produção, uma vez que a moldagem ocorreu em um dia chuvoso, fator que pode ter impactado o comportamento dos corpos de prova.

Figura 7: Gráfico dos valores de resistência a compressão.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 8, é apresentado um corpo de prova contendo 10% de ACBA como substituição do agregado miúdo, após o ensaio de compressão. Observa-se que a ruptura ocorreu em um ângulo aproximado de 45°, caracterizando um comportamento típico e esperado para concretos sob compressão axial. Esse tipo de falha indica um colapso controlado, associado à propagação das tensões cisalhantes dentro do material.

Por outro lado, rupturas irregulares, explosivas ou longitudinais podem ser indicativas de problemas como

segregação, defeitos internos ou falta de uniformidade na mistura do concreto, comprometendo sua qualidade estrutural.

Figura 8: Corpo de prova colapsado após o ensaio.



Fonte: Autor (2024).

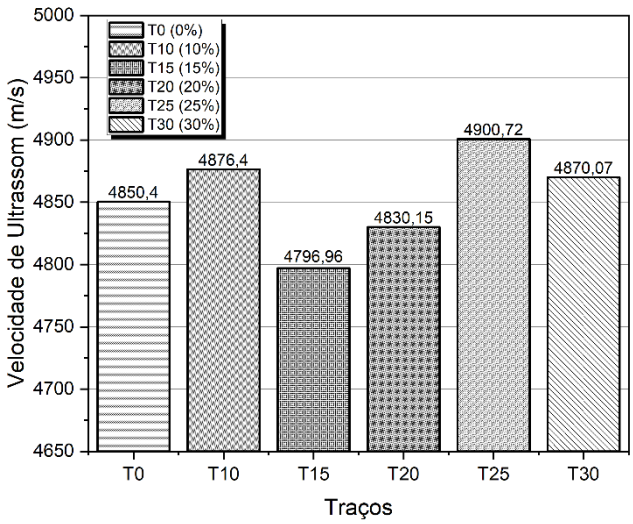
3.3 Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)

Após a realização dos ensaios, os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico foram obtidos e estão apresentados a seguir. A Figura 9 ilustra a comparação entre os diferentes traços, permitindo uma visualização clara da variação dos resultados.

As medições foram realizadas por meio de ensaios ultrassônicos, utilizando o equipamento Pundit Lab®, que possibilita a determinação do módulo de elasticidade dinâmico a partir da velocidade de propagação de ondas no material. Os corpos de prova analisados eram cilíndricos, com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, testados aos 28 dias de idade, garantindo a consistência dos resultados e permitindo uma avaliação comparativa entre os diferentes traços de concreto.

A utilização do ensaio ultrassônico é vantajosa por ser não destrutiva, possibilitando a avaliação das propriedades mecânicas do concreto sem comprometer sua integridade.

Figura 9: Gráfico dos valores da Velocidade do Pulso do Ultrassom (VPU).



Fonte: Autor (2024).

Para a realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, foram utilizados seis corpos de prova para cada traço, totalizando 36 amostras. A partir dos resultados obtidos, foi possível avaliar a qualidade do concreto e calcular o módulo de elasticidade, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes percentuais de substituição do agregado miúdo por cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

O maior valor registrado correspondeu ao traço T25 (25%), que atingiu 50,11 GPa como apresentado na Tabela 5, indicando um desempenho superior em relação ao traço de referência. Esse resultado corrobora a relação direta entre módulo de elasticidade e resistência característica do concreto, evidenciando que a substituição parcial do agregado miúdo pode contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas do material.

Por outro lado, os traços T15 (15%) e T20 (20%) apresentaram valores ligeiramente inferiores ao do concreto de referência, sugerindo que, para esses percentuais de substituição, a microestrutura resultante pode ter influenciado a rigidez do material. No entanto, a substituição de 25% demonstrou um desempenho otimizado, tornando-se uma alternativa promissora para aplicações estruturais, ao proporcionar um aumento significativo no módulo de elasticidade em comparação ao concreto convencional.

Tabela 5: Dados do módulo de elasticidade estático.

CEB-12	ULTRASSOM ED (GPa)
T0 (0%)	48,528
T10 (10%)	49,784
T15 (15%)	47,266
T20 (20%)	47,772
T25 (25%)	50,113
T30 (30%)	49,640

Fonte: Autor (2024).

3.4 Ensaio de resistividade elétrica

As amostras foram removidas dos moldes após 24 horas e acondicionadas em câmara úmida até a realização das medições, aos 28 dias de idade. Todas as avaliações de resistividade elétrica foram conduzidas com o concreto saturado, logo após sua retirada da câmara, garantindo que a superfície permanecesse umedecida. Esse procedimento seguiu as diretrizes especificadas pelas normas UNE 83988-2 (ASOCIACIÓN..., 2014a) e AASHTO T358 (AMERICAN..., 2019b), assegurando a uniformidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 10: Ensaio sendo realizado com o equipamento Resipod.

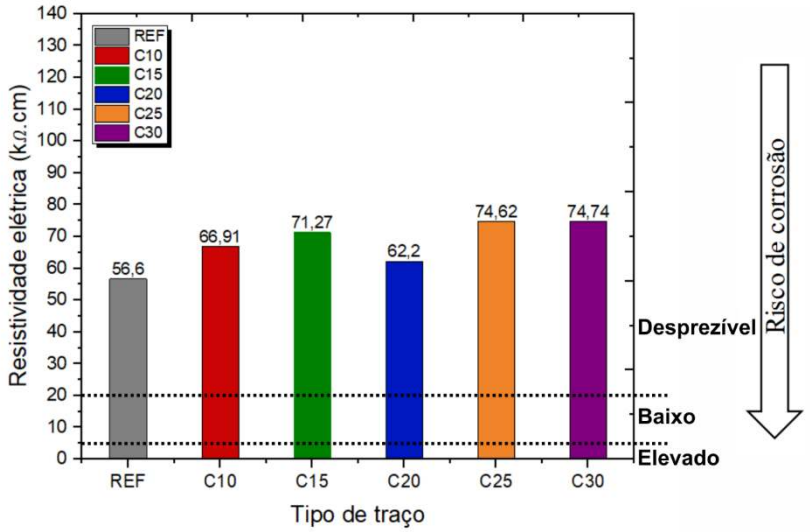


Fonte: Autor (2024).

Foram elaborados dois gráficos utilizando diferentes critérios de análise, visando proporcionar distintas

perspectivas sobre os resultados obtidos. Os critérios adotados foram baseados nas normativas CEB-192 e CE – COST 509, permitindo uma avaliação comparativa dos dados e uma melhor interpretação do comportamento do concreto em relação aos parâmetros de resistividade elétrica e durabilidade.

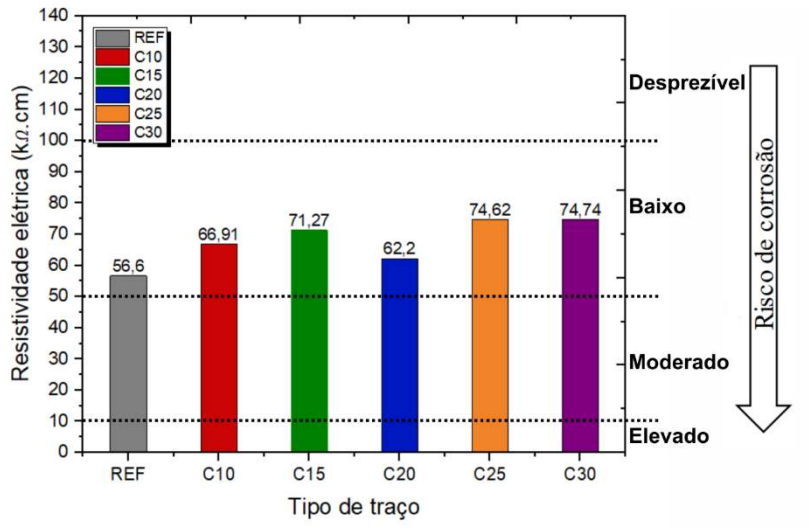
Figura 11 – Resultados do ensaio de resistividade elétrica, com critério de análise conforme CEB-192.



Fonte: Autor (2025)

Aos 28 dias de idade, foram verificadas variações nos valores de resistividade elétrica entre os diferentes traços analisados. Constatou-se que a substituição parcial da areia por ACBC resultou em um aumento expressivo da resistividade elétrica do concreto. Em comparação ao traço de referência, esse incremento foi de 18,22%, 25,93%, 9,90%, 31,84% e 32,06% para os traços contendo 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de ACBC, respectivamente. Os valores detalhados de resistividade elétrica para cada amostra estão apresentados nas Figuras 12 e 11.

Figura 12 – Resultados do ensaio de resistividade elétrica, com critério de análise conforme CE – COST 509.



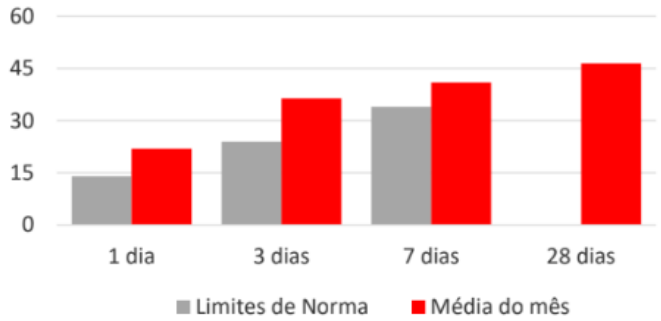
Fonte: Autor (2025)

4 DISCUSSÃO

4.1 Resistência a Compressão Axial

A figura abaixo corrobora os resultados apresentados nas Figuras 7, onde foram demonstrados os dados de resistência à compressão axial. Os resultados da Figura 13 refletem os dados fornecidos pela InterCement, empresa responsável pela linha CAUÊ, que produziu o cimento utilizado nesta pesquisa.

Figura 13 – Resultados do ensaio de resistência a compressão fornecido pela empresa fornecedora do cimento utilizado na pesquisa.



Fonte: Autor InterCement (2023)

Os resultados obtidos neste estudo indicam que os valores de resistência à compressão ficaram acima de 30 MPa, conforme recomendado pela norma, e próximos aos valores reportados pela empresa responsável pelos ensaios. Esses resultados demonstram a viabilidade da utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) como substituto parcial do agregado miúdo na formulação do concreto, sem comprometer sua performance em resistência mecânica.

Silvia et al. (2022) em sua pesquisa também obtiveram resultados positivos ao substituir 12% do agregado miúdo por ACBC, atingindo uma resistência à compressão de 21,30 MPa após 28 dias de cura. Esse estudo reforça o potencial do ACBC como substituto para o agregado convencional, contribuindo para a sustentabilidade do concreto sem comprometer suas propriedades mecânicas essenciais.

No estudo realizado por Moretti (2018), os efeitos da substituição do agregado miúdo por ACBC foram avaliados em argamassas aos 91 dias de idade. Os resultados de resistência à compressão para os traços com 10%, 20%, 30% e 40% de ACBC foram, respectivamente, 53,50 MPa, 54,60 MPa, 53,43 MPa e 56,97 MPa. Esses dados indicam que a adição de ACBC não apenas manteve os níveis de resistência à compressão, mas em alguns casos, contribuiu para um aumento significativo, evidenciando o potencial do material na melhoria das propriedades mecânicas das argamassas.

Esses estudos complementam os resultados deste trabalho, demonstrando a eficiência do ACBC em diferentes dosagens e tempos de cura, o que sugere que o material pode ser uma alternativa viável e sustentável para a produção de concretos e argamassas de alto desempenho.

4.2 Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)

A Tabela 6 apresenta uma classificação da qualidade do concreto com base na velocidade de propagação da onda ultrassônica. Segundo estudo de Rincon et al. (1998), citado por Valin Jr et al. (2017), a qualidade do concreto pode ser categorizada conforme a velocidade das ondas ultrassônicas. Os resultados apresentados na tabela indicam que, de maneira geral, o concreto apresentou excelente qualidade, destacando-se especialmente o traço com 25% de substituição do agregado miúdo por ACBC, que apresentou desempenho superior em comparação aos outros traços.

Tabela 6: Dados do módulo de elasticidade estático.

VELOCIDADE DA ONDA ULTRA-SÔNICA	QUALIDADE DO CONCRETO
V > 4500	Excelente
3500 < V < 4500	Ótimo
3000 < V < 3500	Bom
2000 < V < 3000	Regular
V < 2000	Ruim

Fonte: Rincon *et al* (1998) apud Valin Jr *et al* (2017).

Conforme afirmado por Júnior et al. (2018), a análise indicou que, em geral, o aumento da quantidade de agregado na mistura do concreto resulta em um maior módulo de elasticidade. Embora as variações observadas tenham sido sutis, os dados sugerem que, à medida que a porcentagem de substituição do agregado miúdo pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar aumentou, houve uma tendência de incremento no módulo de elasticidade.

4.3 Resistividade Elétrica – Resipod

A substituição parcial do agregado miúdo por cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) demonstrou um aumento significativo na resistividade elétrica do concreto, conforme os resultados obtidos nesta pesquisa. Para os traços com 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de substituição, os incrementos na resistividade elétrica em relação ao traço de referência foram de 18,22%, 25,93%, 9,90%, 31,84% e 32,06%, respectivamente. Esses resultados indicam que a presença de ACBC tem um impacto positivo na resistividade elétrica do concreto, o que pode estar relacionado a uma maior densificação da microestrutura ou alterações na distribuição da porosidade.

Essa tendência é corroborada por estudos realizados por Joshaghani e Moeini (2017), que investigaram a incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial ao cimento. Em suas pesquisas, os autores observaram aumentos consideráveis na resistividade elétrica das argamassas com o aumento da porcentagem de ACBC. Aos 91 dias de cura, os incrementos registrados foram de 34%, 76%, 114%, 159% e 172% para as misturas contendo 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de ACBC, respectivamente. Esses dados mostram uma tendência similar, evidenciando que a substituição do cimento por ACBC pode ter um efeito pronunciado na melhoria das propriedades elétricas dos materiais.

Segundo Moretti (2018), o aumento da resistividade elétrica em concretos contendo ACBC pode ser atribuído a diversos fatores, como a redução da porosidade interconectada e o aumento da tortuosidade dos caminhos condutivos. Além disso, a composição química da solução aquosa nos poros do concreto pode ter um papel fundamental nesse comportamento, afetando a condutividade iônica e, consequentemente, a resistividade elétrica. Esses fatores explicam o comportamento observado nesta pesquisa, em que o aumento na substituição do agregado miúdo por ACBC está diretamente relacionado a um aumento na resistividade elétrica, indicando uma microestrutura mais densa e menor conectividade entre os poros, o que reduz a facilidade de condução de corrente elétrica.

Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa alinham-se com os achados de outros estudos e reforçam a eficácia da ACBC como material alternativo, com potencial para melhorar a resistividade elétrica e, possivelmente, outras propriedades físicas do concreto. O uso de ACBC como substituto do agregado miúdo oferece uma opção promissora para otimizar as características do concreto, especialmente em contextos onde a resistência elétrica desempenha um papel importante, como em aplicações de concreto de alto desempenho ou concreto utilizado em ambientes agressivos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) como substituto parcial do agregado miúdo no concreto tem se mostrado uma alternativa sustentável e econômica. A ACBC, com granulometria semelhante à areia convencional e massa específica inferior, oferece vantagens ambientais e econômicas ao ser utilizada no concreto. Os ensaios realizados indicaram um aumento significativo na resistividade elétrica do concreto com a substituição por ACBC, especialmente nos traços com 25% e 30% de substituição. Isso sugere

melhorias nas propriedades físicas e elétricas do material, com potencial para aplicações que exigem resistência à condução elétrica.

A medição da resistividade elétrica foi fundamental para avaliar o desempenho do concreto com diferentes porcentagens de ACBC, e os resultados indicaram que a substituição não prejudica a qualidade do concreto. O traço com 25% de substituição obteve o melhor resultado, mostrando comportamento semelhante ao traço de referência. Futuras pesquisas são recomendadas para analisar o desempenho ao longo de um período de cura mais longo, além de avaliar a durabilidade, a resistência à carbonatação e o impacto nas armaduras do concreto. O estudo demonstra que a ACBC é uma opção promissora para a construção civil, com benefícios para a sustentabilidade e a economia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da bolsa de pesquisa, essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Sou grato à Universidade Estadual de Maringá (UEM), que ofereceu todo o suporte e apoio ao longo da pesquisa, além de me proporcionar a oportunidade de aprender com excelentes professores e colegas. À minha orientadora, Silvia Sossai Altoé, agradeço pela orientação criteriosa, pelo apoio constante e pelos conselhos valiosos durante todo o processo. Agradeço também ao Laboratório de Sedimentologia e Pedologia e ao GEMA (Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente) pelo suporte na realização do ensaio de granulometria a laser.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *AASHTO T 358: surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.* Washington, DC: AASHTO, 2019.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. *UNE 83988-2: durabilidad del hormigón – métodos de ensayo: determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: método de las cuatro puntas o de Wenner.* Génova: AENOR, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16916:2021: *Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=N1JOZk1UTDlFellzcFhCSTI3VUdIdTRVdjA4aXBDa2tLQStzQ3p1Sy9JMD0=. Acesso em: 31 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.* Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=WlRVTVphYi93dDhTK0IrL0dpY29mZW1HMnliY2E5Y0VuQ1FLZG9Hd0VMdz0%3D. Acesso em: 28 fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16972:2021: *Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=MnBjTHdBMGVZSi90eFJCNWhxYTlLRUN6cTREaTUxdTF4U1hiOUhnOExDcz0=. Acesso em: 31 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8802: concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.* Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=S0JwNStPS2pseXNVY3dKM0haRkpvRGVaSXA3M0I1UnRxK0JUYlhVVUNlST0=. Acesso em: 29 fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17054:2022: *Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=b0dsV0NuYlRZL1hEU2h2a2I1d2dyeERaUkZsa2RpNmswTDhpVGlLMTdlcz0=. Acesso em: 31 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.* Rio de Janeiro: ABNT, 2018. Disponível em: https://www.abntcatalogo.com.br/grd.aspx. Acesso em: 12 abr. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2023/24 – quarto levantamento.* v. 11. Brasília, DF: Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Disponível em: https://www.novacana.com/pdf/18042024090400_boletim-conab-180424_NC.pdf. Acesso em: 30 mar. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM G57-06(2012): standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method.* West Conshohocken: ASTM International, 2012. Disponível em: http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?G57-06R12. Acesso em: 1 dez. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM C597: standard test method for ultrasonic pulse velocity through concrete.* West Conshohocken: ASTM, 2022. Disponível em: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/114547/76b24324371c4c068e761ba60d8f40e7/ASTM-C597-22.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. *CEB Bulletins: a guide to the Comité Euro-International du Béton.* Lausanne: CEB, 1989. Disponível em: https://www.fib-international.org/publications/ceb-bulletins/a-guide-to-the-comit%C3%A9-euro-international-du-b%C3%A9ton-detail.html. Acesso em: 1 dez. 2024.

COST 509. *Corrosion and protection of metals in contact with concrete: final report.* Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1997. 148 p. ISBN 978-92-828-0252-6.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Em 2022, ocupação na indústria da construção cresce 4,4% e serviços especializados ganham participação no valor de obras do setor. Agência de notícias, 29 maio 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/40192-em-2022-ocupacao-na-industria-da-construcao-cresce-4-4-e-servicos-especializados-ganham-participacao-no-valor-de-obras-do-setor. Acesso em: 30 mar. 2025.

JOSHAGHANI, A.; MOEINI, M. A. Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 818–831, 15 out. 2017.

JÚNIOR, N. T. A. et al. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto através dos ensaios de resistência à compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. *Anais [...].* São Paulo: IBRACON, 2018. ISSN 2175-8182.

LIMA, Karen Lopes. *Estudo da viabilidade técnica do concreto autoadensável com aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2020.

MORETTI, Juliana Petermann. *Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de desenvolvimento sustentável. As Nações Unidas no Brasil. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 8 abr. 2024.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. *Areia e sustentabilidade: 10 recomendações estratégicas para evitar uma crise.* Disponível em: http://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/areia-e-sustentabilidade-10-recomendacoes-estrategicas-para-evitar-uma-crise. Acesso em: 23 mar. 2024.

PROCEQ. *Instruções de operação: Resipod.* Schwerzenbach, Suíça: Proceq, 2017. Disponível em: https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf. Acesso em: 2 dez. 2024.

SILVA, D. A. M. da et al. Análise da resistência à compressão de concretos incorporados com cinza de bagaço de cana-de-açúcar. *UNIFUNEC Científica Multidisciplinar*, v. 11, n. 13, p. 1–10, nov. 2022.

VALIN JÚNIOR, M. de O. et al. Aplicação de ensaios não destrutivos de concreto para avaliação estrutural da fundação de torre de linha de transmissão. *Engineering and Science*, v. 6, n. 2, p. 46–59, nov. 2017.

VENNESLAND, Ø.; RAUPACH, M.; ANDRADE, C. Recommendation of RILEM TC 154-EMC: “Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete” — measurements with embedded probes. *Materials and Structures*, v. 40, n. 8, p. 745–758, abr. 2007.