XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8839

Análise do desempenho mecânico de argamassas empregando resíduo agroindustrial: uma alternativa sustentável para a construção

Analysis of the mechanical performance of mortars using agroindustrial waste: a sustainable alternative for construction

Maria Gabrielly Souza Astofe
UFMT | Barra do Garças | Brasil | maria.astofe@sou.ufmt.br
Mariana Correa Posterlli
UFMT | Barra do Garças | Brasil | mariana.posterlli@ufmt.br

Resumo

A crescente demanda por práticas sustentáveis na construção civil tem impulsionado estudos sobre materiais alternativos que reduzam o consumo de recursos naturais e as emissões de CO_2. Este trabalho teve como objetivo analisar a utilização de cinzas de biomassa - coletadas de uma biorrefinaria - em argamassas, em comparação com a argamassa convencional, a fim de avaliar a viabilidade técnica e a influência de sua incorporação. Foram realizados ensaios de caracterização, incluindo granulometria, densidade do agregado e absorção, massa específica do cimento e das cinzas, além de análises químicas e mineralógicas por meio do FRX e DRX. Também foram conduzidos ensaios mecânicos de resistência à compressão e à tração na flexão. Para a análise experimental, adotou-se uma substituição parcial de 50% da cal. Os resultados indicaram aumento da resistência mecânica, associado principalmente ao efeito físico das cinzas, uma vez que não foi observada reatividade pozolânica significativa.

Palavras-chave: Argamassa. Cinzas de biomassa. Sustentabilidade. Resistência mecânica. Recursos naturais.

Abstract

The increasing demand for sustainable practices in the construction industry has driven studies on alternative materials aimed at reducing the consumption of natural resources and CO_2 emissions. This study aimed to analyze the use of biomass ash -, collected from a biorefinery -, in the production of mortars, in comparison with conventional mortar, in order to evaluate its technical feasibility and the influence of its incorporation. Characterization tests were carried out, including granulometric analysis, density and water absorption of the aggregate, specific gravity of the cement and ashes, as well as chemical and mineralogical analyses by X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD). Mechanical tests, including compressive strength and flexural tensile strength, were also performed. For the experimental analysis, a partial replacement of 50% of lime was adopted. The results indicated an increase in mechanical strength, mainly associated with the physical effect of the ashes, since no significant pozzolanic reactivity was observed.

Keywords: Mortar. Biomass ash. Sustainability. Mechanical strength. Natural resources.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é um dos setores mais relevantes para a economia do país e um dos que mais consomem os recursos naturais do mundo. De acordo com o *World Business Council for Sustainable Development* (2023) [1], o ambiente construído é responsável por cerca de 40% das emissões de CO_2, do uso de recursos naturais e da geração de resíduos. Com o desenvolvimento contínuo das áreas urbanas, esses índices tendem a aumentar, reforçando a necessidade da adoção de práticas sustentáveis no setor de construção civil, a fim de mitigar os impactos ambientais.

A cal é uma das substâncias químicas mais utilizadas mundialmente, sendo amplamente empregada nos setores metalúrgico, químico e da construção civil [2]. Entre os principais impactos associados à produção de cal estão as emissões atmosféricas geradas pelo processo de calcinação, como dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO). Além disso, o processo apresenta elevado consumo energético, geração de resíduos e modificações ambientais decorrentes da extração do minério [3, p.224].

Segundo a *United States Geological Survey* (2026) [4], em 2025 a produção global de cal foi de cerca de 420 milhões de toneladas, sendo os principais países produtores China, Índia, Estados Unidos, Rússia e o Brasil. Um eventual aumento dessa produção pode resultar em crescimento semelhante das emissões de CO_2 associadas ao setor, caso não sejam implementadas soluções alternativas e sustentáveis. Nesse contexto, a sustentabilidade ambiental envolve a redução do consumo de recursos não renováveis, a diminuição da geração de resíduos e da poluição e a adoção de tecnologias mais limpas [5, p.23].

Paralelamente ao setor da construção, a agroindústria brasileira tem registrado expansão significativa das biorrefinarias de etanol, especialmente de milho, impulsionando a produção de biocombustíveis com menor emissão de carbono. De acordo com a Agência Internacional de Energia - AIE (2023, p.12) [6], a expansão dos biocombustíveis no Brasil é responsável por cerca de 40% da projeção de crescimento até 2028. Nesse cenário, a queima de biomassa nas caldeiras dessas unidades gera grande volume de cinzas, que necessitam de destinação adequada. Diversos estudos indicam o uso de resíduos agroindustriais como materiais aglomerantes ou agregados em argamassa e concreto, como, por exemplo, escória de alto-forno, cinzas volantes e sílica ativa, cinzas de casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, palha e espiga de milho e madeira ([7], [8], [9], [10], [11], [12]).

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e a influência da incorporação das cinzas, coletadas na caldeira de uma biorrefinaria de etanol de milho, na argamassa, por meio da substituição parcial da cal. Dessa forma, além de proporcionar um destino ambientalmente adequado e mais acessível ao resíduo das caldeiras, poderá promover uma solução alternativa, com potencial para redução da utilização de recursos naturais e das emissões de carbono.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais empregados na pesquisa consistem em, areia natural lavada na fração média, cal hidratada CH - III da marca Itaú, Cimento Portland do tipo CP II - F - 32 da marca Tocantins, todos obtidos de fornecedores locais em Barra do Garças - MT. As

cinzas foram retiradas de uma caldeira e fornecidas por uma biorrefinaria localizada no estado do Mato Grosso.

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

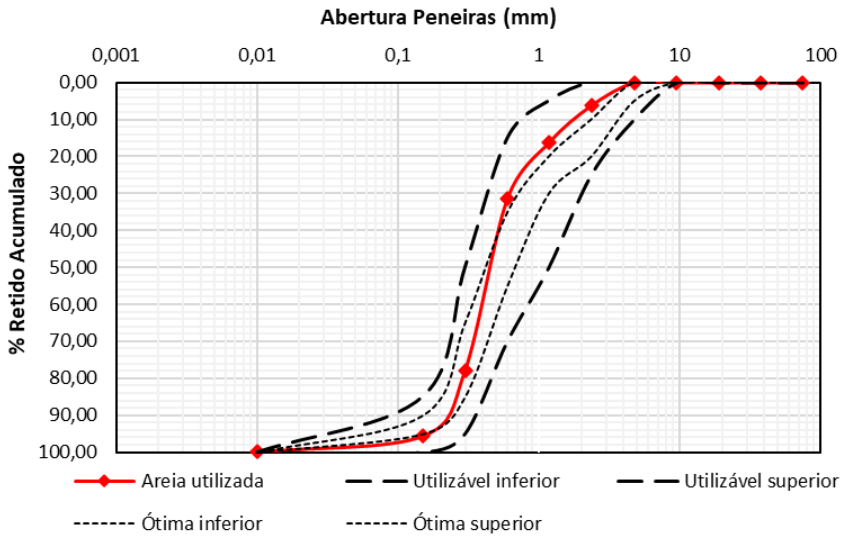
Para a caracterização dos agregados, foram realizados ensaios de granulometria e ensaios de densidade e de absorção de água. Os ensaios de granulometria foram realizados conforme a NBR 17054 [13], com o objetivo de determinar a distribuição granulométrica e o módulo de finura (MF). Já o ensaio de densidade e da absorção de água, ocorreu de acordo com os requisitos da NBR 16916 [14], com a finalidade de determinar a densidade do agregado na condição seca, na condição saturada superfície seca e a taxa de absorção de água. Na Tabela 1, é apresentada a caracterização do agregado e, na Figura 1, é ilustrada a sua distribuição granulométrica.

Tabela 1: Caracterização física do agregado miúdo

Propriedade	Resultado	Unidade
Módulo de finura (MF)	2,27	-
Massa específica (seca)	2,61	g/cm³
Massa específica (SSS)	2,62	g/cm³
Absorção de água	0,55	%

Fonte: os autores.

Figura 1: Curva granulométrica



Fonte: os autores.

A caracterização do cimento e das cinzas foi realizada de acordo com as especificações da NBR 16605 [15], com o objetivo de determinar a massa por unidade de volume do material. As amostras de cinzas consideradas para o ensaio foram inicialmente submetidas à secagem em estufa e em seguida, foram moídas através de um almofariz e pistilo até as frações passantes nas peneiras de 150 µm e 300 µm. De acordo com os valores apresentados na Tabela 2, é possível observar que as cinzas apresentam massa específica menor em relação ao cimento, indicando menor densidade.

Tabela 2: Caracterização dos materiais em pó

Material	Massa (g)	V (cm^3)	ρ(g/cm^3)
Cimento	60	20,00	3,01
Cinzas	50	20,50	2,44

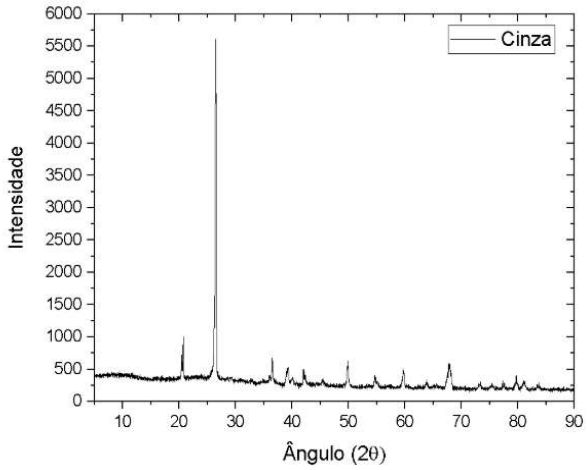
Fonte: os autores.

Além disso, a composição mineralógica das cinzas foi determinada por meio de difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro operando com radiação CuKα (λ = 1,540598 Å), na faixa de 5 a 90° (2θ), com passo de varredura angular de 0,0217° e tempo de contagem de 23,97s a cada passo.

A análise do difratograma apresentado na Figura 2, indica a presença de um pico de elevada intensidade em torno de 26° (2θ), característico da fase cristalina do Quartzo (SiO_2). Os picos de menor intensidade observados, sugerem a presença de fases cristalinas secundárias, possivelmente vinculadas aos óxidos identificados na análise química do ensaio de Fluorescência de Raios - X (FRX).

A composição química das cinzas pode ser observada na Tabela 3. A partir desses resultados, verificou-se que as cinzas não atendem aos requisitos mínimos para classificação como material pozolânico, conforme a NBR 12653 [16], visto que a soma dos óxidos SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 foi de 30,418%, valor inferior ao limite estabelecido para a classe E.

Figura 2: DRX das cinzas



Fonte: os autores.

Tabela 3: Composição química das cinzas

Composto	Teor (%)
SiO2	17,208
Al2O3	7,742
Fe2O3	50,468
CaO	2,888
K2O	2,34
TiO2	1,137
P2O5	0,929
MgO	0,435
SO3	0,267
Outros	0,188
Total	38,60

Fonte: os autores.

DOSAGEM DAS MISTURAS

A dosagem da argamassa seguiu o método teórico IPT/EPUSP [17], sendo adotado, para a argamassa testemunha, o traço 1:1:6 (em volume). Dessa forma, foi definido como variável para a estruturação da análise experimental uma substituição parcial da cal em 50%, tendo as proporções 1:0,5:0,5:6 (em volume). Na Tabela 4 é mostrada a quantidade de materiais das misturas analisadas para a produção de 1 m^3 de argamassa.

Tabela 4: Proporções dos materiais em massa

Materiais	Argamassa testemunha (kg)	Argamassa com cinzas (kg)
Cimento	247,91	247,91
Cal	443,76	221,88
Cinzas	0,00	221,88
Areia	1328,8	1328,8
Água	384,26	384,26

Fonte: os autores.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

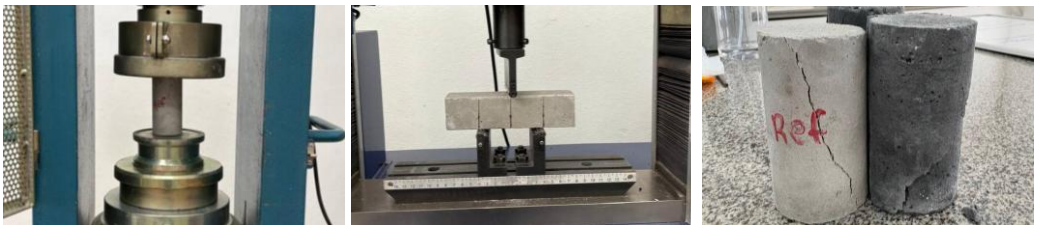
Para cada traço, foram moldados 12 corpos de prova, sendo 6 com dimensões cilíndricas de 5X10 cm, destinados ao ensaio de compressão, e 6 prismáticas de 4x4x16 cm, para o ensaio de tração na flexão. Os processos de moldagem seguiram as especificações da NBR 13279 [18].

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura úmida em solução saturada de $Ca(OH)_2$ por 28 dias. Ao final desse período, os corpos de prova foram retificados com o auxílio de esmerilhadeira e submetidos aos ensaios de compressão e de tração na flexão.

Os ensaios de compressão foram realizados por meio de uma prensa hidráulica calibrada, capaz de aplicar força de forma contínua, conforme as especificações da NBR 7215 [19], até a ruptura dos corpos de prova.

Para os ensaios de resistência à tração na flexão, os corpos de prova prismáticos foram apoiados em um sistema de flexão em três pontos, com distância entre os apoios foi de 8 cm, de modo a evitar a ocorrência de tensões de torção durante o ensaio, em conformidade com [18]. Na Figura 3, estão apresentados os registros dos ensaios.

Figura 3: Registros fotográficos do ensaio de compressão, (à esquerda); ensaio de tração na flexão (ao centro); e da comparação visual entre os corpos de prova (à direita).



Fonte: os autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

De acordo com EFNARC (2002) [20], a definição de adição refere-se a um material inorgânico finamente dividido, com o objetivo de melhorar determinadas propriedades. Além disso, essa classificação distingue dois tipos de adições: tipo I, correspondente a materiais praticamente inertes e o tipo II, referente a materiais com atividade pozolânica ou hidráulica latente.

A partir da análise dos resultados obtidos pelo DRX e o FRX, verificou-se, através dos critérios estabelecidos pela NBR 12653, que as cinzas não atendem aos requisitos necessários para serem classificadas como materiais pozolânicos. Dessa forma, as cinzas podem ser consideradas como adições do tipo I, atuando predominantemente como material de preenchimento. Nesse contexto, sua incorporação pode promover o efeito fíler, contribuindo para reduzir a retração, melhorar a trabalhabilidade e preencher vazios [21, p.27].

DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

A resistência à compressão foi determinada pela relação da carga máxima aplicada em cada corpo de prova e a área de sua seção transversal. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados do Ensaio de resistência à compressão

Amostra	Argamassa testemunha (Mpa)	Argamassa com cinzas (Mpa)
1	4,70	7,84
2	4,75	7,34
3	5,65	7,54
4	4,25	7,14
5	5,85	7,09
6	5,80	5,65
Média	5,16	7,10
Desvio Padrão	0,68	0,77

Fonte: os autores.

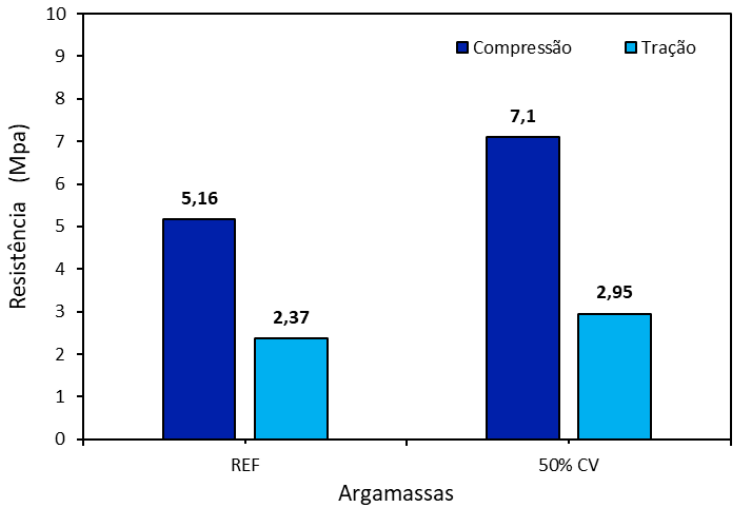
A resistência à tração na flexão foi determinada pela relação apresentada na norma [18]. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6. Nas Figuras 4 e 5, apresentam-se, respectivamente, o resumo dos resultados dos ensaios de resistência para cada argamassa e a correlação entre a resistência mecânica e a massa específica dos materiais.

Tabela 6: Resultados do Ensaio de resistência à tração na flexão

Amostra	Argamassa testemunha (Mpa)	Argamassa com cinzas (Mpa)
1	2,44	3,05
2	2,28	2,93
3	2,49	2,21
4	2,52	3,13
5	2,26	3,35
6	2,21	3,03
Média	2,37	2,95
Desvio Padrão	0,13	0,39

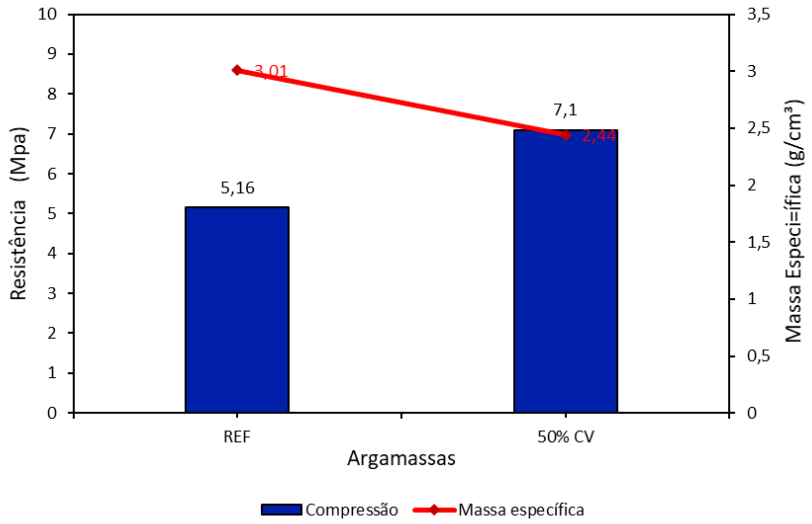
Fonte: os autores.

Figura 4: Resistência à compressão das argamassas produzidas



Fonte: os autores.

Figura 5: Correlação entre resistência e massa específica



Fonte: os autores.

Ao analisar, é possível identificar que a argamassa testemunha apresentou uma boa viabilidade técnica, cumprindo com a média esperada. Entretanto, ao adicionar as cinzas, a resistência aumentou de forma notória. Para averiguar se de fato existe uma diferença entre as médias das amostras, foi realizado uma análise de Variância (ANOVA), uma técnica estatística de comparação. Foi utilizado os métodos, ANOVA One - Way e o teste de Tukey, onde os resultados são apresentados pela Tabela 7 e 8:

Tabela 7: Resultados da Análise de Variância à compressão

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcal.	Ftab (5%)
Entre Grupos	1	11,29	11,29	21,48	4,96
Dentro dos grupos	10	5,26	0,53	-	-
Total	11	16,55	-	-	-

Fonte: os autores.

Tabela 8: Resultados da Análise de Variância à tração

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcal.	Ftab (5%)
Entre Grupos	1	1,02	1,02	12,10	4,96
Dentro dos grupos	10	0,84	0,08	-	-
Total	11	1,86	-	-	-

Fonte: os autores.

Considerando que a Hipótese nula adotada estabelece que as média dos dois ensaios são iguais, e a hipótese alternativa que elas são diferente, o valor calculado de F (razão entre a média quadrática entre grupos e a média quadrática dentro dos grupos) é superior ao valor crítico de F, inviabilizando portanto a hipótese nula.

No teste de Tukey, verificou-se que a diferença entre as médias foi superior à diferença mínima significativa (Δ), rejeitando-se, assim, a hipótese de igualdade entre as médias. Dessa forma, os resultados confirmam a existência de diferença entre os grupos, em conjunto com a ANOVA, conclui-se que a diferença observada é estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

EMISSÕES DE CARBONO

De acordo com o SIAC (2022) [22], a etapa de calcinação, responsável pela descarbonatação do calcário, constitui a principal fonte de emissões de CO_2 no processo produtivo da cal. A Tabela 9 apresenta as emissões mínimas, máximas e médias dos diferentes tipos de cal, evidenciando que a cal hidratada CH-III, utilizada na produção das argamassas desta pesquisa, apresenta uma emissão média de 503,9 $KgCO_2$ por tonelada de cal produzida.

Tabela 9: Emissões do processo químico de descarbonatação do calcário

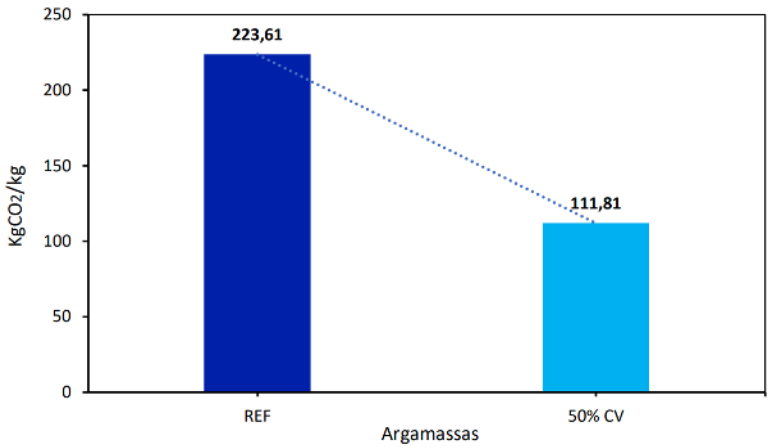
Tipo	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Cal virgem comum	464,3	789,4	626,8	93,86
Cal virgem especial	583,5	913,8	748,7	95,35
Cal Hidratada - CHI	481,9	696,1	589,0	61,86
Cal Hidratada - CHII	470,6	711,7	591,1	69,60
Cal Hidratada - CHIII	365,8	642,0	503,9	79,72

Fonte: Siac, 2022.

Paralelamente, as biorrefinarias de etanol de milho vêm adotando estratégias sustentáveis de descarbonização, como a implementação de tecnologias de captura e armazenagem de carbono de bioenergia (BECCS), capazes de capturar o dióxido de carbono gerado durante o processo industrial, para posteriormente serem aproveitados na produção de metanol verde [23]. Nesse contexto, a utilização das cinzas proveniente das caldeiras representa a valorização de um resíduo agroindustrial já existente, evitando emissões adicionais associadas à sua utilização.

Com base nessa análise, a Figura 6 evidencia que a substituição parcial da cal por cinzas proporcionou uma redução aproximada de 50% de emissões de CO_2 associadas a esse componente, considerando as quantidades empregadas na produção de 1 m^3 de argamassa.

Figura 6: Estimativa de emissões de CO_2 das argamassas produzidas.



Fonte: os autores.

CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a incorporação das cinzas provenientes de uma biorrefinaria na composição da argamassa, em substituição da cal.

A argamassa contendo cinzas demonstrou desempenho superior em comparação à argamassa convencional, resultado que pode ser vinculado às características físicas do material. Observou-se que as cinzas possuem massa específica inferior à do cimento, indicando que uma mesma quantidade em massa ocupa um volume maior na mistura favorecendo uma melhor distribuição das partículas. Esse comportamento é característico do conceito de empacotamento de partículas, amplamente utilizado para melhorar a microestrutura do concreto.

Embora os resultados de DRX e FRX indiquem que as cinzas não apresentaram reatividade significativa, seus teores de sílica, ferro e aluminatos, aliados à sua atuação e sua atuação física, podem justificar o aumento de resistência mecânica observado nas argamassas. Segundo Lopes (2019) [24], o uso de materiais suplementares, como fíler, pozolanas e escória, está associado à sustentabilidade, pois possibilita a produção de argamassas e concretos com menor emissão de carbono, uma vez que pode substituir o cimento ou a cal. Dessa forma, conclui-se que as cinzas utilizadas, mesmo nas condições de incineração não controlada, apresentam potencial significativo para substituição parcial da cal.

Além disso, as estimativas das emissões de CO_2 associadas à utilização da cal em argamassas indicou que a valorização desse subproduto industrial pode apresentar uma alternativa sustentável, tanto pela redução da demanda por materiais convencionais quanto para diminuição das emissões de carbono relacionadas à produção de argamassas na construção civil.

No entanto, os resultados indicam que o material ainda apresenta um comportamento passível de maior investigação, sendo importante ressaltar, a necessidade de novos ensaios para avaliação de outras propriedades, como aderência, consistência e durabilidade, a fim de proporcionar uma análise mais completa do material.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Mato Grosso.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou o ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5) para a tradução e melhoria de coesão do texto. Após a utilização da ferramenta/serviço, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. T**he Roadmap to Nature Positive:** Foundations for the built environment system. Genebra: WBCSD, c2023. Disponível em: https://www.wbcsd.org/resources/the-roadmap-to-nature-positive-foundations-for-the-built-environment-system/. Acesso em: 15 fev. 2026.

[2] OATES, J. A. **Lime and limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses**. Weinheim: Wiley VCH, 1998.

[3] EUROPEAN COMMISSION. **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide**. Seville: European IPPC Bureau, 2013. Disponível em: https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf. Acesso em: 02 mai. 2026.

[4] UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Lime Statistics and Information. **National Minerals Information Center:** Washington, 2026. Disponível em: Mineral Commodity Summaries 2026. Acesso em: 02 mai. 2026. Base de dados.

[5] SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente**. 1. ed. São Paulo: Studio Nobel/FUNDAP, 1993.

[6] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em:https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf. Acesso em: 18 fev. 2026.

[7] GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 515-524, 2007. Disponível em: doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001. Acesso em: 18 fev. 2026.

[8] DEPAA, R. B. *et al*. Assessment of strength properties of concrete made with rice husk ash. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, p. 12–15, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320403220?via%3Dihub. Acesso em: 18 fev. 2026.

[9] GUPTA, P.; WIRQUIN, E.; BOKHOREE, C. Case studies in construction materials sustainable concrete: potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 14, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00545 . Acesso em: 18 fev. 2026.

[10] LIMA, C. P. F.; CORDEIRO, G. C. Evaluation of corn straw ash as supplementary cementitious material: Effect of acid leaching on its pozzolanic activity. **Cement**, Rio de Janeiro, v. 4, 2021. DOI 10.1016/j.cement.2021.100007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cement.2021.100007. Acesso em: 18 fev. 2026.

[11] BHEEL, N. *et al*. Utilization of Corn Cob Ash as Fine Aggregate and Ground Granulated Blast Furnace Slag as Cementitious Material in Concrete. **Buildings**, Basel, v. 11, 2021. DOI 10.3390/edifícios11090422. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings11090422 . Acesso em: 18 fev. 2026.

[12] NESI, A. P. M. *et al*. Estudo do potencial de utilização de cinzas provenientes da queima de biomassa de madeira em argamassas, 18., 2025. in: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. **Anais[...]** Curitiba: Even3, 2025. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/ebramem18/1024349-estudo-do-potencial-de-utilizacao-de-cinzas-provenientes-da-queima-de-biomassa-de-madeira-em-argamassas. Acesso em: 04 mai. 2026.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados: Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR **16916:** Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: 2021.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: 2017.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: 2015.

[17] TUTIKIAN, B. F; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. in: Geraldo C. Isaia (Org.). Concreto: **Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011, cap. 12, p. 415-451.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: 2005.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: 2019.

[20] EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. Farnham: EFNARC, 2002. Disponível em: https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/c.especiais/Efnarc.pdf. Acesso em: 05 mai. 2026.

[21] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Cement and Concrete Terminology**. Detroit: ACI Committee 116, 2000.

[22] MARTINS, K. H; PUNHAGUI, K. R. G; JOHN, V. M. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção:** cal. São Paulo: Sidac, 2022. Disponível em: https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Cal.pdf. Acesso em: 02 jul 2026.

[23] UNIÃO NACIONAL DO ETANOL DE MILHO. Cuiabá: c2026. Disponível em: UNEM | União Nacional do Etanol de Milho. Acesso em: 02 jul 2026.

[24] LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland.** 2019. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-04072019-123140/. Acesso em: 05 maio 2026.