

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CINZA DE FUNDO TERMOTRATADA PROVENIENTE DA QUEIMA DE BIOMASSA EM LEITO FLUIDIZADO EM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

Caroline Fiordalisi Zuchi¹, Maria Eduarda Gonçalves¹, Andrea Murillo Betioli², Juliana Machado Casali², Cristiana Gonilho Pereira³

¹Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil (caroline.fz@aluno.ifsc.edu.br)

¹Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil (maria.g18@aluno.ifsc.edu.br)

²Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

³Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Barreiro Portugal

Resumo: O estudo avaliou a adição de 5 e 10% de cinza de fundo proveniente da combustão de biomassa em leito fluidizado, após tratamento térmico, em argamassas de assentamento, em relação à massa de cimento. A incorporação da cinza mostrou-se tecnicamente viável, promovendo melhorias nas propriedades mecânicas e microestruturais. A formulação com 10% apresentou a maior resistência, menor porosidade, além de reduzir o índice de intensidade do ligante, aumentando a ecoeficiência das argamassas.

Palavras-chave: cinza de biomassa; argamassa de assentamento; resíduos agroindustriais; sustentabilidade; propriedades mecânicas.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais e energia. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2026), o setor de edificações e construção é responsável por cerca de 37% das emissões globais de CO₂ e por aproximadamente 50% da extração mundial de materiais. Diante desse cenário, torna-se fundamental a adoção de estratégias voltadas ao uso eficiente dos recursos naturais e à redução dos impactos ambientais associados ao setor. Nesse contexto, a economia circular propõe um modelo capaz de reduzir a geração de resíduos, promover a reinserção de subprodutos na cadeia produtiva e estimular o uso mais eficiente dos recursos, tornando-se uma importante ferramenta para o alcance dos “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável” (ODS).

Entre os materiais mais usados na construção civil, temos o cimento Portland que é amplamente utilizado na produção de concretos e argamassas. Porém, sua fabricação está entre os processos com maior impacto ambiental, em especial pela produção de clínquer que resulta em elevadas emissões de dióxido de carbono (CO₂) e pelo intenso consumo de matérias-primas naturais, reduzindo a vida útil das jazidas (Barboza; Almeida Filho, 2015). Desse modo, novas estratégias estão sendo estudadas para reduzir o consumo de cimento Portland, destacando-se a substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios

suplementares e a utilização de materiais minerais finos capazes de modificar o empacotamento e a estrutura porosa das matrizes cimentícias (Scrivener, John, Gartner, 2018).

Dentre os materiais com elevado potencial de aproveitamento, destacam-se as cinzas de fundo provenientes de centrais de queima de biomassa. Entretanto, a destinação principal dessas cinzas ainda ocorre em aterros, prática que, além de gerar impactos ambientais, representa a perda de um material com grande potencial de reutilização, (Tarelho et al., 2012). Nesse contexto, a incorporação dessas cinzas em materiais cimentícios, tanto como substituição parcial do cimento quanto como adição mineral ou componente granular apresenta-se como uma alternativa promissora para sua valorização, contribuindo simultaneamente para a redução do seu descarte e do consumo de matérias-primas convencionais.

Estudos têm investigado a incorporação de cinzas provenientes de queima de biomassa em materiais cimentícios, principalmente como substitutas parciais do cimento Portland. Essa estratégia tem se mostrado uma alternativa promissora para a redução do consumo de clínquer, valorizando um resíduo que seria destinado ao descarte e diminuindo os impactos ambientais associados à produção do cimento Portland (Velardo et al., 2024). Contudo, o bom desempenho na produção de argamassas depende das características físicas, químicas e mineralógicas das

cinzas, bem como o teor de substituição empregado. Além disso, a moagem das cinzas promove um beneficiamento reduzindo o tamanho das partículas e melhora sua distribuição granulométrica, favorecendo tanto o efeito filer quanto o potencial de utilização das cinzas em matrizes cimentícias (Vaske, 2012).

A utilização da cinza como substituição parcial do cimento Portland depende, entre outros fatores, de sua atividade pozolânica. Essa propriedade determina a capacidade do material de participar das reações químicas de hidratação do cimento Portland, contribuindo para o ganho de resistência mecânica e para a durabilidade dos materiais cimentícios NBR 12653 (ABNT, 2014). Portanto, a avaliação da atividade pozolânica torna-se fundamental para verificar a viabilidade do uso da cinza como material ativo suplementar. No entanto, nem todas as cinzas de biomassa apresentam reatividade suficiente para serem classificadas como materiais pozolânicos. Quando a atividade pozolânica é baixa, os efeitos da cinza sobre a argamassa podem estar predominantemente associados a mecanismos físicos ou a alterações nas proporções volumétricas da mistura.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de argamassas de assentamento produzidas com incorporação de cinza de queima de biomassa, investigando sua utilização como adição mineral, sem comprometer as propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido.

MATERIAL E MÉTODOS

O programa experimental, realizado na Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal, em Portugal, consistiu na avaliação do comportamento de argamassas de assentamento produzidas com incorporação de cinza de fundo provenientes da queima de biomassa em central de leito fluidizado, visando analisar a influência desse resíduo nas propriedades no estado fresco e no estado endurecido das argamassas.

Os materiais utilizados na composição das argamassas foram: cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5N, areia grossa de dimensão nominal 0/4mm, areia fina de dimensão nominal 0/2mm, água e cinza de fundo.

O cimento Portland utilizado possui massa específica aparente de $3,14 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária de $1,20 \text{ g/cm}^3$, conforme informações fornecidas pelo fabricante. O agregado miúdo utilizado consistiu em uma combinação de dois agregados miúdos naturais (71% areia grossa - 0/4mm - e 29% de areia fina - 0/2mm), cuja combinação apresentou massa específica aparente de $2,50 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária de

$1,59 \text{ g/cm}^3$. A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica da composição utilizada.

Já a cinza utilizada no estudo foi fornecida por uma indústria portuguesa do setor de papel e celulose que empregava fibra de eucalipto-comum como matéria-prima. As amostras foram coletadas após o processo de produção de pasta de papel, sendo provenientes da queima de biomassa em central de leito fluidizado (Jasper, 2024). Para utilização dessa cinza na composição das argamassas, foi necessário realizar a caracterização física do material. Inicialmente, avaliou-se a distribuição granulométrica por peneiramento mecânico da cinza em seu estado natural, utilizando peneiras com aberturas de 4,00; 2,00; 0,25; 0,125 e 0,063 mm, em conformidade com a (NP EN 933-1, 2000) e apresentado na Figura 1

A Figura 1 mostra a distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado (composição das areias naturais) e da cinza empregada no estudo.

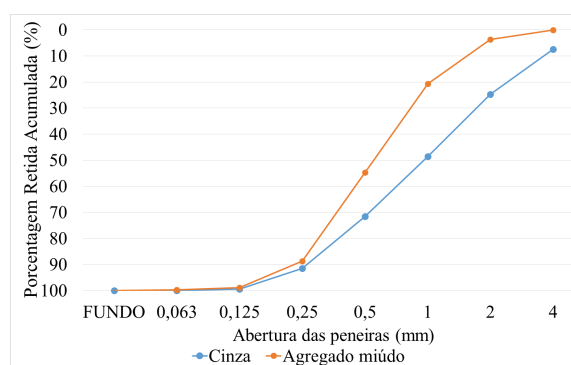


Figura 1. Distribuição granulométrica do agregado miúdo e da cinza utilizada.

Posteriormente, a cinza passou por tratamento térmico em mufla a $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 5 horas (Figura 2), com a finalidade de realizar o ensaio de perda ao fogo (*Loss on Ignition* - LOI) e eliminar resíduos de matéria orgânica presentes no material. O procedimento foi conduzido com base na NBR NM 18 (ABNT, 2012), porém com adaptação da temperatura de ensaio, uma vez que a norma recomenda temperatura de $(950 \pm 50)^{\circ}\text{C}$. A utilização de $(850 \pm 50)^{\circ}\text{C}$ ocorreu em função das limitações operacionais do laboratório. Consequentemente, o resultado deve ser interpretado como perda de massa nas condições modificadas do ensaio, não sendo diretamente equivalente ao valor normativo de perda ao fogo. Para essa etapa, bem como para a caracterização física, foi utilizada a fração do material com granulometria menor ou igual a 0,063 mm, correspondente ao material empregado na produção das argamassas.

Foram realizadas medições de massa em intervalos de uma hora, durante o ensaio, com o objetivo de

acompanhar a variação da perda de massa ao longo do tratamento térmico. Esse procedimento permitiu verificar a evolução da queima da matéria orgânica presente no material e identificar o tempo necessário para obtenção de uma perda de massa considerada satisfatória, evitando a permanência do material em mufla por períodos superiores ao necessário. A perda de massa não foi atribuída exclusivamente à eliminação de matéria orgânica, pois, na faixa de temperatura utilizada, também podem ocorrer transformações ou decomposições de fases minerais presentes na cinza.



Figura 2. Tratamento térmico da cinza.

Com o material termotratado, foram realizados ensaios de massa específica aparente, por meio do método do picnômetro, e de absorção de água, conforme a NP EN 1097-6 (2003), além da determinação da massa unitária, de acordo com a NP EN 1097-3 (2002). A Tabela 1 apresenta as características físicas obtidas nos ensaios realizados.

Tabela 1. Características físicas da cinza.

Características físicas	Valor
Massa específica aparente	2,336 g/cm ³
Massa unitária	0,762 g/cm ³
Absorção de água	35,34 %

Além disso, foi realizado o ensaio de atividade pozolânica com cal, com base nos princípios estabelecidos na NBR 5751 (ABNT, 2015), visando avaliar a reatividade da cinza. O ensaio de determinação da atividade pozolânica foi realizado utilizando argamassa composta por hidróxido de cálcio, material para avaliação de pozolanicidade (cinza), areia normal e água. A dosagem da mistura foi definida em função das massas específicas dos materiais, sendo a quantidade de água ajustada para obtenção do índice de consistência estabelecido pela norma (225 ± 5 mm). Após a moldagem dos corpos de prova prismáticos de $(40 \times 40 \times 160)$ mm, realizou-se a cura em condições controladas de

temperatura e umidade durante sete dias. A geometria dos corpos de prova diferiu daquela estabelecida na NBR 5751 (ABNT, 2015). Portanto, o procedimento deve ser considerado um método adaptado. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

Com esse ensaio, foi possível obter uma resistência média à compressão de 0,98 MPa para a argamassa produzida com a cinza de fundo (Figura 3). O baixo valor de resistência e o aspecto pouco coeso dos corpos de prova indicam baixa reatividade da cinza nas condições do ensaio adaptado. Contudo, devido à modificação do procedimento, o valor-limite normativo de 6 MPa não deve ser aplicado diretamente para fins formais de classificação do material. Assim, em função da baixa resistência à compressão obtida no ensaio, esse material só foi utilizado como adição mineral.



Figura 3. Aspecto dos corpos de prova após ensaio de atividade pozolânica.

Para a produção das argamassas, adotou-se um traço de referência utilizado em Portugal para argamassa de assentamento de 1:1,2:2,8 (cimento Portland: areia fina 0/2: areia grossa 0/4, em volume), com relação água/cimento (a/c) inicial de 0,82, em massa. A relação a/c foi ajustada, quando necessário, com o objetivo de obter uma argamassa de assentamento com índice de consistência (*flow-table*) de (175 ± 10) mm, conforme estabelecido no plano experimental, avaliado de acordo com a EN 1015-3 (1999).

A partir da argamassa de referência, foram produzidas argamassas com adição de cinza nos teores de 5% e 10%, em relação à massa de cimento. As argamassas foram identificadas como CF-T-5 e CF-T-10, sendo os números 5 e 10 correspondentes aos teores de adição de cinza, enquanto a letra T refere-se à utilização de cinza termotratada. Conforme a Tabela 2, observa-se a composição final dos traços com a água corrigida.

Tabela 2. Proporção dos materiais utilizados nas argamassas.

Material	Massa (g)		
	REF	CF-T-5	CF-T-10
Cimento Portland	1.000	1.000	1.000
Areia 0/2	1.495	1.495	1.495
Areia 0/4	3.628	3.628	3.628
Cinza	0	50	100
Água	470,98	492,70	500,34

No estado fresco foram avaliados: consistência pelo índice de consistência (*flow-table*), conforme EN 1015-3, 1999), densidade de massa e teor de ar incorporado, realizados de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005).

No estado endurecido, para cada traço produzido foram moldados 18 corpos de prova prismáticos com dimensões de (40 × 40 × 160) mm. Os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, conforme a EN 1015-11 (1999), foram realizados aos 7, 14 e 28 dias, com ruptura de 3 corpos de prova aos 7 dias, 4 corpos de prova aos 14 dias e 5 corpos de prova aos 28 dias.

Os resultados de resistência mecânica foram submetidos ao teste de homogeneidade das variâncias de Bartlett, seguido da análise de variância (ANOVA). Quando identificado efeito significativo dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Duncan, considerando-se o nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$).

Após a realização das rupturas, os corpos de prova remanescentes foram utilizados para os ensaios de porosidade aberta (Figura 4), de acordo com a norma NP EN 1936 (2008). Também foi determinada a massa específica aparente no estado endurecido durante a realização do ensaio.

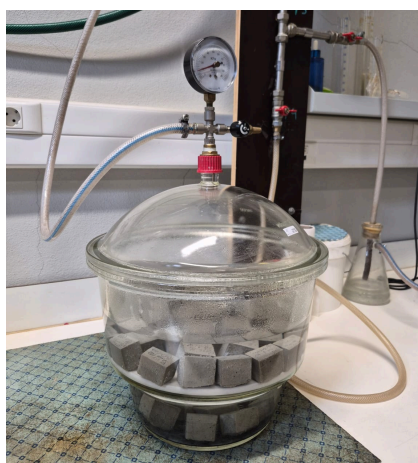


Figura 4. Ensaio de porosidade aberta.

A eficiência do uso do ligante foi avaliada por meio do Índice de Ligantes (IL), proposto por Damineli et al. (2010), que relaciona o consumo de ligante ao desempenho mecânico do material, conforme Equação 01. Esse índice expressa a quantidade de ligante (cimento por m³) necessária para produzir 1 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, sendo utilizado como um indicador da eficiência no emprego de materiais cimentícios e do potencial de redução do impacto ambiental.

$$IL = \frac{\text{Consumo de cimento}}{\text{Resistência à compressão}}$$

Onde:

IL = Índice de intensidade de ligante.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os valores do índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado obtidos das argamassa avaliadas.

Tabela 3. Índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas.

Argamassa	Índice de consistência (mm)	Densidade de massa (g/cm ³)	Teor de ar (%)
REF	165,92	2,127	5,73
CF-T-5	173,69	2,105	0,69
CF-T-10	172,03	2,084	1,52

Os resultados na Tabela 3 indicam que a incorporação da cinza como adição mineral (fíler) influenciou diretamente as propriedades das argamassas. Observa-se que, devido à fixação do índice de consistência (*flow-table*), a adição da cinza termotratada como fíler mineral aumentou a relação água/cimento (a/c) nos traços CF-T-5 e CF-T-10 em relação à referência (Tabela 2). Esse aumento decorre da maior finura e área superficial do resíduo, que exigem maior volume de água para manter a mesma trabalhabilidade.

Além disso, esse comportamento pode estar diretamente relacionado à elevada absorção de água da cinza, que apresentou valor de 35,34%, reduzindo a quantidade de água livre disponível na argamassa, e, consequentemente, aumenta a demanda de água necessária para alcançar a consistência especificada das argamassas.

Para a densidade de massa, não foram observadas variações expressivas entre as argamassas analisadas, uma vez que os valores obtidos permaneceram próximos entre si. A argamassa REF apresentou densidade de 2,127 g/cm³, enquanto as argamassas

CF-T-5 e CF-T-10 registraram valores de 2,105 g/cm³ e 2,084 g/cm³, respectivamente.

Em relação ao teor de ar incorporado, observou-se redução significativa nas argamassas com adição de cinza, principalmente na mistura CF-T-5, que apresentou teor de apenas 0,69%, em comparação aos 5,73% da argamassa de referência. Esse comportamento sugere que a presença das partículas finas favoreceu o preenchimento dos vazios da matriz cimentícia, reduzindo a quantidade de vazios.

Com base no ensaio de perda ao fogo (*Loss on Ignition* - LOI), observou-se que a fração da cinza com dimensão inferior ou igual a 0,063 mm apresentou perda de massa de 3,91% após aquecimento a 850°C. De acordo com Tafarel et al. (2016), a presença de matéria orgânica no interior de matrizes cimentícias pode interferir diretamente no processo de hidratação do cimento Portland. Essa interferência acarreta o aumento da demanda de água, maior suscetibilidade à penetração de agentes agressivos e, consequentemente, a redução da resistência mecânica. Esse comportamento, igualmente crítico para as argamassas, justifica a necessidade de remoção prévia da matéria orgânica por meio do tratamento térmico (queima), minimizando riscos associados ao desenvolvimento de bolor e à degradação precoce do material ao longo do tempo. Cabe ressaltar que não é possível atribuir a perda de massa registrada nas condições modificadas do procedimento experimental integralmente à presença de matéria orgânica, pois o aquecimento também pode provocar desidratação, desidroxilação ou decomposição de fases minerais. Dessa forma, o valor deve ser interpretado como um indicador global de perda de massa durante o aquecimento.

Os resultados das resistências mecânicas encontram-se nas Figura 5 e Figura 6.

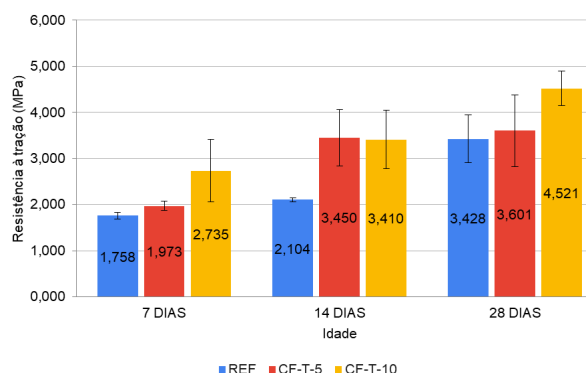


Figura 5. Resistência à tração na flexão das argamassas avaliadas.

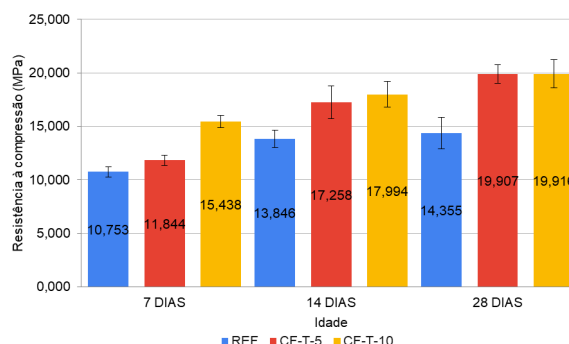


Figura 6. Resistência à compressão das argamassas avaliadas.

Com relação à resistência à tração (Figura 5), aos 7 dias, considerando o nível de significância de 5% ($p > 0,05$), as médias não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre as argamassas REF, CF-T-5 e CF-T-10. Aos 14 dias, as argamassas com adição (CF-T-5 e CF-T-10) apresentaram médias estatisticamente superiores à REF, com aumento de 63,97% e 62,07%, respectivamente, porém sem diferença significativa entre si. Já aos 28 dias, a argamassa com 10% de cinza (CF-T-10) apresentou diferença significativa em relação à REF e à CF-T-5, enquanto estas não diferiram estatisticamente entre si. O aumento neste caso foi de 31,88% em relação à REF e 25,55% em relação à CF-T-5. Os resultados indicam que o efeito da cinza sobre a resistência à tração na flexão não foi proporcional ao teor incorporado em todas as idades.

Com relação à resistência à compressão (Figura 6), aos 7 dias, as argamassas com adição de cinza (CF-T-5 e CF-T-10) apresentaram médias de resistência estatisticamente superiores à da argamassa de referência (REF), correspondendo a aumentos de 10,14% e 43,63%, respectivamente.

Aos 14 dias, as argamassas com adição de cinza (CF-T-5 e CF-T-10) apresentaram médias de resistência à compressão estatisticamente superiores à da argamassa de referência (REF), correspondendo a aumentos de 24,62% e 29,89%, respectivamente.

Aos 28 dias, a argamassa REF apresentou resistência média de 14,4 MPa, enquanto as argamassas CF-T-5 e CF-T-10 apresentaram valores na ordem de 19,9 MPa.

O aumento de resistência das argamassas contendo cinza pode estar associado à combinação de diferentes fatores, incluindo a redução do teor de ar incorporado, alterações no empacotamento dos sólidos e possíveis efeitos físicos das partículas finas. Entretanto, como a massa de cimento Portland foi mantida constante e a quantidade de água foi alterada, o efeito isolado da cinza não pode ser separado integralmente dos efeitos decorrentes das

mudanças no teor de ar incorporado e nas proporções volumétricas das misturas.

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos de porosidade aberta em função da idade de ensaio.

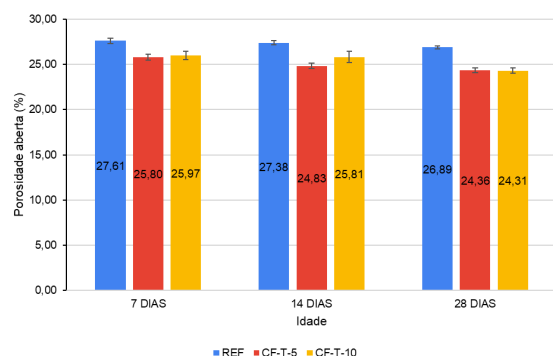


Figura 7. Porosidade aberta ao longo do tempo das argamassas avaliadas.

De maneira geral, na Figura 7 foi possível observar redução da porosidade aberta das argamassas com o avanço da idade de cura, indicando um processo de densificação progressiva da matriz cimentícia ao longo do tempo. O traço REF apresentou redução de 27,61% aos 7 dias para 26,89% aos 28 dias. De forma semelhante, os traços com incorporação de cinza apresentaram diminuição mais acentuada da porosidade aberta, sendo observados valores de 25,80% para 24,36% no CF-T-5 e de 25,97% para 24,31% no CF-T-10 entre 7 e 28 dias.

Além disso, os traços CF-T-5 e CF-T-10 apresentaram menores valores de porosidade aberta em comparação ao traço de referência em todas as idades analisadas. Aos 14 dias, por exemplo, a CF-T-5 apresentou porosidade de 24,83%, enquanto a REF apresentou 27,38%. Já aos 28 dias, o menor valor foi observado para a CF-T-10 (24,31%), indicando maior eficiência na redução da estrutura porosa e, conseqüentemente, potencial diminuição da permeabilidade da argamassa. Esses resultados indicam menor volume de poros acessíveis à água nas condições do ensaio.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos de massa específica aparente no estado endurecido, em função da idade de ensaio.

Tabela 4. Massa específica aparente no estado endurecido das argamassas avaliadas.

Argamassa	Massa específica aparente (g/cm ³)		
	7 dias	14 dias	28 dias
REF	1,897	1,889	1,913
CF-T-5	1,936	1,950	1,934
CF-T-10	1,921	1,920	1,932

Os resultados de massa específica aparente reforçam esse comportamento, uma vez que as argamassas com adição de cinza apresentaram valores ligeiramente superiores aos da argamassa de referência em determinadas idades, sugerindo maior empacotamento das partículas, devido ao efeito filer promovido pela adição da cinza, fato também observado por Gonçalves (2022). Segundo Vaske (2012), esse fenômeno ocorre, pois as partículas finas da cinza preenchem os vazios da matriz cimentícia, densificando a estrutura e diminuindo a capilaridade. O autor destaca que essas partículas atuam como pontos de nucleação para hidratação, refinando a estrutura dos poros e promovendo um acréscimo de resistência. A combinação entre maior massa específica aparente e menor porosidade aberta é compatível com uma matriz contendo menor volume de vazios acessíveis.

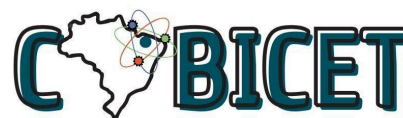
Na Tabela 5 é apresentado o resultado do consumo de cimento por m³ de argamassa e do Índice de Ligante (IL). O índice utilizado representa uma medida simplificada de eficiência mecânica do uso do cimento. Ele não contempla a energia consumida no tratamento térmico da cinza, o transporte, o peneiramento, a fração rejeitada no beneficiamento ou o desempenho de longo prazo. Assim, seus resultados não devem ser interpretados de forma cega como comprovação de maior ecoeficiência ambiental.

Tabela 5. consumo de cimento por m³ e índices de ligantes das argamassas.

Argamassa	Consumo de Cimento Portland (Kg/m ³)	Índice de Ligante (IL)
REF	322,57	22,47
CF-T-5	315,80	15,86
CF-T-10	309,96	15,56

Observa-se na Tabela 5 que a incorporação de resíduos de biomassa reduziu o consumo de cimento por m³ e o índice de intensidade do ligante (IL) das argamassas, indicando maior eficiência no aproveitamento do material cimentício. A argamassa de referência (REF) apresentou o maior índice de Intensidade de Ligante (IL), equivalente a 22,47 enquanto as formulações com adição da cinza como filer na argamassa apresentaram valores inferiores, de 15,86 para a CF-T-5 e de 15,56 para a CF-T-10.

Como menores valores de IL indicam menor consumo de ligante para a obtenção de uma mesma unidade de resistência mecânica, observa-se que a incorporação da cinza de biomassa nas argamassas pode promover maior eficiência no uso do cimento Portland. Dentre as formulações a CF-T-10 apresentou o menor valor de IL, mostrando maior



ecoeficiência ao alcançar o desempenho mecânico com menor consumo de cimento Portland.

CONCLUSÃO

A utilização de resíduos de biomassa em matrizes cimentícias mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável, com potencial de melhoria ou manutenção das propriedades mecânicas avaliadas. Os resultados sugerem que sua incorporação pode contribuir tanto para o desempenho do material quanto para a sustentabilidade do setor da construção civil.

A incorporação da cinza termotratada como filer mineral influenciou diretamente o comportamento das argamassas no estado fresco. A fixação do índice de consistência resultou no aumento da relação água/cimento (a/c) nos traços modificados, comportamento atribuído à elevada finura, maior área superficial e alta capacidade de absorção de água do resíduo (35,34%), o que reduziu a água livre na mistura. Embora a densidade de massa não tenha apresentado variações expressivas, mantendo-se estável em relação à referência, o teor de ar incorporado sofreu uma redução significativa (alcançando 0,69% no traço com 5% de substituição). Esse efeito indica um eficiente preenchimento de vazios e empacotamento da matriz cimentícia promovido pelas partículas finas da cinza. Por fim, o ensaio de perda ao fogo (LOI) revelou um teor de 3,91% de perdas na fração fina (0,063 mm), validando a necessidade do tratamento térmico prévio para a eliminação da matéria orgânica, etapa essencial para garantir a correta hidratação do ligante e prevenir patologias biológicas ou a perda de resistência mecânica a longo prazo.

Na resistência à tração na flexão, a formulação CF-T-10 apresentou os maiores valores médios em todas as idades avaliadas, seguida da CF-T-5, enquanto a argamassa de referência (REF) apresentou os menores resultados. Esse comportamento indica que a incorporação da cinza favoreceu o desenvolvimento da resistência à tração ao longo do período de cura.

Para a resistência à compressão, observou-se comportamento semelhante, com aumento das resistências entre 7 e 28 dias para todas as formulações. A CF-T-10 apresentou os maiores valores nas idades iniciais; entretanto, aos 28 dias, verificou-se uma aproximação com os resultados da formulação CF-T-5. Em todas as idades avaliadas, a argamassa de referência apresentou as menores resistências, indicando que a incorporação da cinza contribuiu positivamente para o desenvolvimento das propriedades mecânicas das argamassas. Observou-se redução da porosidade aberta com o avanço da idade de cura, indicando densificação progressiva da matriz cimentícia (REF).

Os resultados de massa específica aparente no estado endurecido reforçam esse comportamento, com valores ligeiramente superiores nas argamassas com cinza em relação à referência em algumas idades, indicando maior empacotamento das partículas, possivelmente associado ao efeito filer da cinza.

A incorporação da cinza de fundo reduziu o consumo de cimento por m^3 e o índice de intensidade do ligante (IL), aumentando a eficiência no uso do cimento, com destaque para a formulação CF-T-10, que apresentou a maior ecoeficiência.

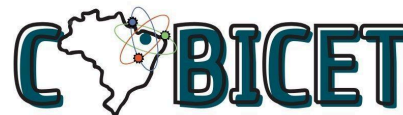
Em síntese, os resultados indicam que a incorporação da fração fina da cinza de fundo pode contribuir para melhorias microestruturais e desempenho mecânico, evidenciando seu potencial como alternativa sustentável na construção civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal, pelo apoio ao Projeto de Investigação Exploratória ARSUS - Argamassas de Revestimento Sustentáveis, e ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), pela concessão da oportunidade de mobilidade através do Programa de Intercâmbio PROPICIE.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653:2014**: Materiais pozolânicos: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13278:2005**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Densidade da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5751:2015**: Materiais pozolânicos: Densidade da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 18:2012**: Cimento Portland: Análise química: Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- BARBOZA, Lucas da Silva; ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes de. **Estudo sobre redução do consumo de cimento e emissão de CO_2 para concreto de alto desempenho**. Ciência & Engenharia, Uberlândia, v. 24, n. 2, p. 131–141, jul./dez. 2015. Disponível em:



- <https://seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/31950>. Acesso em: 28 jun. 2026.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1015-18: Methods of test for mortar for masonry: part 18: determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar.**
- GONÇALVES, Carine de Souza. **Estudo de adições minerais de cinzas de biomassa de eucalipto no comportamento físico-químico de pastas de cimento.** 2022. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. **NP EN 1015-11: 1999: Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Denation of flexural and compressive strength of hardened mortar.**
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. **NP EN 1015-3/A1/A2:1999/2004/2006.** Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. **NP EN 1097-3: 2002: Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados; Parte 3: Denação da baridade e do volume de vazios.**
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. **NP EN 1097-6: 2003: Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volumica e da absorção de água.**
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. **NP EN 1936: 2008: Métodos de ensaio para pedra natural: determinação das massas volumicas real e aparente e das porosidades total e aberta.**
- JASPER, C. M. et al. **Avaliação da substituição parcial de cimento Portland por cinza de queima de biomassa no desempenho de argamassas.** International Congress on Engineering, Portugal, 2024. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.26/53140>. Acesso em: 28 jun 2026.
- SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry.** Cement and Concrete Research, Amsterdam, v. 114, p. 2–26, Dec. 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884618301480>. Acesso em: 28 jun. 2026.
- TAFAREL, N. F. et al. **Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água.** Matéria (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 974-986, out./dez. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/GgR9NvqtH7KBQyH5KGZJJKQ/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 25 jun. 2026.
- TARELHO, L.A.C. et al. **Characteristics, management and applications of ashes from thermochemical conversion of biomass to energy in World Bioenergy.** 20th European Biomass Conference & Exhibition, Milano, Italy, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281712252_Characteristics_management_and_applications_of_ashes_from_thermochemical_conversion_of_biomass_to_energy. Acesso em: 28 jun. 2026.
- UNEP (United Nations Environment Programme). **Global status report for buildings and construction 2025-2026.** Nairóbi: UNEP, 2026. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-2025-2026..> Acesso em: 24 jun. 2026.
- VASKE, Nei Ricardo. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- VELARDO, P. et al. **Effect of incorporating biomass bottom ash and construction and demolition waste powder on the physical-mechanical properties and micro-structure of ternary-blended mortars.** Construction and Building Materials, v. 432, artigo 136628, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824017690>. Acesso em: 25 jun. 2026.