



de referência, ao traço 1:3, com água/ligante (A/L) de 0,6, e argamassas com substituição parcial da massa de cimento por cinzas, em teores de substituição de 5, 10, 15, 20 e 25%, mantendo a A/L constante. Avaliou-se, no estado fresco, a trabalhabilidade das argamassas através do ensaio da mesa de espalhamento, massa volúmica e teor de ar incorporado e, no estado endurecido, a resistência à compressão e à tração por flexão, massa volúmica e porosidade aberta. Constatou-se que a variação das propriedades, tanto no estado fresco, quanto endurecido, tendem a apresentar um comportamento inversamente proporcional ao aumento da percentagem de incorporação de cinzas e que, quando comparada com a argamassa de referência.

**Palavras-chave:** Biomassa, Cinza, Argamassa.

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos industriais é um problema amplamente reconhecido na Europa (Khan et al., 2022). A globalização do estilo de vida e da economia intensificou a produção de resíduos sólidos a níveis sem precedentes, exacerbando a deposição contínua desses resíduos em aterros sanitários e gerando preocupações ambientais críticas (Nanda & Berruti, 2021). Esse cenário é ainda mais complicado pela ausência de métodos eficazes de eliminação e tecnologias de tratamento adequadas, o que contribui para o aumento das emissões de gases de efeito estufa e para a contaminação do solo e da água, configurando-se como um dos principais desafios para a sustentabilidade global (Saxena et al., 2020).

Em termos gerais, os resíduos referem-se a materiais resultantes de atividades humanas que são descartados por serem considerados indesejáveis, incluindo resíduos de construção, demolição, agrícolas e industriais. No entanto, é importante destacar que o conceito de resíduo é relativo, uma vez que o que é tratado como resíduo em um determinado contexto pode ser considerado um recurso valioso em outro (D'Adamo et al., 2022).

Neste cenário, a indústria da construção destaca-se como um dos maiores setores da sociedade, e o interesse por materiais de construção alternativos e mais sustentáveis tem aumentado significativamente. A substituição de matérias-primas virgens por resíduos sólidos na produção de materiais de construção de valor acrescido emerge como uma abordagem promissora (Tang et al., 2020). Em particular, os materiais de construção à base de cimento têm atraído atenção especial, pois enfrentam simultaneamente os desafios da eliminação de resíduos sólidos e da produção de cimento (Li et al., 2022). A produção de cimento, que gera grandes quantidades de dióxido de carbono, é reconhecida como uma das principais fontes de poluição ambiental e de aquecimento global (Ghosh et al., 2018).

Entre os desafios relacionados à gestão de resíduos, destaca-se o destino das cinzas volantes e de fundo geradas pelas centrais de queima de

biomassa, que, em muitos países, são descartadas sem qualquer forma de reutilização, ocupando grandes áreas de solo e poluindo o ar e a água durante sua eliminação (Al-Ghouti et al., 2021). Nesse sentido, a reutilização dessas cinzas surge como uma opção ambientalmente preemente.

Estudos recentes indicam que o uso de cinzas volantes de biomassa como substituto parcial do cimento em materiais de construção não só minimiza a necessidade de recursos naturais para a produção de cimento (Tarelho et al., 2012), mas também contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e oferece uma solução eficiente para a gestão dessas cinzas. Além disso, estudos demonstram que as cinzas de biomassa apresentam bom desempenho em betão e argamassas.

Kępys (2018) investigou a utilização de cinzas pesadas provenientes da queima de biomassa em alto-forno de leito fluidizado como substituto parcial da areia, analisando teores de 25%, 50% e 75% de substituição em massa. Os resultados indicaram que a incorporação das cinzas nas argamassas proporcionou melhorias nas propriedades mecânicas, sugerindo a viabilidade da sua utilização.

Teixeira et al. (2016) analisaram a incorporação de cinzas de biomassa como substituto do cimento em argamassas. Após caracterizar física e quimicamente as cinzas, os autores investigaram teores de 20% e 40% de substituição de cimento, em massa. O estudo concluiu que a substituição de 20% apresentou os melhores resultados em termos de resistência mecânica e absorção de água, confirmando que a utilização de cinzas de biomassa pode melhorar as propriedades das argamassas.

Já Cabrera et al. (2020) exploraram a influência das cinzas de biomassa nas propriedades físico-químicas, comportamento mecânico e durabilidade de materiais como argamassas e betões. Os autores ressaltaram que, embora as cinzas residuais de biomassa tenham potencial para aplicação na fabricação de materiais de construção, sua utilização em larga escala é dificultada pela variação nas propriedades físico-químicas, que dependem do tipo de biomassa utilizada e do processo de combustão.

Mediante estes e outros estudos, o presente trabalho tem como principal objetivo avaliar o uso de cinzas provenientes da queima de biomassa em alto-forno de leito fluidizado, oriundas de uma indústria de papel portuguesa, como substituto parcial do cimento Portland em argamassas. Os resultados apresentados foram obtidos por meio de uma caracterização físico-química detalhada das cinzas, bem como da análise da influência de diferentes teores de substituição nas propriedades das argamassas.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

O programa experimental do presente artigo consistiu na análise das propriedades nos estados fresco e endurecido de argamassas, para aplicação como revestimento, com o objetivo de verificar a influência da substituição parcial de cimento Portland por cinzas pesadas provenientes da queima de biomassa.

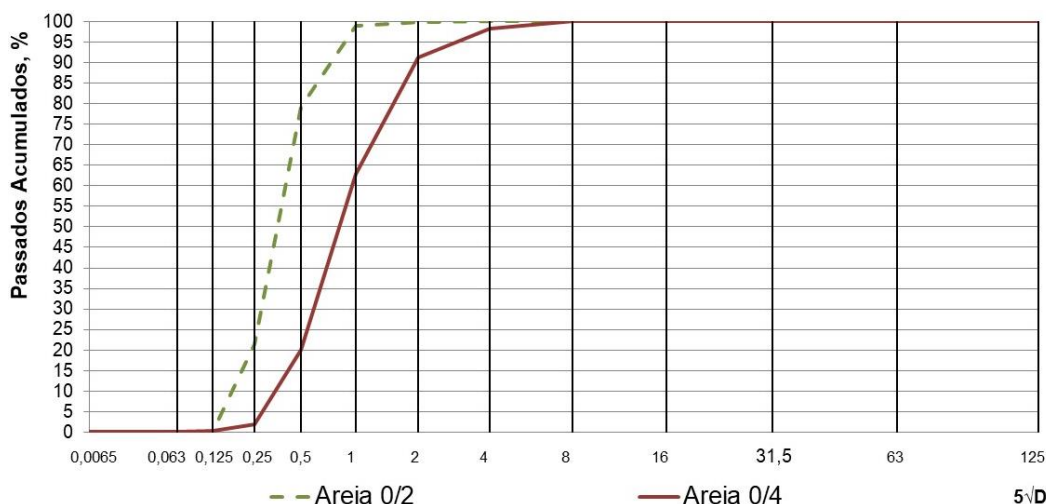
Os estudos com argamassas foram iniciados através da dosagem de uma argamassa de referência (REF, sem a utilização de cinzas), com trabalhabilidade suficiente para fins de aplicação como revestimento de parede (reboco). O traço dessa argamassa de referência foi de 1:3 (cimento Portland: combinação de areias, em massa) e relação água/ligante (A/L, em massa) de 0,6. A argamassa de referência teve sua trabalhabilidade avaliada visualmente e por meio do ensaio Flow-table (EN 1015-3, 1999).

Após a produção de uma argamassa de referência, foram produzidas argamassas com substituição de até 25% de cimento Portland por cinzas (relação em massa), considerando artigos acadêmicos e objetivando assim estabelecer um limite máximo de substituição, mantendo uma trabalhabilidade adequada para a aplicação escolhida.

### **2.1 Caracterização física e química**

Os materiais utilizados na composição das argamassas avaliadas neste estudo foram: Cimento Portland Comum - CEM I 42,5 (massa volúmica específica de 3,14 g/cm<sup>3</sup> e baridade de 1,2 g/cm<sup>3</sup>), combinação de agregados finos, areias de grão fino 0/2 e de grão grosso 0/4 (massa volúmica específica do conjunto de 2,50 g/cm<sup>3</sup> e baridade do conjunto de 1,59 g/cm<sup>3</sup>, na proporção 1 para 2), com granulometria apresentada na Figura 01, e as cinzas pesadas fornecidas, ocorrendo uma variação na substituição de cimento Portland por estas.

As cinzas pesadas de biomassa foram fornecidas por uma indústria de papel portuguesa que recorre ao uso de fibra de eucalipto-comum. As amostras utilizadas foram recolhidas após processo de produção de pasta de papel, após queima de biomassa em alto forno de leito fluidizado. As cinzas foram caracterizadas quimicamente, através dos ensaios de teor de matéria orgânica (EN 196-2, 2013), teor de insolúveis em sais. Também foram caracterizadas, fisicamente, através dos ensaios de determinação da massa volúmica específica (1097-6) e da baridade (NP EN 1097-3, 2002). Considerando o intuito de utilizar as cinzas como substituição de cimento Portland, foram realizados ensaios para averiguação do potencial pozolânico das amostras, como o ensaio de condutividade elétrica, seguindo o método proposto por Luxán et al. (1989).



**Figura 01 – Curva granulométrica da combinação de areias utilizadas**

## 2.2 Formulação, produção e caracterização das argamassas

As cinzas utilizadas na produção das argamassas passaram por processo de peneiração e secagem em estufa a  $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , utilizando-se para a produção das argamassas a fração de material seco passante no peneiro 0,063 mm.

A sequência de mistura dos materiais seguiu a norma portuguesa NP EN 196-1 (IPQ, 2006).

Após a dosagem da argamassa sem substituição, argamassa de referência (REF), foram produzidas mais cinco argamassas, com teores de substituição de cimento por cinzas, em massa, de 5, 10, 15, 20 e 25% (C5, C10, C15, C20 e C25, respectivamente), para fins de avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido. A Tabela 01 apresenta o traço utilizado de cada material na produção das argamassas, em função da quantidade de aglomerante total, que foi composta pela soma da quantidade de cimento e de cinzas incorporadas na mistura.

**Tabela 01 – Traço das argamassas**

| Material  | REF  | C5   | C10  | C15  | C20  | C25  |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| Areia 0/4 | 2,55 | 2,55 | 2,55 | 2,55 | 2,55 | 2,55 |
| Areia 0/2 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,27 |
| Cimento   | 1    | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,75 |
| Cinza     | -    | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 |
| Água      | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  |

Logo após a produção das argamassas, a fim de determinar a influência da adição das cinzas nas argamassas cimentícias no estado fresco das misturas, foram realizados ensaios para avaliação das seguintes propriedades: Índice de consistência por espalhamento (flow-table, conforme EN 1015-3, 1999), obtendo medidas de diâmetro expressa em

mm; Massa volúmica (conforme EN 1015-6, 1999) com resultados expressos em g/cm<sup>3</sup>; e Teor de ar incorporado (conforme EN 1015-7, 1999).

Após análise das propriedades no estado fresco, foram moldados, para cada argamassa produzida, um total de 15 provetes prismáticos de dimensões 40x40x160 mm, os quais após cura foram utilizados para a avaliação das seguintes propriedades: Massa volúmica (EN 1015-6, 1999), resistência à tração na flexão (EN 1015-11, 2019), resistência à compressão (EN 1015-11, 2019), e porosidade aberta (NP EN 1936, 2001). Os ensaios foram realizados nos provetes com idades de 7, 14 e 28 dias.

Por fim, realizou-se uma análise estatística comparativa com os resultados de resistência à compressão das argamassas com os diferentes teores de substituição de cimento por cinza de biomassa. Num primeiro momento, os resultados passaram por testes de Shapiro-Wilk para verificação da normalidade da distribuição, a qual não foi obtida. Em sequência, foi aplicada a transformação de Box-Cox, para satisfação dos pressupostos de normalidade para que, por fim, fossem realizados a análise de variância (ANOVA), os testes de Correlação de Pearson e os testes de Correlação de Spearman, para avaliação da influência do teor de substituição e da idade na resistência à compressão das argamassas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização do Materiais

No que diz respeito às cinzas, os resultados obtidos da determinação do teor de matéria orgânica, teor de sais insolúveis, determinação da massa volúmica específica e baridade são apresentados na Tabela 02.

**Tabela 02 – Caracterização química e física das cinzas**

| Ensaio Realizado                               | Resultado Médio Cinzas  |
|--|-------------------------|
| Teor de Matéria Orgânica (EN 196-2, 2013)      | 20,8%                   |
| Teor de Sais Insolúveis (EN 196-2, 2013)       | 280,400 ppm             |
| Massa volúmica específica (NP EN 1097-6, 2003) | 2,169 g/cm <sup>3</sup> |
| Baridade (NP EN 1097-3, 2002)                  | 0,909 g/cm <sup>3</sup> |

Para verificação do potencial pozolânico das cinzas, foram realizados os ensaios de condutividade elétrica, conforme proposto por Luxán et al. (1989). São consideradas pozolanas, os materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si só, possuem pouco ou nenhum valor aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de umidade, reagem quimicamente formando compostos com propriedades aglomerantes. Algumas cinzas, como a cinza de casca de arroz, apresentam atividade considerada pozolânica comprovada e, ao serem incorporadas em misturas cimentícias, geram alteração nas propriedades mecânicas das misturas, geralmente ocasionando um

aumento nas resistências à tração na flexão e à compressão. Portanto, a determinação de atividade pozolânica de um material é relevante para a definição quanto a sua utilização em misturas cimentícias.

O ensaio proposto por Luxán et al. (1989) tem como objetivo classificar a pozolanicidade de um material através da medição da condutividade elétrica durante os 120 segundos iniciais de ensaio. Com base na variação da condutividade, Luxán estabelece um modelo de classificação, conforme descrito na Tabela 03.

**Tabela 03 – Classificação da pozolanicidade de um material, segundo método de Luxán et al. (1989)**

| <b>Classificação do Material</b> | <b>Variação de Condutividade de acordo com o método proposto (mS/cm)</b> |
|----------------------------------|--|
| Não Pozolana                     | Menor que 0,40   |
| Pozolana Variável                | Entre 0,4 e 1,2  |
| Boa Pozolana                     | Maior que 1,2  |

Através do método proposto, a medida de condutividade das cinzas analisadas resultou em 1,00 mS/cm, sendo as cinzas classificadas como pozolana variável. Considerando o comportamento das pozolanas, assim como a utilização de cinzas com atividade pozolânica na produção de cimentos, como a cinza de casca de arroz, o resultado obtido orienta o estudo para a análise da substituição de cimento Portland por cinzas de queima de biomassa, a fim de verificar esse efeito em argamassas.

O ensaio de teor de matéria orgânica, também conhecido como ensaio de teor perda ao fogo, mede a redução percentual de uma amostra de cinzas antes e depois do processo de calcinação, realizado a uma temperatura de 1000°C em estufa. O resultado obtido foi de 20,8% de perda da massa, conforme ABNT NBR NM 18:2012, que estabelece que esse valor não deve exceder 23%, sendo, portanto, considerado adequado. No entanto, quando comparado com outros estudos que avaliaram a utilização de cinzas em materiais cimentícios, como o de Teixeira et al. (2016), o valor pode ser considerado alto, já que o autor obteve um teor de perda ao fogo de aproximadamente 5%. Esse valor é superior ao de cimento e areia, como esperado, mas significativamente inferior ao resultado obtido no presente estudo.

Conforme descrito por Tafarel et al. (2016), a presença de matéria orgânica incorporada a misturas cimentícias, como concreto e argamassa, é motivo de preocupação, pois pode influenciar negativamente o processo de hidratação do cimento. Isso pode resultar num maior consumo de água, facilitar a entrada de agentes agressivos, possibilitar o desenvolvimento de manifestações patológicas e, além disso, comprometer a resistência mecânica da mistura.

Este resultado foi corroborado pela inspeção visual prévia realizada durante a manipulação da amostra, onde foi possível identificar a presença de materiais não completamente calcinados. A observação desses 'torrões' de material remanescente reforça a conclusão de que o processo de combustão da biomassa não foi concluído de forma integral, resultando em um resíduo com alta concentração de matéria orgânica. Estudos de outros autores, como os apresentados por Cabrera et al. (2020), apontam que as amostras de cinzas pesadas analisadas, oriundas da queima de biomassa, incluíam não apenas a fração grossa das cinzas produzidas no leito e câmara de combustão, mas também impurezas minerais contidas no combustível de biomassa e na escória, que não foram totalmente queimadas ao longo do processo.

Analisando os resultados obtidos através da caracterização física do material, especialmente o valor de massa volúmica específica (aproximadamente  $2,17\text{g/cm}^3$ ), pode-se constatar que as cinzas apresentam maior semelhança com o conjunto de agregados finos utilizados para a produção das argamassas (massa volúmica específica de  $2,50\text{g/cm}^3$ ) do que quando comparado ao do aglomerante, cimento CEM I 42,5 (massa volúmica específica de  $3,14\text{g/cm}^3$ ).

Keypys (2018), no seu estudo sobre a incorporação de cinzas pesadas, provenientes da queima de biomassa em leito fluidizado, ao analisar as características físicas das cinzas, obteve como valor para a massa específica volúmica específica  $2,58\text{g/cm}^3$  e classificou a amostra como agregado 0/2. Com base nesses resultados, o autor optou por utilizar as cinzas como substituto do agregado miúdo, na composição de argamassas.

Apesar da semelhança entre os materiais utilizados, tendo o autor avaliado cinzas de biomassa provenientes do mesmo processo de queima do presente artigo, optou-se aqui por analisar as cinzas como substituição do cimento Portland. Essa decisão foi tomada com base nos resultados dos ensaios de atividade pozolânica, que visaram confirmar o nível de atividade pozolânica do material. Contudo, para utilização como substituto do cimento, a amostra precisou passar por um processo de peneiração, de modo que fosse utilizada a fração de amostra com menor granulometria ( $< \text{peneiro } 0,063\text{ mm}$ ), de forma a se aproximar das dimensões das partículas do cimento, que é um material fino.

## **3.2 Propriedades das argamassas**

### **3.2.1 Propriedades no estado fresco**

Os resultados obtidos através da realização dos ensaios de determinação do índice de consistência por espalhamento, da massa volúmica e do teor de ar incorporado, executados no estado fresco das argamassas produzidas, se estão apresentados no Quadro 04.

#### Quadro 04 – Resultados de ensaios no estado fresco das argamassas

| Argamassa  | Cinzas (%) | Espalhamento (mm) | Massa Volúmica (g/cm <sup>3</sup> ) | Teor de Ar (%) |
|------------|------------|-------------------|-------------------------------------|----------------|
| Referência | 0          | 165               | 2,097                               | 8              |
| Arg. C5    | 5          | 137               | 2,108                               | 9              |
| Arg. C10   | 10         | 144               | 2,080                               | 9              |
| Arg. C15   | 15         | 132               | 2,072                               | 8              |
| Arg. C20   | 20         | 131               | 2,072                               | 10             |
| Arg. C25   | 25         | 120               | 2,011                               | 11             |

A análise dos dados revelou que o aumento do teor de substituição de cimento por cinzas de biomassa resulta em uma diminuição na trabalhabilidade das misturas, bem como na massa volúmica, e em um aumento do teor de ar incorporado. Especificamente, o teor máximo de substituição estabelecido no estudo, que corresponde a 25% da massa de cimento substituída por cinzas, apresentou o menor espalhamento médio das misturas (120 mm), a menor massa volúmica (2,011 g/cm<sup>3</sup>) e o maior teor de ar incorporado (11%).

Esses resultados podem ser explicados pelas características das cinzas de biomassa utilizadas. Segundo Teixeira et al. (2016), a irregularidade das partículas das cinzas contribui para a redução da trabalhabilidade das misturas. Essa observação é corroborada por outros estudos, como o de Bumrongjaroen (1999), que indicam que a redução na massa volúmica e no espalhamento médio está diretamente relacionada à taxa de incorporação de resíduos, o que gera um aumento no teor de finos das misturas. Bumrongjaroen (1999) destaca que esse efeito está vinculado à granulometria e ao módulo de finura das cinzas utilizadas.

A presença de material orgânico nas cinzas também exerce influência na trabalhabilidade da mistura, promovendo a absorção de moléculas de água, o que contribui para a diminuição do espalhamento (Teixeira et al, 2016).

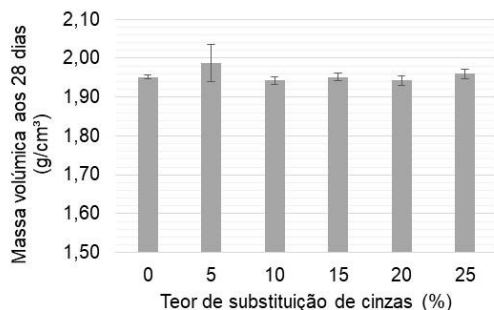
Para manter a trabalhabilidade em misturas cimentícias com diferentes teores de substituição de cimento por cinzas pesadas de biomassa, Cabrera et al (2020) sugere a incorporação de aditivos superplastificantes.

#### 3.2.2 Propriedades no estado endurecido

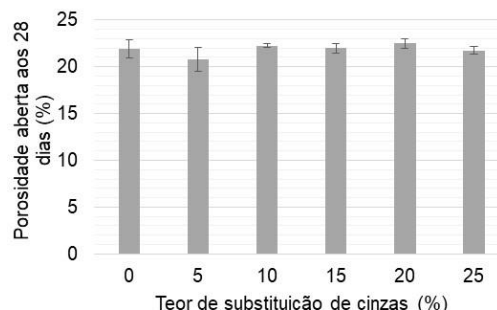
Os resultados dos ensaios de determinação da massa volúmica e da porosidade aberta estão apresentados na Figura 02 e Figura 03, respectivamente.

Aos 28 dias, a argamassa C5 apresentou a maior massa volúmica e menor porosidade aberta, enquanto a argamassa C20 possuiu a menor massa volúmica e a porosidade aberta mais elevada.

Em geral, observou-se um aumento na massa volúmica com o tempo, particularmente em algumas argamassas como a C10, sugerindo uma densificação progressiva. A variação na porosidade entre as argamassas indica que as estruturas internas das misturas sofreram alterações, as tornando menos densas e possivelmente mais permeáveis.

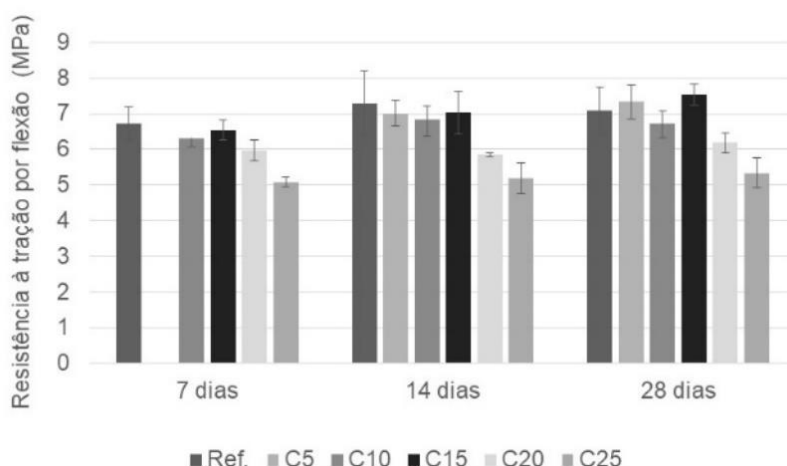


**Figura 02 - Massa volúmica aparente média aos 28 dias**



**Figura 03 - Porosidade aberta média aos 28 dias**

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias são apresentados na Figura 04 e Figura 05, respectivamente.



**Figura 04 - Resistência à tração por flexão das argamassas aos 7, 14 e 28 dias de idade**

A resistência à tração por flexão das argamassas variou com o tempo e o teor de substituição de cinzas. Aos 7 dias, a argamassa C15 apresentou a maior resistência, enquanto a C25 exibiu a menor. De modo geral, houve uma tendência de redução da resistência com o aumento da substituição de cinzas, exceto para a argamassa C15, que superou a C10, mas ficou abaixo da argamassa de referência.

Os resultados obtidos apresentam grau de concordância com os estudos de Teixeira et al. (2016) que constataram que, as argamassas contendo cinzas apresentaram valores inferiores de resistência à tração na flexão nas idades iniciais de cura, quando comparadas à argamassa de

referência, observando uma redução significativa na resistência para as argamassas com maior teor de cinzas de biomassa.

Aos 14 dias de idade, a argamassa REF e a C15 mantiveram as resistências mais elevadas. A adição de cinzas parece ter impactado negativamente ou até mesmo não ter influenciado a resistência à tração, como observado nas argamassas C20 e C25, que apresentaram resistências menores em comparação com as de menor teor de cinzas, C5 e C15.

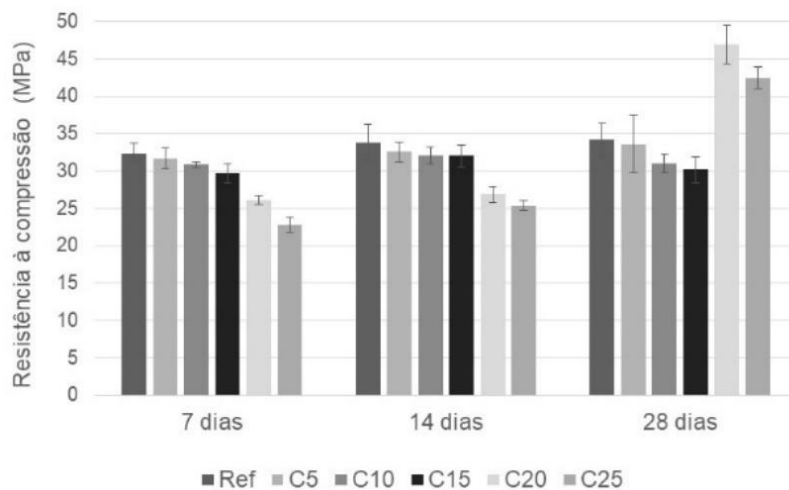
Já aos 28 dias, a maior resistência média à tração foi registrada para a argamassa C15, seguida pela argamassa C5. A tendência observada indicou que, com o aumento da substituição de cimento por cinzas, houve uma redução da resistência, sendo a argamassa C25, com maior teor de substituição, a que apresentou a menor resistência. Embora exista a possibilidade de melhoria ou estabilidade inicial da resistência com a substituição de cinzas, pode-se concluir que há uma tendência de redução em níveis mais elevados de substituição, especialmente nas amostras C20 e C25.

Ao contrário de Teixeira et al. (2016) que relataram que, nos períodos de cura de 7, 28 e 90 dias, as argamassas com 20% de cinzas volantes apresentaram resistência à flexão ligeiramente inferior à da argamassa referência. Verificou, no entanto, aos 180 dias, que a argamassa com 20% de cinzas superou o valor da referência.

A análise estatística dos resultados da resistência à compressão das argamassas revelou uma relação entre o teor de substituição de cinzas em uma mesma idade e também ao longo do tempo de cura. Em primeiro momento, ao realizar os teste de Shapiro-Wilk, foi possível identificar evidências suficientes de que os dados não seguem uma distribuição normal ( $\text{valor-p} < 0,05$ ). Sendo assim, para atender aos critérios de normalidade necessários para realização dos testes de correlação, como de Pearson e Spearman, e a análise de variância (ANOVA) foi realizada a transformação de Box-Cox, para estabilização da variância e preparação dos dados para as demais análises.

Os resultados de valor-p obtidos através da ANOVA, indicaram que tanto o teor de cinzas, quanto o tempo de cura têm um efeito significativo na resistência à compressão, bem como a existência de uma interação entre eles. Já através dos testes de correlação de Pearson e Spearman, pode-se analisar como o teor de cinza afetou a resistência à compressão das argamassas ao longo do tempo (Figura 05).

Aos 7 dias, pode-se verificar uma correlação negativa forte, a qual sugere que maiores teores de cinza estão associados a uma redução significativa da resistência à compressão, podendo indicar que o aumento do teor de cinzas tem um efeito prejudicial notável na resistência inicial das argamassas.



**Figura 05 - Resistência à compressão das argamassas aos 7, 14 e 28 dias de idade**

Aos 14 dias, a correlação negativa manteve-se forte, embora levemente inferior do que aos 7 dias. Os resultados estão de acordo com os valores levantados por Cabrera et al. (2020), que ao realizarem revisão de artigos científicos sobre a utilização de cinzas pesadas provenientes da queima de biomassa em materiais à base de cimento destacaram que, para as amostras analisadas pelos diferentes autores, a incorporação de cinzas na fabricação de betões, e conseqüentemente de argamassas, implicou em um comportamento mecânico inferior aos das amostras de referência (sem utilização de cinza). Os autores explicam essa diminuição nos valores de resistência à compressão e a tração, afirmando que o comportamento mecânico das misturas contendo resíduo estaria diretamente relacionado com a aplicação da mistura no estudo (revestimento, estrutural, entre outros), aos agregados utilizados, e ao tipo de substituição de materiais, como a utilização de cinzas como substituto do cimento ou do agregado natural.

Contudo, aos 28 dias a correlação se torna positiva, indicando uma mudança na relação entre o teor de cinzas e a resistência à compressão. Em vez de uma relação negativa como das idades anteriores, a correlação positiva obtida para a idade mais avançada sugere que um aumento no teor de cinzas, ao longo prazo, pode apresentar um efeito positivo, ou menos prejudicial, na resistência à compressão das argamassas, como pode ser percebido pelos valores de resistências das argamassa C20 e C25, que apresentaram um aumento significativo em relação às idades anteriores e também em relação à argamassa de referência.

É importante destacar que, entre os maiores teores, a argamassa C20 destacou-se, alcançando o maior valor médio de resistência. Também os estudos de Tkaczewska e Małolepszy (2009) constataram que argamassas com 20% de substituição do cimento por cinzas apresentaram os melhores resultados quando comparado com a argamassa de referência, utilizando deste resultado para atestar o comportamento pozolânico das cinzas.

O aumento dos valores de resistência à compressão das argamassas observado neste estudo pode ser interpretado como uma evidência da atividade pozolânica significativa das cinzas utilizadas. Isso ocorre porque materiais pozolânicos têm pouca influência nas propriedades mecânicas das misturas para idades iniciais de curas, mas promovem um aumento da resistência à compressão das argamassas com o prolongamento do tempo de cura (Tkaczewska e Matolepszy, 2009).

#### **4 CONCLUSÃO**

A substituição de cimento Portland por cinzas de queima de biomassa influencia as propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas de revestimento.

O aumento na substituição de cimento por cinzas conduziu, no estado fresco das misturas, a uma diminuição da trabalhabilidade e da massa volúmica e a um aumento do teor de ar incorporado nas argamassas. Já no estado endurecido, nas idades iniciais gerou uma diminuição nas resistências mecânicas, que foi revertida nas idades mais avançadas, com a argamassa com 20% de substituição atingindo um valor de resistência à compressão superior a argamassa de referência (sem cinzas) aos 28 dias, comprovando um certo grau de pozolanicidade das cinzas estudadas.

Através da caracterização das cinzas e dos resultados obtidos em argamassas, é possível concluir que a incorporação das cinzas de queima de biomassa em leito fluidizado em argamassa aparenta ser viável.

Sendo assim, tornam-se necessários novos estudos, nomeadamente: A composição química e demais características das cinzas, assim como a avaliação na possibilidade de tratamento das mesmas, como pelo processo de moagem, por exemplo; Quanto a forma de incorporação das cinzas nas misturas, como substituta do cimento ou dos agregados, considerando as características físicas semelhantes aos agregados miúdos; Quanto da dosagem de argamassas com cinzas para diferentes tipos de aplicações, com a utilização de adições e aditivos as misturas.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Instituto Politécnico de Setúbal pelo apoio ao Projeto interno ARSUS – Argamassas de Revestimento Sustentáveis e à *The Navigator Company* pela disponibilização das matérias residuais - cinzas.

#### **REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise Química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, p. 14. 2012;

AL-GHOUTI, M.A. et al.. **Recent advances and applications of municipal solid wastes bottom and fly ashes: Insights into sustainable management and conservation of resources.** Environmental Technology & Innovation, 21, p.101267, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186420315674>;

BUMRONGJAROEN, W.. **Utilization of processed fly ash in mortar.** Dissertation (Doctor of Philosophy in Environmental Engineering) - Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology. New Jersey, p. 967. 1999. Disponível em: <<https://digitalcommons.njit.edu/dissertations/967>>;

CABRERA, M. et al.. **Eco-Efficient Cement-Based Materials Using Biomass Bottom Ash: A Review.** Applied Sciences, MDPI, Volume 10, nº 22, 2020. DOI:<https://doi.org/10.3390/app10228026>;

D'ADAMO, I. et al.. **Assessing the relation between waste management policies and circular economy goals.** Waste Management, Volume 154, 2022, Pages 27-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.09.031>;

NP EN 196-1, 2006. **Métodos de ensaio de cimentos : parte 1 : determinação das resistências mecânicas.** Instituto Português da Qualidade;

NP EN 196-2, 2013. **Métodos de ensaio de cimentos - Parte 2 : Análise química dos cimentos.** Instituto Português da Qualidade;

NP EN 1097-3, 2002. **Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios.** Instituto Português da Qualidade;

NP EN 1097-6, 2003. **Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.** Instituto Português da Qualidade;

EN 1015-3, 1999. **Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).** CEN: Brussels.

EN 1015-6, 1999. **Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar.** CEN: Brussels.

EN 1015-7, 1999. **Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar.** CEN: Brussels.

EN 1015-11, 2019. **Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.** CEN: Brussels.

GOSH, A. et al.. **Reuse of fly ash and bottom ash in mortars with improved thermal conductivity performance for buildings.** Heliyon Research Article, Volume 4, Issue 11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016%2Fj.heliyon.2018.e00934>;

KĘPYS, W.. **Bottom ash obtained from biomass burning in fluidised-bed boilers as a mortar component.** 3rd International Conference on Energy

and Environmental Protection, Hebron, State of Palestine, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184600009>;

KHAN, S. et al.. **Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives.** Chemosphere, Volume 8, Part. I, fev. 2022. Disponível em: <https://shorturl.at/MuDVh>;

LI, X. et al.. **A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications.** Journal of Building Engineering, Volume 45, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103447>;

LUXÁN, M.P. et al.. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement.** Cement and Concrete Research, Volume 19, Issue 1, p. 63-68, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90066-5);

NANDA, S., BERRUTI, F.. **Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review.** Environ Chem Lett 19, 1433–1456 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>;

SAXENA, G. et al.. **Phytoremediation of heavy metal-contaminated sites: eco-environmental concerns, field studies, sustainability issues, and future prospects.** Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, Volume 249, pp.71-131, 2020. Disponível em: <https://shorturl.at/vdBdk>;

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), v. 21, n. 4, p. 974–986, out. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/GgR9NvqtH7KBQyH5KGZJJKQ/#>;

TANG, Z. et al.. **Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials.** Resources, Conservation & Recycling: X, Volume 6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>;

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](https://www.researchgate.net/publication/281712252_Characteristics_management_and_applications_of_ashes_from_thermochemical_conversion_of_biomass_to_energy);

TEIXEIRA, E. et al.. **Incorporação de cinzas de biomassa como substituto do cimento em argamassas.** II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2016. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/43200/1/2483-2.9\\_VF.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/43200/1/2483-2.9_VF.pdf);

TKACZEWSKA, E., MALOLEPSZY, J.. Hydration of coal-biomass fly ash cement. **Construction Building Materials**, Volume 23, nº 7, pp. 2694–2700, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.018>.