AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR CINZAS DE FORNOS DE PADARIA UTILIZANDO CP EM MINIATURA

Lylian Gabriele Carneiro Oliveira, Thiago de Oliveira Ribeiro, Pedro Lucas da Costa Duarte Cerqueira, Thailane de Jesus Chagas dos Santos, Fernanda Nepomuceno Costa

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)/Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC), Rua Rui Barbosa, S/N, campus da UFRB - 44380-000 - Cruz das Almas-BA, Brasil, lyliangabriele@aluno.ufrb.edu.br, thiagoribeiro@aluno.ufrb.edu.br, pedrolucascerqueira@hotmail.com, thailanesantos@aluno.ufrb.edu.br, fernandacosta@ufrb.edu.br.

Resumo

Nos últimos anos, o setor de panificação no Brasil cresceu, resultando em mais resíduos, especialmente as cinzas provenientes dos fornos. A indústria cimenteira tem se destacado ao usar cinzas como adições alternativas ao clínquer para tornar o processo mais sustentável. Nesse contexto, este estudo investiga a reutilização dessas cinzas em argamassas, substituindo 0%, 5%, 10% e 15%, em peso, o cimento Portland por cinzas resultantes de uma padaria que utiliza a madeira da jurema-preta como fonte de energia nos seus fornos. Foram realizados testes para caracterizar as cinzas e avaliar a densidade de massa no estado endurecido, absorção de água por capilaridade e resistências à tração na flexão e à compressão das argamassas produzidas. Os resultados mostraram que as cinzas não têm propriedades pozolânicas e que a sua incorporação nas argamassas aumentou a absorção de água e prejudicou o desempenho mecânico. A técnica em miniatura foi eficaz, mas apresentou algumas discrepâncias indicando a necessidade de mais pesquisas para aprimorar a técnica e melhorar a avaliação das argamassas com cinzas.

Palavras-chave: Cinzas de padaria. Resíduos. Argamassas. Miniatura.

Área do Conhecimento: Engenharia Civil.

Introdução

Nos últimos anos, o setor de panificação e confeitaria no Brasil tem registrado um crescimento notável, com a abertura diária de 154 novas padarias e um aumento no número total de estabelecimentos de 240 mil em 2019 para 295 mil em 2023 (Rovaroto, 2023). Esse crescimento, embora positivo para a economia, tem levado a uma maior concentração urbana e, consequentemente, a um aumento na geração de resíduos. Entre esses resíduos, as cinzas provenientes da queima de lenha em fornos são particularmente consideráveis, representando cerca de 3% da massa da madeira queimada (Borlini *et al.,* 2005). O descarte inadequado dessas cinzas contribui para problemas ambientais, incluindo poluição e acúmulo de detritos.

Para enfrentar esses desafios, a indústria cimenteira brasileira tem se destacado na adoção de práticas sustentáveis, utilizando adições minerais para substituir parcialmente o clínquer, o principal componente do cimento Portland (ABNT, 2018). Este clínquer é produzido a partir da mistura de calcário e argila aquecida a altas temperaturas (Neville, 1997). A substituição do clínquer por materiais alternativos, como cinzas volantes e pozolanas, tem sido uma prática muito comum no Brasil há mais de 50 anos, ajudando a reduzir as emissões de CO_2 associadas à produção de cimento (SNIC, 2023). A atualização da NBR 16697 (ABNT, 2018) reforçou essa prática, permitindo o uso ampliado de adições minerais para melhorar as propriedades do cimento e reduzir seu impacto ambiental.

Além disso, a técnica em miniatura tem surgido como uma solução inovadora para a avaliação de desempenho em estudos laboratoriais. Esta técnica facilita a realização de análises com amostras menores, o que reduz o consumo de materiais e reagentes, além de minimizar os custos e o volume de amostras necessárias (Beaudoin, 2001). Ao aplicar essa técnica, é possível realizar testes mais eficientes e sustentáveis, contribuindo para a gestão de resíduos e a redução do desperdício.

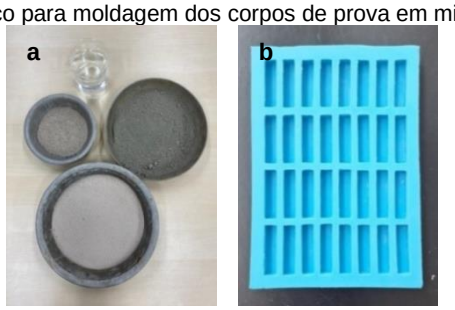
Com base nessa abordagem, o objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de argamassas para revestimento de paredes e tetos, substituindo parcialmente o cimento Portland por cinzas de fornos de

padaria. A pesquisa visa caracterizar as cinzas, analisar seu efeito nas propriedades das argamassas no estado endurecido e verificar a eficácia da técnica em miniatura na avaliação de desempenho dos materiais, alinhando-se às práticas de gestão sustentável e aproveitamento de resíduos.

Metodologia

A pesquisa foi conduzida no laboratório de Materiais e Sistemas Construtivos da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), no Campus Cruz das Almas. O estudo iniciou com a definição do programa experimental e a coleta de resíduos de cinzas de fornos de padaria (RCP) de uma panificadora local. Os materiais utilizados nos ensaios (Figura 1) foram o cimento CP V - ARI, escolhido por seu baixo teor de adições, areia natural peneirada e seca em estufa a (105 ± 5) °C; água destilada, resíduo de cinzas de padaria (RCP) e um molde prismático retangular de silicone de 32 cavidades, cada uma com dimensões de 10 x 10 x 40 mm.

Figura 1 – Materiais utilizados (a) Água, RCP, CP V - ARI e areia natural para preparação das argamassas; (b) Molde prismático para moldagem dos corpos de prova em miniatura.



Fonte: os autores.

O RCP foi submetido a um processo de beneficiamento com o objetivo de remover impurezas grosseiras indesejáveis. Iniciou-se com a secagem em estufa a (100 ± 5) ºC por 24 horas. Após esfriar, as cinzas foram peneiradas usando uma série de peneiras com aberturas graduais de 2,00 mm, 1,20 mm, 600 µm, 300 µm, 150 µm e 75 µm. A amostra selecionada para a pesquisa foi a passante na peneira de 75 µm (nº 200), representando 20,7% da amostra inicial (Figura 2). Essa escolha visa aproveitar a finura do RCP, que melhora o efeito fíller e reduz a porosidade no corpo de prova endurecido.

Figura 2 – Cinzas de forno de padaria beneficiada.

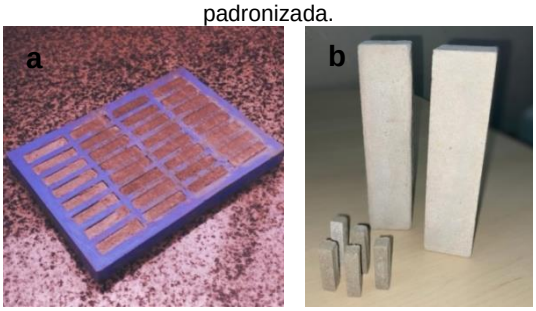
Fonte: os autores.

Para avaliar as características do RCP e verificar se ele atende aos requisitos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para a classificação de um material pozolânico, foram realizados ensaios para a determinação da massa específica do material, conforme a NM 23 (ABNT, 2000), a avaliação do índice de atividade pozolânica aos 28 dias, seguindo a NBR 5752 (ABNT, 2014), a medição da perda ao fogo de acordo com a NBR 17086-6 (ABNT, 2023), e a análise do teor de umidade do resíduo conforme a NM 24 (ABNT, 2002).

Após o beneficiamento do RCP, foram preparadas argamassas com diferentes composições. A argamassa sem resíduo foi chamada de referência (0%), e aquelas com substituição parcial de cimento Portland por cinza de padaria foram categorizadas em 5%, 10% e 15%. O traço utilizado foi 1:6, em peso, com a relação água/(cimento + RCP) de 1,05, conforme os parâmetros estabelecidos por Guimarães *et al.,* (2019). A mistura dos materiais foi feita com um misturador mecânico e um recipiente de material não absorvente, de acordo com as diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005).

Para avaliar a resistência mecânica das argamassas nesses teores e a viabilidade do uso de formas em miniatura, foram moldados corpos de prova com dimensões de 10 mm de espessura, 10 mm de largura e 40 mm de comprimento, além de corpos de prova com dimensões de 40 mm de espessura, 40 mm de largura e 160 mm de comprimento, conforme os padrões estabelecidos na NBR 13279 (ABNT, 2005), com o intuito de realizar a comparação. Em seguida, foram realizados os seguintes ensaios: densidade de massa no estado endurecido conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005), absorção de água por capilaridade segundo a NBR 9779 (ABNT, 2012) e resistência à tração na flexão e à compressão de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 3 – (a) Moldagem dos corpos de prova em miniatura; (b) Comparativo visual entre a amostra em miniatura e a padronizada.



Fonte: os autores.

Resultados

Os resultados da caracterização da areia natural estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização da areia natural.

Massa Específica (g/cm³)	2,62
Massa Unitária (g/cm³)	1,59
Diâmetro Médio D50 (µm)	430
Módulo de Finura	2,08
Teor de Material Pulverulento (%)	2,19 ± 0,15

Fonte: os autores.

Os resultados da caracterização do RCP, realizados para identificar as propriedades das cinzas e avaliar suas características para classificação como material pozolânico, estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização das cinzas de fornos de padaria.

Massa Específica (g/cm³)	2,70
Índice de Atividade Pozolânica aos 28 dias (%)	62,70
Perda ao Fogo (%)	50
Teor de Umidade (%)	0,05

Fonte: os autores.

Para o ensaio de densidade de massa aparente, foram preparados 12 corpos de prova para cada tipo de molde, com 3 corpos para cada teor de adição do RCP. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e curados em água saturada com cal por 28 dias. Aos 28 dias, as argamassas foram submetidas ao ensaio e foram obtidos os resultados apresentados na Figura 4.

Para analisar as composições de argamassas pela determinação de água por capilaridade, a amostra consistiu em três corpos de prova para cada teor. Os resultados deste ensaio obtidos a partir da média dos valores encontrados em cada corpo de prova estão descritos na Figura 5.

Figura 4 – Resultados obtidos pela determinação da densidade de massa aparente a partir da média dos valores encontrados em cada corpo de prova.

Fonte: os autores.

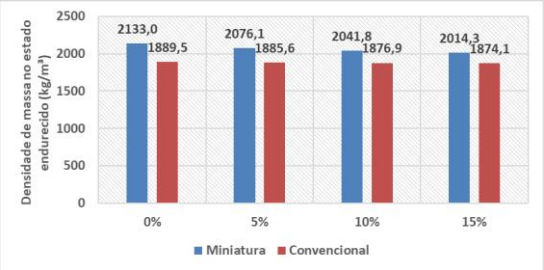
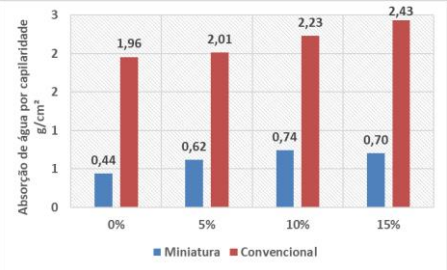


Figura 5 – Resultados obtidos pela determinação da absorção de água por capilaridade a partir da média dos valores encontrados em cada corpo de prova.



Fonte: os autores.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão, foram preparados 24 corpos de prova para cada molde: 12 com 14 dias de idade e 12 com 28 dias de idade, distribuídos em três corpos para cada teor de adição do RCP. A Figura 6 e a Figura 7 mostram graficamente o comportamento das amostras no ensaio de tração na flexão aos 14 e 28 dias, respectivamente. Já a Figura 8 e a Figura 9 ilustram o comportamento das amostras no ensaio de resistência à compressão aos 14 e 28 dias, respectivamente.

Figura 6 – Resultados de resistência à tração na flexão aos 14 dias.

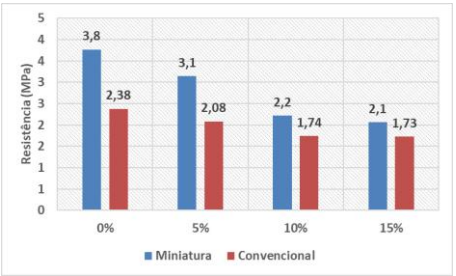
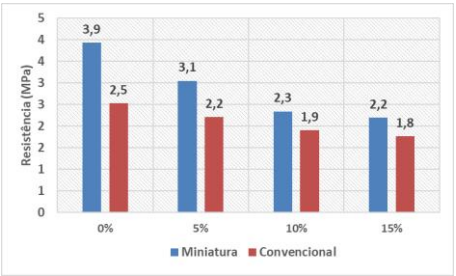


Figura 7 – Resultados obtidos de resistência à tração na flexão aos 28 dias.



Fonte: os autores.

Figura 8 – Resultados de resistência à compressão aos 14 dias.

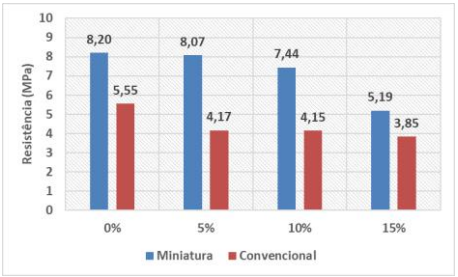
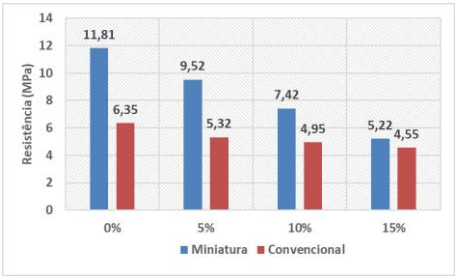


Figura 9 - Resultados de resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: os autores.

Discussão

A massa específica do RCP foi determinada em 2,70 g/cm³, enquanto a do cimento CP V ARI foi de 3,14 g/cm³, indicando que o RCP é menos denso que o cimento. Estudos de Souza (2023) corroboram esses resultados, mostrando que as cinzas de padaria têm densidade semelhante.

O índice de atividade pozolânica aos 28 dias foi de 62,7%, abaixo do valor mínimo de 90% exigido pela NBR 12653 para que o material seja considerado pozolânico. Souza (2023) encontrou um IAP de 56% para cinzas de padaria, enquanto Mendonça (2023) obteve 74,9% para cinzas de olaria.

Sabendo que o RCP não passou por tratamento térmico, analisou-se que o material teve uma perda de massa de 50% a partir do ensaio de perda ao fogo, bem acima do limite de 6% estabelecido pela NBR 12653. Souza (2023) encontrou uma perda de 44,5% para cinzas de padaria, já Resende (2013) relatou que cinzas de cavaco de eucalipto tinham uma composição química de 27,4% óxido de cálcio, 22,6% óxido de alumínio e 10,9% óxido de ferro, com perdas ao fogo de 47,5% e 51,0% para cinzas *in natura* e moídas, respectivamente, reduzindo para 15% após requeima.

Já o ensaio para determinar o teor de umidade do RCP revelou uma média de 0,05%, o que é esperado devido ao processo de queima a altas temperaturas que reduz a umidade do material Esse valor está abaixo do limite máximo de 3% estabelecido pela NBR 12653 e corresponde ao resultado encontrado por Souza (2023) ao analisar cinzas de padaria.

Os ensaios de densidade mostraram que a densidade do material endurecido diminui com o aumento da substituição do cimento Portland por RCP, provavelmente devido ao aumento de ar incorporado. Embora haja diferenças numéricas, corpos de prova em miniatura e convencionais seguem a mesma tendência, e todas as argamassas, em ambos os formatos, se enquadram na classe DE4. Isso indica que, apesar da substituição, as argamassas mantiveram uma densidade adequada conforme as normas.

Os dados do ensaio de absorção de água mostram que a adição de RCP aumentou a absorção de água, sendo a absorção máxima ocorrendo após 72 horas para todos os teores de argamassa, e quanto maior a quantidade de RCP, maior foi a absorção capilar. A comparação revelou que a absorção das amostras em miniatura foi semelhante à das amostras convencionais, indicando que a escala reduzida não comprometeu a avaliação de desempenho. No entanto, foram encontradas discrepâncias, possivelmente devido às adaptações necessárias para os ensaios em miniatura.

A substituição parcial do cimento Portland por RCP resultou em redução na resistência à tração na flexão e à compressão tanto aos 14 quanto aos 28 dias. No entanto, as resistências das amostras em miniatura foram comparáveis às das amostras convencionais, demonstrando uma diminuição geral nas propriedades mecânicas com o aumento da substituição.

Conclusão

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

- A massa específica do RCP foi determinada como 2,70 g/cm³, enquanto o cimento CP V-ARI apresentou 3,14 g/cm³, indicando que o RCP é menos denso que o cimento.
- A caracterização do RCP revelou que ele não pode ser classificado como material pozolânico. Apesar do teor de umidade estar abaixo do limite estabelecido pela NBR 12653, o índice de atividade pozolânica aos 28 dias ficou abaixo do mínimo de 90% exigido, e a perda ao fogo foi de 50%, superando o limite de 6% estabelecido pela mesma norma.
- Nos ensaios do estado endurecido, foi observado que a substituição do cimento Portland por RCP reduziu a densidade do material, embora todas as argamassas permanecessem na classe DE4. A absorção de água por capilaridade aumentou com a quantidade de RCP, atingindo o máximo após 72 horas.
- Além disso, tanto a resistência à tração na flexão quanto a resistência à compressão diminuíram com a substituição do cimento por RCP, aos 14 e 28 dias.
- Ao analisar a utilização de corpos de prova em miniatura, observou-se que essa técnica preservou a precisão e a consistência dos resultados em comparação com os corpos de prova convencionais, confirmando sua eficácia. No entanto, recomenda-se a realização de estudos adicionais para aprimorar as metodologias de adaptação dos testes.

Referências

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

_____. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.** NBR 9779: Rio de Janeiro, 2012.

_____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** NBR 13280: Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Cimento Portland – Análise química – Parte 6: Determinação da perda ao fogo.** NBR 17086-6: Rio de Janeiro, 2023.

_____. **Cimento Portland – Requisitos**. NBR 16697: Rio de Janeiro, 2018.

_____. **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica**. NBR NM 23: Rio de Janeiro, 2000.

_____. **Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. NBR 5752: Rio de Janeiro, 2014.

_____. **Materiais Pozolânicos – Determinação do teor de umidade**. NBR NM 24: Rio de Janeiro, 2002.

_____. **Materiais Pozolânicos – Requisitos.** NBR 12653: Rio de Janeiro, 2014.

BEAUDOIN, J. J. ***Miniaturized Techniques. Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology Principles, Techniques and Applications*** – V.S. Ramachandran & James J. Beaudoin Noyes Publications, 2001.

BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. **Cinzas da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. Parte I: características da cinza.** Universidade Estadual do Norte Fluminense, Goytacazes – RJ; Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena – SP, 2005.

GUIMARÃES, C. C.; SANTOS, I. C. S.; ALMEIDA, M. S. S. **Cinza de padaria como adição mineral em substituição parcial ao cimento Portland na produção de argamassas.** Anais do 61ª Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2019, IBRACON, Fortaleza – CE, 2019.

MENDONÇA, I. V. **Caracterização e avaliação da atividade pozolânica da cinza de biomassa residual de fornos da indústria cerâmica de Crateús.** Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, UFC, Crateús – CE, 2023.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2 ed. São Paulo – SP: PINI, 1997.

RESENDE, D. S. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de Eucalipto como material suplementar.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto-MG, 2013.

ROVAROTO, I. Exame, 2023**. 154 novas padarias são abertas por dia no Brasil – e mercado é dominado por MEIs.** Disponível em: https://exame.com/negocios/154-novas-padarias-sao-abertas-por-dia-no-brasil-e-mercado-e-dominado-por-meis/. Acesso em: 26 jul. 2024.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual 2022.** São Paulo – SP, 2023.

SOUZA, C. O. de. **Avaliação do uso de resíduos de cinzas de fornos de padaria em matrizes cimentícias utilizando corpos de prova em miniatura.** Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia), Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas – BA, 2023.

Agradecimentos

Ao grupo de pesquisa em Valorização de Resíduos na Construção Civil da UFRB (Valora Civil), à FAPESB e ao PIBIC no amparo e fomento nas pesquisas e às empresas Massa Fort Concreto e MC-Bauchemie pela doação dos materiais.