TEOR DE AR INCORPORADO DE ARGAMASSAS COM RESÍDUOS DE CINZA DE CAVACO DE EUCALIPTO E LODO DE ETE GERADOS NA INDÚSTRIA MOVELEIRA

Air content of mortars with eucalyptus chip ash and sludge waste generated in the furniture industry

Roziani Maria Gomes
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | roziani.gomes@ufv.br

José Maria Franco de Carvalho
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | josemaria.carvalho@ufv.br

Gustavo Henrique Nalon
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | gustavo.nalon@ufv.br

Hellen Regina de Carvalho Veloso Moura
Universidade Federal de Viçosa | Viçosa, Minas Gerais | hellen.moura@ufv.br

Resumo

A produção de cimento Portland é responsável por elevadas taxas de emissões de CO_2, o que representa um desafio para a sustentabilidade na construção civil. A literatura carece de estudos sobre os efeitos da incorporação de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de Estação de Tratamento de Esgoto em determinadas propriedades de matrizes cimentícias. Logo, foi utilizado um Delineamento Composto Central (CCD) para investigar os efeitos da cal, agregados e resíduos da indústria moveleira (adição de 5–25% de cinza e/ou 3–15% de lodo, com relação à massa de aglomerantes) no teor de ar incorporado das argamassas. O teor de ar incorporado variou de 8,46% a 24,88%, sendo influenciado principalmente pela relação areia/aglomerantes e lodo/aglomerantes. Um modelo de regressão e uma superfície de resposta foram elaborados. O uso desses resíduos pode proporcionar teores de ar incorporado apropriados para diferentes aplicações, levando a materiais de construção mais sustentáveis.

Palavras-chave: Argamassas sustentáveis; Cinza de cavaco de eucalipto; Lodo de ETE; Teor de ar incorporado; Delineamento Composto Central.

ABSTRACT

The production of Portland cement is responsible for high levels of CO_2 emissions, posing a challenge for sustainability in construction. The literature lacks studies on the effects of incorporating eucalyptus wood chip ash and sewage treatment plant sludge on some properties of cementitious matrices. Then, we used a Central Composite Design (CCD) to investigate the effects of lime, aggregates, and industrial wood wastes (addition of 5–25% ash and/or 3–15% sludge, by mass of binders) on the air content of mortars. The air content results ranged from 8.46% to 24.88%, mainly influenced by the sand-to-binder and sludge-to-binder ratios. A regression model and response surface were developed. The use of these wastes can provide appropriate air content values for different applications, contributing to the development of more sustainable construction materials.

Keywords: Sustainable mortars; Eucalyptus wood chip ash; Sewage treatment plant sludge; Air content; Central Composite Design.

1 INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland é responsável por elevadas taxas de emissões globais de CO_2, o que contribui significativamente para o aquecimento global e as mudanças climáticas (Bozorgmehr, Nemati, 2023). A substituição parcial do cimento Portland por resíduos industriais pode ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e o custo do material, embora os benefícios específicos variem dependendo da disponibilidade de recursos e do cenário logístico local (Jamora *et al.,* 2023).

Por exemplo, resíduos de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) gerados por indústrias moveleiras podem ser utilizados para produção de materiais de construção sustentáveis (Gomes *et al.*, 2023). No contexto da presente pesquisa, a empresa Itatiaia Móveis S/A (Ubá, Brasil) busca soluções viáveis para a destinação adequada dos resíduos gerados em seu processo de produção moveleira, como por exemplo cinzas geradas no processo de incineração de cavacos de eucalipto utilizados nos aquecedores, lodos gerados no processo de limpeza dos ganchos de pintura (material de aspecto sólido) e da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), entre outros.

No entanto, para garantir o desempenho adequado desses materiais sustentáveis, é fundamental avaliar diversas propriedades, incluindo o teor de ar incorporado, que pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade da matriz cimentícia. O conhecimento do teor de ar incorporado dos materiais é importante, pois este parâmetro está diretamente relacionado à estrutura dos poros do concreto endurecido (Chatterji, 2003). A relação água-cimento, combinada à eficiência da compactação e ao uso de diferentes tipos e teores de aditivos ou adições, influencia diretamente o teor de ar incorporado na matriz cimentícia (Mehta, Moteiro, 2006).

Nesse contexto, o delineamento composto central (CCD) surge como uma ferramenta eficaz para avaliação dos efeitos da incorporação de diferentes teores de cinza e lodo no teor de ar incorporado de compósitos cimentícios eco-eficientes. Introduzido por Box e Wilson em 1951, o CCD consiste em uma evolução do esquema fatorial 2k ou fatorial fracionário 2k-p, aumentado pontos centrais e pontos axiais e oferecendo uma solução para problemas que necessitavam de muitos experimentos para um pequeno número de fatores (Teófilo, Ferreira, 2006). No método CCD, há três grupos de pontos de projeto: a) pontos axiais simbolizados como pontos de estrela localizados nos eixos com uma distância de ± α; b) pontos fatoriais situados nos vértices do cubo, com + 1 e –1 em valores codificados; c) e ponto central, no centro do cubo, com um valor codificado de zero para todas as variáveis (Ferdosian, Camões, 2017). Então, metodologias de superfície de resposta podem ser utilizadas para gerar equações matemáticas que relacionam variáveis de entrada e variáveis de resposta (Adamu *et al.*, 2021).

A literatura carece de estudos estatísticos relacionados aos efeitos da interação de resíduos de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de ETE da indústria moveleira, no teor de ar incorporado de matrizes cimentícias. Desta forma, esta pesquisa pretende preencher essa lacuna, aplicando um CCD para investigação do teor de ar incorporado destes materiais, avaliando a viabilidade técnica da incorporação de resíduos da indústria moveleira em argamassas mistas de cal e cimento.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

Nesta pesquisa, foi utilizado cimento Portland CP V com massa específica de 3,05 g/cm³, cal hidratada CH-III com massa específica de 2,39 g/cm³, areia natural quartzosa com massa específica de 2,60 g/cm³, além de areia artificial gnáissica com massa específica de 2,86 g/cm³.

Dois diferentes tipos de resíduos foram coletados de forma representativa na indústria moveleira Itatiaia Móveis S/A, em Ubá (Minas Gerais, Brasil): os resíduos de cinza de caldeira (Figura 1a), que é subproduto da incineração de cavacos de eucalipto utilizados na geração de energia para o aquecimento das caldeiras nos processos industriais, além de lodo gerado na ETE da fábrica (Figura 1b). A massa específica dos resíduos de cinza e lodo foi igual a 2,96 g/cm³ e 1,82 g/cm³ respectivamente.

Figura 1: Resíduos da indústria moveleira: (a) cinza de cavaco de eucalipto; (b) lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)



(a) (b)

2.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Um Delineamento Composto Central (CCD) foi o método experimental utilizado para determinar a influência da composição da argamassa no teor de ar incorporado da mesma. Apresenta-se na Tabela 1 as composições produzidas no delineamento experimental, em níveis reais, utilizando-se o software de análise estatística Minitab 19. A significância estatística foi avaliada para entender os efeitos das relações cal/cimento, areia/aglomerantes, cinza/aglomerantes e lodo/aglomerantes no teor de ar incorporado. Todas as argamassas foram produzidas com 30% de areia natural e 70% de areia artificial. A relação água/aglomerantes foi ajustada para obtenção de um índice de consistência de 255±5 mm. Os ensaios de incorporação de ar foram realizados conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005), segundo mostrado na Figura 2.

Tabela 1: Proporções entre materiais definidas no delineamento composto central utilizado no presente estudo

Proporções entre componentes das misturas					
Traço	**Relação cal/cimento**	**Relação areia/aglomerantes**	**Relação cinza/aglomerantes (%)**	**Relação lodo/aglomerantes (%)**	**Relação água/aglomerantes**
1	0,33	2	10	6	0,73
2	0,67	2	10	6	0,70
3	0,33	3	10	6	0,87
4	0,67	3	10	6	0,85
5	0,33	2	20	6	0,84
6	0,67	2	20	6	0,74
7	0,33	3	20	6	0,88
8	0,67	3	20	6	0,89
9	0,33	2	10	12	0,79
10	0,67	2	10	12	0,75
11	0,33	3	10	12	0,92
12	0,67	3	10	12	0,83
13	0,33	2	20	12	0,81
14	0,67	2	20	12	0,78
15	0,33	3	20	12	0,96
16	0,67	3	20	12	0,92
17	0,50	2,5	15	9	0,84
18	0,50	2,5	15	9	0,84
19	0,50	2,5	15	9	0,84
20	0,50	2,5	15	9	0,84
21	0,16	2,5	15	9	0,87
22	0,84	2,5	15	9	0,80
23	0,50	1,5	15	9	0,69
24	0,50	3,5	15	9	0,99
25	0,50	2,5	5	9	0,81
26	0,50	2,5	25	9	0,90
27	0,50	2,5	15	3	0,85
28	0,50	2,5	15	15	0,90
29	0,50	2,5	15	9	0,84
30	0,50	2,5	15	9	0,84

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados de teor de ar incorporado obtidos para os 30 traços de argamassa produzidos estão apresentados na Tabela 2. Observa-se que os valores de teor de ar incorporado variaram entre 8.46% e 24.88%. O menor teor de ar incorporado foi observado no traço 23, o qual apresentava a menor relação

areia/aglomerantes (1,5). O maior teor de ar incorporado foi verificado no traço 27, o qual apresentava uma combinação de elevados valores de relação cal/cimento e cinza/aglomerantes.

Figura 2: Ensaio para determinação do teor de ar incorporado das argamassas



Tabela 2: Resultados de teor de ar incorporado das argamassas produzidas na presente pesquisa

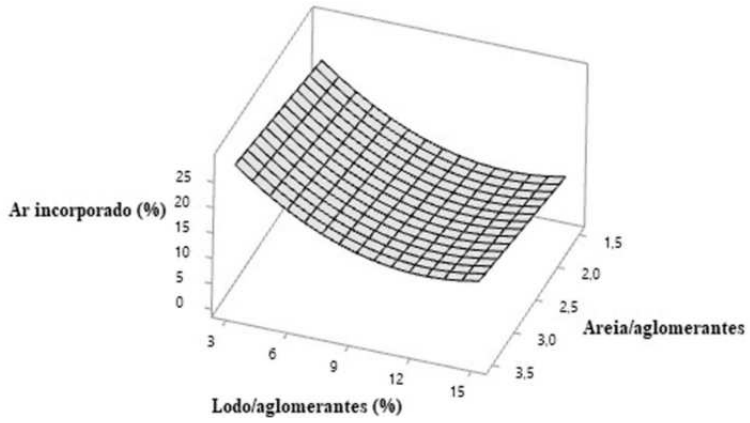
Traço	Teor de ar incorporado (%)
1	13,69
2	13,62
3	20,63
4	15,62
5	22,97
6	13,67
7	17,20
8	18,08
9	8,85
10	9,32
11	11,48
12	12,19
13	10,57
14	8,97
15	12,01
16	11,25
17	11,83
18	12,12
19	12,64
20	11,56
21	9,98
22	13,27
23	8,46
24	15,55
25	13,70
26	13,04
27	24,88
28	11,59
29	12,43
30	12,70

Para melhor compreensão dos resultados, a montagem do experimento em CCD permitiu a criação de um modelo de superfície de resposta considerando apenas os efeitos das variáveis cuja influência no teor de ar incorporado era estatisticamente significante. Tais análises estatísticas consideraram um nível de significância de 0,05. Apenas a influência das relações areia/aglomerantes e lodo/aglomerantes (%) se mostrou estatisticamente significativa no valor do teor de ar incorporado. Portanto, a Figura 3 apresenta a superfície de resposta obtida neste estudo, considerando-se as variáveis independentes que estatisticamente afetam a variável resposta. O coeficiente de determinação (R^2) ajustado foi igual a 76,62% e a equação de regressão que define o modelo, em unidades não codificadas, é apresentada na Equação (1).

Também é importante discutir que o uso de aditivos incorporadores de ar na formulação de argamassas é uma opção comum para melhorar propriedades no estado fresco, como a diminuição da densidade e aumento da trabalhabilidade. Após o endurecimento, estes aditivos também podem reduzir o módulo de elasticidade. Além disso, eles podem afetar o empacotamento de partículas das argamassas, uma vez que as bolhas de ar exercem grande influência tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. É importante realizar uma cuidadosa dosagem do aditivo incorporador de ar, uma vez que o volume de ar incorporado é muito sensível à quantidade e qualidade do aditivo (Romano *et al.,* 2015). No presente estudo experimental,

o TAI das argamassas se mostrou diretamente relacionado a alguns dos materiais utilizados em sua composição. De fato, a escolha dos agregados, aditivos e adições influencia significativamente propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica, aderência e durabilidade de materiais cimentícios (Mehta, Monteiro, 2006). Logo, compreender a interação entre os componentes é essencial para otimizar o desempenho das argamassas em diferentes contextos construtivos.

Figura 3: Superfície de resposta obtida, considerando-se as variáveis independentes (relação lodo/aglomerante e relação areia/aglomerantes) que estatisticamente afetam a variável resposta (teor de ar incorporado)



$$TAI = 12{,}271 + 1{,}291.B - 3{,}226.D + 1{,}489.D^2 \quad (1)$$

Onde: TAI é o teor de ar incorporado (em %); B é relação areia/aglomerantes; e D é a relação lodo/aglomerantes (%).

Os resultados obtidos na presente pesquisa são similares aos observados em trabalhos prévios que também investigaram o teor de ar incorporado em argamassas de assentamento ou revestimento, como por exemplo Carrajola *et al.* (2021), que observaram valores de teor de ar incorporado entre 12% e 24% em argamassas contendo cinza volante, cal aérea e agregados leves; Pedroso (2020), que verificaram valores em torno de 21% em argamassas com aerogel de sílica; e Pczieczek *et al*. (2018), que reportaram valores de teor de ar incorporado entre 1% e 22% em argamassas com poliestireno expandido e resíduos de borracha.

4 CONCLUSÃO

Logo, os resultados deste trabalho indicaram os efeitos de resíduos de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de ETE no teor de ar incorporado de argamassas mistas de cal e cimento. Valores de teor de ar incorporado entre 8,46% e 24,88% foram obtidos, além de um modelo de regressão e da representação de superfície de resposta baseados nos resultados experimentais, marcando mais um passo no desenvolvimento de matrizes cimentícias eco-eficientes que poderão mitigar o desperdício de resíduos da indústria moveleira, reduzindo os impactos ambientais causados pelos mesmos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação dos efeitos de resíduos de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de ETE em outras propriedades relacionadas ao desempenho de argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência, entre outras), além da realização de análises de ciclo de vida das diversas misturas para avaliar os benefícios ambientais em termos de redução de emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia e recursos naturais.

5 GRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido, que foi essencial para a realização deste trabalho e divulgação de seus resultados. Os autores também agradecem ao Grupo de Pesquisa SICon-CNPq/UFV e aos grupos parceiros da Rede Mineira de Pesquisa, Desenvolvimento Científico, Tecnológico e Inovação por fornecerem infraestrutura e valiosa assistência técnica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278.** *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado*. 2005.

ADAMU, M., TRABANPRUEK, P., JONGVIVATSAKUL, P., LIKITLERSUANG, S., & IWANAMI, M. Mechanical performance and optimization of high-volume fly ash concrete containing plastic wastes and graphene nanoplatelets using response surface methodology. **Construction and Building Materials**, 308, 125085. 2021.https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125085

BOZORGMEHR NIA, S., & NEMATI CHARI, M. Applied development of sustainable-durable high-performance lightweight concrete: Toward low carbon footprint, durability, and energy saving. ***Results in Materials*****,** *20*, 100482. 2023. https://doi.org/10.1016/J.RINMA.2023.100482

CARRAJOLA, R., HAWREEN, A., FLORES-COLEN, I., & DE BRITO, J. Fresh properties of cement-based thermal renders with fly ash, air lime and lightweight aggregates. ***Journal of Building Engineering***, *34*, 101868. 2021.https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101868

CHATTERJI, S. Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents. ***Cement and Concrete Composites*****,** *25*(7), 759–765. 2003. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00099-9

FERDOSIAN, I., & CAMÕES, A. Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology. ***Cement and Concrete Composites***, *84*, 146–156. 2017. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.08.019

GOMES, R., TIBIRIÇÁ, A., NALON, G., & CARVALHO, J. M. *Use of residues from the furniture industry as a construction material: an inventory and proposal for the furniture hub of Ubá, MG, Brazil*. 2023. https://doi.org/10.55449/conresol.6.23.V-005

JAMORA, J. B., GO, A. W., GUDIA, S. E. L., GIDUQUIO, M. B., & LORETERO, M. E. Evaluating the use of rice residue ash in cement-based industries in the Philippines – Greenhouse gas reduction, transportation, and cost assessment. ***Journal of Cleaner Productio****n*, *398*, 136623. 2023.https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136623

MEHTA, P., & MONTEIRO, P. *Microstructure, Properties and Materials* (New York: McGraw-Hill (ed.); P. Concrete). 2006.

PCZIECZEK, A., SCHACKOW, A., EFFTING, C., GOMES, I. R., & DIAS, T. F. Properties of mortars containing tire rubber waste and expanded polystyrene (EPS). ***Journal of Urban and Environmental Engineering***, 219–225. 2018. https://doi.org/10.4090/juee.2017.v11n2.219225

PEDROSO, M., FLORES-COLEN, I., SILVESTRE, J. D., GOMES, M. G., SILVA, L., & ILHARCO, L. Physical, mechanical, and microstructural characterisation of an innovative thermal insulating render incorporating silica aerogel. ***Energy and Buildings***, *211*, 109793. 2020.https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109793

ROMANO, R. C. D. O., TORRES, D. D. R., & PILEGGI, R. G. Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. ***Construction and Building Materials***, *82*, 219–226. 2015. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.067

TEÓFILO, R. F., & FERREIRA, M. M. C. Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. ***Química Nova***, *29*(2), 338–350. 2006. https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000200026