Potencial da Escória de Forno Panela como Material Cimentício Suplementar: Influência na Resistência Mecânica e Microestrutura

Potential of Ladle Furnace Slag as a Supplementary Cementitious Material: Influence on Strength and Microstructure

Everton de Freitas Cordova de Souza
Universidade Estadual de Campinas | Campinas, São Paulo | e233480@dac.unicamp.br

Tayná Fracão da Silva
Universidade Estadual de Campinas | Campinas, São Paulo | e261851@dac.unicamp.br

Eduardo Freire Mariano
Universidade Estadual de Campinas | Campinas, São Paulo | e272628@dac.unicamp.br

Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira
Universidade Estadual de Campinas | Campinas, São Paulo | gisleiva@unicamp.br

Resumo

A Escória de Forno Panela (EFP) é um resíduo siderúrgico com produção anual de cerca de 20 milhões de toneladas mundialmente. Sua composição rica em óxidos e hidróxidos de cálcio lhe confere propriedades hidráulicas, despertando interesse de seu uso como Material Cimentício Suplementar (MCS). No entanto, seus efeitos práticos carecem de investigação, particularmente por conta de variações em lotes, com propriedades físico químicas alteradas de acordo com sua geração. Neste sentido, este trabalho avalia argamassas com substituição de 30% do Cimento Portland (CP) por EFP nas idades de 28 e 180 dias, bem como de verificar os efeitos de sua combinação com Metacaulim (MK). Além da caracterização, analisou-se a microestrutura por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados mostraram que a incorporação de EFP reduziu a resistência inicial das argamassas, mas com melhoras a longo prazo. A microestrutura revelou refinamento dos poros pelo efeito fíler e formação de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), sem impactos significativos da combinação com MK. Constatada sua viabilidade como MCS, o uso da EFP na construção civil contribui para a economia circular entre as indústrias do aço e da construção.

Palavras-chave: Resíduo industrial; Economia circular; Material Cimentício Suplementar; Microestrutura; Argamassa.

ABSTRACT

Ladle Furnace Slag (LFS) is a steel waste with an annual production of approximately 20 million tons worldwide. Its composition, rich in calcium oxides and hydroxides, gives it hydraulic properties, arousing interest in its use as a Supplementary Cementitious Material (SCM). However, its practical effects lack investigation, particularly due to batch variations, with physical and chemical properties changing according to its generation. In this sense, this work evaluates mortars with 30% replacement of Ordinary Portland Cement (PC) by LFS at ages of 28 and 180 days, as well as to verifying the effects of its combination with Metakaolin (MK). In addition to the characterization in the hardened state, the microstructure was analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM). The results showed that the incorporation of LFS reduced the initial strength of the mortars, but with improvements in the long term. The microstructure revealed pore refinement by the filler effect and formation of calcium silicate hydrates (C-S-H), without significant impacts from the combination with MK. Having confirmed its viability as SCM, the use of LFS in civil construction contributes to the circular economy between the steel and construction industries.

Keywords: Industrial waste; Circular economy; Supplementary cementitious material; Microstructure; Mortar.

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland (CP) é amplamente utilizado em concretos e argamassas, sendo essencial para o desenvolvimento social e econômico (SNELLINGS et al., 2023). Contudo, sua produção em larga escala torna a indústria cimenteira um dos principais focos na busca pela redução do impacto ambiental da

construção civil. A substituição parcial do CP por resíduos industriais tem sido uma alternativa estudada para mitigar as emissões de gases de efeito estufa gerados na clinquerização, além de reduzir a extração de matéria-prima (JIN, 2021). Entre os resíduos investigados, destaca-se a Escória de Forno Panela (EFP), um subproduto do refino secundário do aço, com geração anual superior a 30 milhões de toneladas (Souza et al., 2024). Diferente da Escória de Alto Forno (EAF), seu uso ainda está em fase inicial de pesquisa (NAJM et al., 2021). A EFP contém quantidades significativas de óxidos e hidróxidos de cálcio, conferindo-lhe propriedades hidráulicas e potencial como material aglomerante. Sua composição química, porém, é impactada por dois fatores: a matéria-prima utilizada na siderurgia e o tipo de resfriamento (rápido ou lento), que afetam os teores dos óxidos SiO_2, Al_2O_3 e MgO, além da reatividade em ambiente alcalino (Manso et al., 2011).

A incorporação de EFP em argamassas é viável até 30%, visando manter as propriedades mecânicas semelhantes às de argamassas sem EFP (NAJM et al., 2021). No entanto, para isso, geralmente é necessário um maior tempo de cura, pois as reações de hidratação com a EFP ocorrem de forma mais lenta (SILVA et al., 2024). Uma alternativa é combinar a EFP com materiais pozolânicos, que aumentam o teor de SiO_2 disponível, favorecendo o consumo do excesso de compostos de cálcio e intensificando a formação de cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), melhorando o desempenho e a microestrutura (SOUZA et al., 2023). Este estudo avalia o comportamento e a microestrutura de argamassas com 30% de substituição de CP por EFP e os efeitos da combinação com metacaulim (MK).

2. METODOLOGIA

A EFP utilizada neste estudo foi obtida de uma siderúrgica na região de Piracicaba, Brasil, a partir de um lote resfriado lentamente ao ar. O cimento empregado foi o CP II-F, com adição de filler calcário . Também foram utilizados cal hidratada (CH) do tipo CH-I e metacaulim (MK) comercialmente estabilizado, com alta reatividade pozolânica. A EFP apresentou densidade aparente de 2,75 g/cm³, enquanto CP, CH e MK registraram 3,00 g/cm³, 2,50 g/cm³ e 2,50 g/cm³, respectivamente. A composição química da EFP foi determinada por fluorescência de raios X (FRX), e os teores dos óxidos foram corrigidos conforme a perda ao fogo (PF). A EFP apresentou alto teor de CaO (54,6%) e menores quantidades de SiO_2 (9,78%) e Al_2O_3 (0,80%). O MK, por outro lado, apresentou 50,80% de SiO_2, tornando-se compatível para combinação com a EFP, equilibrando sua composição em relação ao CP. As argamassas foram preparadas na proporção em volume 1:2:6 (CP:CH:areia quartzoza), comum em argamassas magras na construção civil brasileira. A substituição de CP por EFP foi de 30% em massa, limite apontado na literatura como viável sem impactos negativos. O MK foi incorporado a 10% em relação ao aglomerante para melhorar a reologia e a coesão da microestrutura, favorecendo as reações químicas. A relação água/aglomerante (a/a) seguiu as diretrizes da NBR 13276 (ABNT, 2016). O Quadro 1 apresenta as proporções das misturas testadas, convertidas para valores em massa.

Quadro 1: Proporções das argamassas utilizadas nesta pesquisa, em massa.

TRAÇO	CP	CH	EFP	MK	AREIA	RELAÇÃO A/A
CP	1	1,47	0	0	9,52	0,87
CP MK	1	1,47	0	0,08	9,52	0,93
EFP	0,70	1,47	0,31	0	9,52	0,99
EFP MK	0,70	1,47	0,31	0,08	9,52	1,00

Fonte: elaborado pelos autores. “Relação A/A” se refere à relação água/aglomerante.

As argamassas foram caracterizadas aos 28 e 180 dias quanto a: resistência à compressão (Rc) e à tração na flexão (Rt), (NBR 13279, ABNT, 2005); densidade no estado endurecido (NBR 13280, ABNT, 2005); absorção de água por capilaridade (NBR 15259, ABNT, 2005) e, módulo de elasticidade dinâmico (Ed), em (NBR 15630, ABNT, 2005). Todos os ensaios foram realizados em triplicata, conforme recomendado pelas respectivas normas. A microestrutura das argamassas foi analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) utilizando o equipamento TESCAN Vega 3, O modelo VEGA 3 SEM utiliza filamento de tungstênio, com energia máxima de 30 KV e resolução teórica de 3 nm em 30 KV, e possui detector secundário e retro espalhado, permitindo a visualização detalhada da porosidade e morfologia das amostras.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

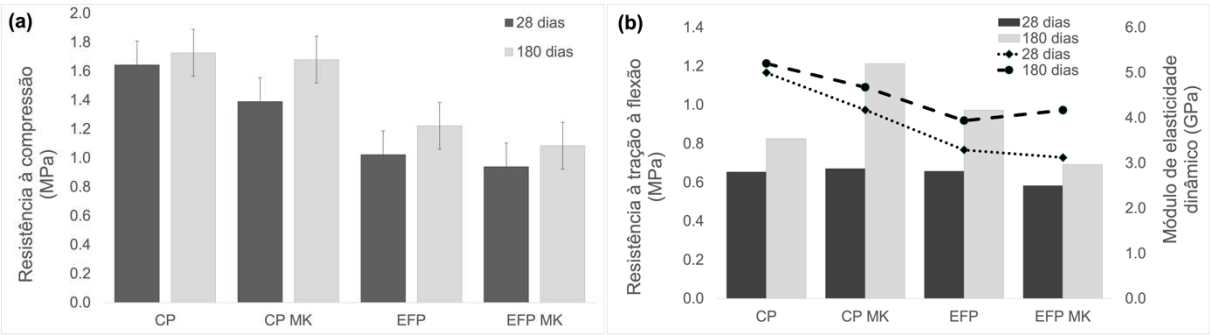
Os resultados de caracterização das argamassas estudadas estão representados no Quadro 2 e tabela 1.

Quadro 2: Resultados de Densidade aparente no estado endurecido e coeficiente de capilaridade para as argamassas estudadas.

TRAÇO	Densidade aparente no estado endurecido kg/m³		Coeficiente de capilaridade g/(cm²·min¹/²)	
	28 dias	180 dias	28 dias	180 dias
CP	1728,76	1729,01	0,90	1,06
CP MK	1828,63	1706,51	1,09	1,15
EFP	1720,51	1688,59	1,11	1,20
EFP MK	1695,45	1787,71	0,00	1,09

Fonte: elaborado pelos autores

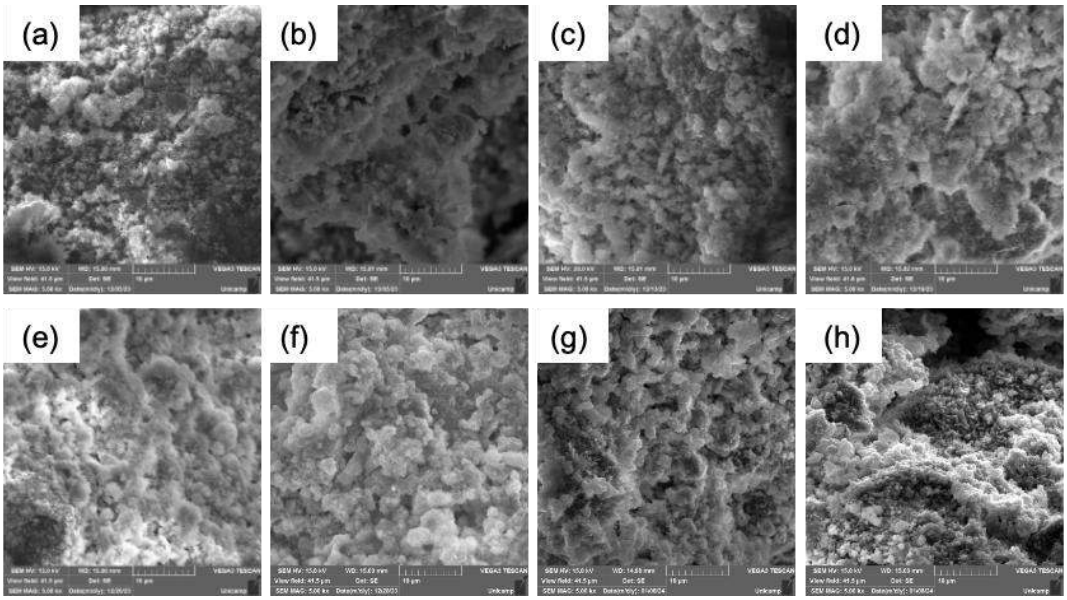
Figura 1: Resultados das argamassas aos 28 e 180 dias: (a) resistência à compressão (Rc); (b) resistência à tração na flexão (Rt) e módulo de elasticidade dinâmico (Ed). Em (b), as colunas representam os valores de Rt e as linhas correspondem aos valores de Ed.



Fonte: elaborado pelos autores

A Rc e a Rt (Figura 1) foi menor nas argamassas contendo EFP e MK em comparação ao traço CP. Aos 28 dias, a argamassa CP apresentou os melhores resultados de resistência, enquanto a EFP MK obteve os menores valores. No entanto, houve um aumento gradual das resistências ao longo do tempo, especialmente na CP MK, sugerindo que a adição de MK melhora a coesão microestrutural da matriz cimentícia, favorecendo o desempenho a longo prazo (SILVA *et al*., 2024). A densidade aparente (Quadro 2) variou ao longo do tempo, com a CP MK apresentando maior densidade inicial, mas redução aos 180 dias, enquanto a EFP MK seguiu tendência oposta. O coeficiente de capilaridade (Quadro 2) indicou que a incorporação de EFP aumentou a absorção de água, enquanto a adição de MK reduziu a capilaridade inicial, mas estabilizou-se ao longo do tempo. A correlação entre resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade (Figura 1b) dinâmico indicou que misturas com MK apresentaram maior coesão, apesar da menor resistência inicial. Os resultados evidenciam que a substituição parcial do CP por EFP e MK modifica as propriedades das argamassas, no entanto, com melhoras ao longo prazo (180 dias) e demonstrando refinamento dos poros (WU *et al*., 2023). A figura 2 demonstra imagens obtidas por MEV na magnitude de 5.000x para análise da microestrutura das argamassas estudadas.

Figura 2: Imagens obtidas por MEV mostrando a microestrutura das argamassas, sendo (a) à (d) respectivamente os traços CP, CP MK, EFP e EFP MK aos 28 dias, e respectivamente (e) à (h) CP, CP MK, EFP e EFP MK aos 180 dias.



Fonte: elaborado pelos autores

Aos 28 dias, a adição de MK demonstra um refinamento inicial da matriz tanto apenas com CP quanto nas misturas com EFP, com uma aparente redução da porosidade. Contudo, a substituição do CP por EFP já se mostra eficaz em gerar uma microestrutura mais densa e compacta desde as idades iniciais. Em idades mais avançadas (180 dias), o efeito do MK torna-se mais evidente, promovendo um significativo adensamento da matriz, especialmente quando combinado com o CP. Nas misturas contendo EFP, observa-se uma microestrutura consistentemente mais densa e coesa em ambas as idades, sugerindo uma hidratação mais eficiente e preenchimento de vazios. A combinação de EFP e MK apresenta um efeito sinérgico, resultando em uma microestrutura densa e refinada aos 180 dias, evidenciando a contribuição da EFP para uma base compacta inicial e a ação do MK no preenchimento adicional de poros e aumento da compacidade ao longo do tempo, corroborando a evolução microestrutural observada com o envelhecimento das argamassas.

4. CONCLUSÃO

A EFP demonstrou viabilidade para uso como MCS, atuando como um aglomerante primário, semelhante ao CP, e proporcionando melhora na microestrutura e de resistência a longo prazo. Apesar da redução inicial da resistência mecânica, a evolução das propriedades das argamassas ao longo do tempo reforça o potencial aglomerante da EFP para aplicações na construção civil, particularmente em combinação com MK. Assim, seu uso contribui para a economia circular, pela utilização de resíduos siderúrgicos e a redução do impacto ambiental da indústria cimenteira.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecera à ArcelorMittal pelo fornecimento do lote de EFP, à Metacaulim do Brasil pela amostra de MK e à Votoran Cimentos pelo lote de CP. Também ao Laboratório Multidisciplinar de Microscopia Eletrônica da Faculdade de Tecnologia (Unicamp) e ao Laboratório de Materiais da ArcelorMittal.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13279: Argamassas aplicadas em paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão no estado endurecido**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13280: Argamassas aplicadas em paredes e tetos – Determinação da massa específica no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15259:2005 - Norma para elaboração e apresentação de projetos de engenharia.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15630: Argamassas aplicadas em paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade pela propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13276: Argamassas aplicadas em paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

JIN, F. Sustainable utilization of slags. **Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes**, Amsterdam, p. 321-341, 2021.

MANSO, J. M.; RODRIGUEZ, Á.; ARAGÓN, Á.; GONZALEZ, J. J. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3508–3519, 2011.

NAJM, O.; EL-HASSAN, H.; EL-DIEB, A. Ladle slag characteristics and use in mortar and concrete: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125584, 2021.

SILVA, T.; SOUZA, E.; MARIANO, E.; FERREIRA, G.; OSÓRIO, W. R. Long-term performance of mortars with combined incorporation of ladle furnace slag and metakaolin. **Buildings**, v. 14, n. 9, p. 2762, 2024.

SNELLINGS, Ruben; SURANENI, Prannoy; SKIBSTED, Jørgen. Future and emerging supplementary cementitious materials. **Cement and concrete research**, v. 171, p. 107199, 2023.

SOUZA, E. F. C. D.; SILVA, T. F.; CASTRO, M. A. D.; FERREIRA, G. C. D. S. Combined use of ladle furnace slag and rice husk ash as a supplementary cementitious material. **Materials Research**, v. 26, p. e20230069, 2023.

WU, L. et al. Generation, utilization, and environmental impact of ladle furnace slag: A minor review. **Science of the Total Environment**, v. 895, p. 165070, 2023