INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA DE FORNO PANELA NA REATIVIDADE INICIAL DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM METACAULIM

Influence of Ladle Furnace Slag on the Initial Reactivity of Cementitious Pastes with Metakaolin

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

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 | t261851@dac.unicamp.br

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

Resumo

A produção de cimento Portland é uma grande fonte de emissões de CO_2, enquanto a escória de forno panela (EFP), resíduo da siderurgia rico em óxidos de cálcio, alumínio e silício, surge como Material Cimentício Suplementar (MCS). Este estudo avalia a influência da EFP (10%, 20% e 30%) na reatividade inicial de pastas com cimento CP II-E e cal hidratada, acrescidas de 10% de metacaulim (MK), analisando tempo de pega e cinética de hidratação via calorimetria semiadiabática. Os melhores resultados foram observados em pastas com 10% EFP, que apresentaram menor variação no tempo de pega e picos de calor mais próximos ao cimento puro (REF). A combinação de 20% de EFP + MK reduziu o tempo final de pega, atribuído à formação de C_2S e à fina granulometria da EFP. A adição de MK acelerou as reações, compensando o efeito retardador da EFP. As curvas de hidratação mostraram que 10% de EFP e 10% de EFP + MK mantiveram desempenho próximo à REF, destacando-se para aplicação em argamassas mistas. Os resultados demonstram o potencial da EFP para reduzir impactos ambientais, com eficiência em teores moderados (10-20%), promovendo a economia circular na construção civil.

Palavras-chave: Material Cimentício Suplementar; Calorimetria; Tempo de pega; Escória de Forno Panela.

ABSTRACT

Portland cement production is a major source of CO_2 emissions, while ladle furnace slag (LFS), a steelmaking by-product rich in calcium, aluminum, and silicon oxides, emerges as a Supplementary Cementitious Material (SCM). This study evaluates the influence of LFS (10%, 20%, and 30%) on the initial reactivity of pastes made with CP II-E cement and hydrated lime, supplemented with 10% metakaolin (MK), by analyzing setting time and hydration kinetics via semi-adiabatic calorimetry. The best results were observed in pastes with 10% LFS, which showed less variation in setting time and heat peaks closer to the pure cement (REF). The combination of 20% LFS + MK reduced the final setting time, attributed to the formation of C_2S and the fine particle size of LFS. The addition of MK accelerated the reactions, compensating for LFS's retarding effect. Hydration curves showed that 10% LFS and 10% LFS + MK maintained performance close to REF, standing out for use in blended mortars. The results demonstrate the potential of LFS to reduce environmental impacts, being effective at moderate levels (10–20%), and promoting circular economy in construction.

Keywords: Supplementary Cementitious Material; Calorimetry; Setting time; Ladle Furnace Slag.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional acelerado e a intensificação da industrialização têm gerado desafios ambientais significativos, incluindo o esgotamento de recursos naturais, crises energéticas e aumento da geração de resíduos (Fang et al., 2021). A indústria da construção, em particular, é uma das principais responsáveis pelo

alto consumo de materiais e impactos ambientais, sendo o cimento Portland um dos maiores contribuintes devido o elevado consumo energético e emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2018; Hossain et al., 2022). Como alternativa para mitigar esses impactos, estratégias vêm sendo adotadas para reduzir o teor de clínquer no cimento, incorporando resíduos industriais como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) (Václavík et al., 2024).

A indústria siderúrgica, por sua vez, também gera grandes volumes de resíduos, entre eles a Escória de Forno Panela (EFP), cuja produção global pode atingir até 100 milhões de toneladas anuais (Fang et al., 2021; Worldsteel, 2021). No entanto, devido à sua heterogeneidade, grande parte desse material é disposto em aterros sanitários industriais (Najm, El-Hassan e El-Dieb, 2021). A composição da EFP, rica em óxidos de cálcio, silício e alumínio, sugere seu potencial como MCS, favorecendo o seu uso em materiais cimentícios (Souza et al., 2023; Václavík et al., 2024).

Há muitos estudos sobre o uso da EFP como MCS, principalmente em concretos, indicando impactos positivos na hidratação dos compostos químicos e microestrutura (Araos Henríquez et al., 2021; Fang et al., 2021; Sultana e Islam et al., 2022; Václavík et al.,2024). Entretanto, há poucos estudos sobre o uso da EFP em argamassas mistas (cimento Portland + cal), o que indica uma lacuna que precisa ser estudada. Neste contexto, este estudo investiga a influência da EFP na reatividade química inicial de pastas cimentícias com cal hidratada, simulando a mistura ternária de aglomerantes (CP+EFP+cal) presentes neste tipo de argamassa. Além disso, também se estudou essa mistura com adição de metacaulim (MK) como pozolana, o que pode trazer benefícios em relação à formação de compostos hidratados que melhoram as propriedades mecânicas e durabilidade destas argamassas (Khatib, Baalbaki e Elkordi, 2018; Souza et al., 2023).

2 METODOLOGIA

A Escória de Forno Panela (EFP) utilizada foi obtida de uma siderúrgica da região de Campinas, São Paulo, e selecionada pelo resfriamento lento ao ar, garantindo granulometria adequada para seu uso como material cimentício suplementar (Silva et al., 2022). A amostra foi seca a 105°C por 24 h, peneirada e moída em moinho de bolas até atingir fração <75 µm. A composição química da EFP, assim como dos outros materiais estudados, está descrita no Quadro 1 com os principais óxidos.

Quadro 1: Composição química dos materiais utilizados (principais óxidos).

%	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	SO_3
EFP	9,32	4,03	28,50	50,70	2,79	2,34
CP II-E	4,65	5,40	20,00	57,40	2,32	3,47
Cal	27,3	0,15	1,01	38,70	0,25	0,04
MK	0,23	24,10	69,20	<0,10	2,02	<0,10

Fonte: Próprio autor.

As pastas foram produzidas com cimento Portland e cal, na proporção de 1:2, contando, ainda, com traços com a presença de 10% de metacaulim (MK). Para esses traços, houve a variação da substituição de cimento por EFP em 10%, 20% e 30%, seguindo a NBR 16606 (ABNT, 2018). As misturas analisadas quanto ao tempo de pega (NBR 16607:2018) e calorimetria isotérmica estão descritas no Quadro 2.

Quadro 2: Dosagem em volume dos materiais secos em cada pasta

Nomenclatura	Cimento	Cal	EFP	MK
REF	1,0	2,0	0,0	0,0
EFP10	0,9	2,0	0,1	0,0
EFP20	0,8	2,0	0,2	0,0
EFP30	0,7	2,0	0,3	0,0
MK REF	1,0	2,0	0,0	0,1
MK EFP10	0,9	2,0	0,1	0,1
MK EFP20	0,8	2,0	0,2	0,1
MK EFP30	0,7	2,0	0,3	0,1

Fonte: Próprio autor.

A determinação da calorimetria foi realizada em sistema termicamente isolado, caracterizando uma condição semiadiabática (Chotoli et al. 2013), composto por caixas de isopor, termopares tipo K e pelo aparelho Testo. A variação da temperatura foi registrada por 24 h, e os dados foram processados para análise da cinética de

hidratação. Além disso, realizou-se o estudo de tempo de pega (inicial e final) das pastas indicadas no Quadro 2, conforme a NBR 16607 (ABNT 2018).

3 RESULTADOS E ANÁLISES

No Quadro 3 estão representados início e o fim de pega obtidos pela ABNT NBR 16607:2018. Além disso, é possível observar os tempos de pega e a porcentagem de retardo de pega em relação à pasta referência, portanto, valores positivos indicam retardo na pega, enquanto aqueles negativos indicam aceleração da pega.

Quadro 3: Variação percentual no tempo de pega em relação pasta REF.

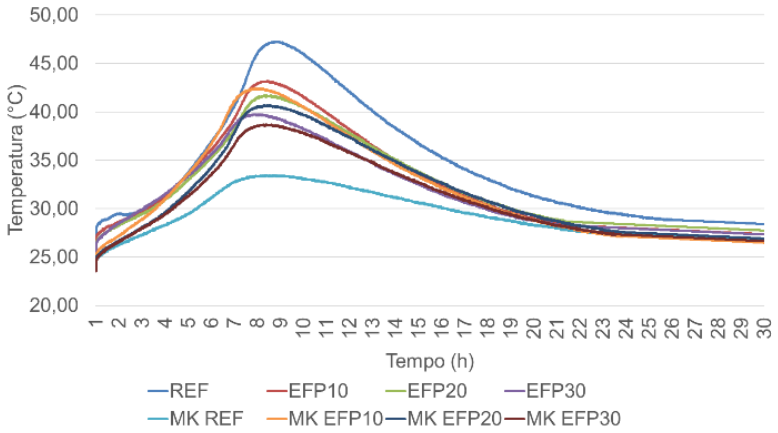
Nomenclatura	Início de pega (min)	Variação do tempo de início de pega (%)	Fim de pega (min)	Variação do tempo de fim de pega (%)
REF	110	-	239	-
EFP10	125	13,66	245	2,00
EFP20	134	21,86	254	5,75
EFP30	212	92,90	322	34,25
MK REF	156	42,08	276	15,00
MK EFP10	162	47,54	272	13,25
MK EFP20	120	9,29	220	-8,00
MK EFP30	110	0,00	210	-12,50

Fonte: Próprio autor.

É possível observar, pelo Quadro 3, que as pastas que apresentaram menor variação no tempo de início de pega em relação à referência foram EFP10 e MK EFP20, com aumento de 13,66% e 9,29%, respectivamente. Já para o tempo de fim de pega, as pastas EFP10 e EFP 20, apresentaram maior tempo de fim de pega menor que 10%. Por outro lado, as pastas MK EFP20 e MK EFP30 indicaram tempo de fim de pega inferior a pasta REF. A redução do tempo de fim de pega nas pastas com 20% e 30% EFP, além da adição do MK pode ser justificada pela composição química desse tipo de escória (28,5% SiO_2), que pode formar mais C_2S, composto responsável pelas reações químicas ocorridas nas primeiras horas da hidratação do cimento Portland (Fang et al., 2021). Além disso, esse efeito pode estar relacionado à granulometria da EFP, pois partículas menores aceleram a reatividade inicial de pastas cimentícias (Manso et al., 2011; Václacík et al., 2024). Vale salientar que a presença do MK apresentou maior impacto nos tempos de início e fim de pega do que a EFP, justificável pela reatividade mais lenta das pozolanas (Khatib, Baalbaki e Elkordi, 2018).

Na Figura 1, é possível observar as curvas de hidratação das pastas estudadas. A partir delas, observa-se que aquelas com CP+cal (REF) e CP+cal+MK (MK REF), apresentaram o maior e menor pico de liberação de calor, respectivamente. Entretanto, as pastas com menor teor de EFP e MK (EFP10 e MK EFP10) apresentaram picos de liberação de calor mais próximos da REF (> pico de temperatura). Isso pode ser explicado pela combinação de óxidos presentes na EFP e no MK, que proporcionaram a aceleração das reações químicas de hidratação (Khatib, Baalbaki e Elkordi, 2018).

Figura 1: Curva de hidratação das pastas.



Fonte: Próprio autor.

4 CONCLUSÃO

A incorporação de EFP influenciou os tempos de pega, com MK EFP30 e MK EFP20 apresentando menor variação no início e EFP10 e EFP20 no fim. Maiores teores de EFP com MK aceleraram ambos os tempos. Na hidratação, a adição de EFP reduziu a temperatura máxima sem MK, sugerindo menor risco de fissuração, enquanto com MK, intensificou a liberação de calor devido a reações adicionais. Assim, a interação entre EFP e MK pode ajustar o comportamento térmico e reológico das pastas.

5 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Também contou com o suporte do Fundo de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (FAEPEX), da ArcelorMittal e da Votorantim Cimentos.

REFERÊNCIAS

ARAOZ HENRÍQUEZ, P.; APONTE, D.; IBÁÑEZ-INSA, J.; BARRA BIZINOTTO, M. Ladle furnace slag as a partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123106, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123106.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607. Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

CHOTOLI, F. F. et al. Avaliação do perfil térmico de calorímetro de condução isotérmico para estudos de calor de hidratação de pastas de cimento Portland. In: **congresso da qualidade em metrologia rede metrológica do Estado de São Paulo**, 2013. DOI: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0151

FANG, K.; WANG, D.; ZHAO, J.; ZHANG, M. Utilization of ladle furnace slag as cement partial replacement: influences on the hydration and hardening properties of cement; **Construction of Building Materials**, v. 299, p. 124265, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124265.

HOSSAIN, M.U.; LIU, J.C.; XUAN, D.; NG, S.T.; YE, H.; ABDULLA, S.J. Designing sustainable concrete mixes with potentially alternative binder systems: multicriteria decision making process. **Journal of Building Enginnering**, v. 45, p. 103587, 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103587.

KHATIB, J. M.; BAALBAKI, O.; ELKORDI, A. A. Metakaolin. In: **Waste and supplementary cementitious materials in concrete**. Woodhead Publishing, 2018. p. 493-511.

MANSO, J.M.; RODRIGUEZ, A.; ARAGÓN, A.; GONZALEZ, J.J. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. **Construction and Building Materials**, v.25, p. 3508-3519, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.044.

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. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125584.

SILVA, T. F. da et al. Influence of the cooling process on the physicochemical properties of ladle furnace slag, used in the replacement of Portland cement. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, 2022. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01602.

SOUZA, E.; SILVA, T.; CASTRO, M.; FERREIRA, G. Combined Use of Ladle Furnace Slag and Rice Husk Ash as a Supplementary Cementitious Material. **Materials Research**, v. 26, sup. 1, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0069.

SULTANA, I.; ISLAM, G.M.S. **Performance of Ladle Furnace Slag in Mortar under Standard and Accelerated Curing**. A dvances in Civil Engineering, v. 2022, p. 7824084, 2022. DOI: https://doi.org/ 10.1155/2022/7824084.

VÁCLAVÍK, V.; ESTOKOVÁ, A.; PAPESCH, R.; DVORSKÝ, T.; FABIANOVÁ, M.; HALÍK, M.; HOLOSOVÁ, M. Investigation of the engineering and environmental properties of cement mortars incorporating ladle furnace steel slag. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e02876, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02876.

VILAPLANA, A. S.-D.-G. et al. Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 837‑843, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.075

WANG, Q.; YAN, P. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1134‑1140, 2010. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.028

YANG, M.; CHEN, L.; WANG, J.; MSIGWA, G.; OSMAN, A.I.; FAWZY, S.; ROONEY, D.W.; YAP, P. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, p. 55–80, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6