



Resistência mecânica residual de argamassas de assentamento com escória de forno panela

Palavras-Chave: RESÍDUOS SÓLIDOS, MATERIAIS SUSTENTÁVEIS, AGLOMERANTE CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR, INCÊNDIO.

Autores:

MARCELE SOARES, UNICAMP

EVERTON DE FREITAS CORDOVA DE SOUZA, UNICAMP

TAYNÁ FRACÃO DA SILVA, UNICAMP

Prof.^a Dr.^a GISLEIVA CRISTINA DOS SANTOS FERREIRA (orientadora), UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Para mitigar os impactos ambientais causados pela geração de resíduo e pelo consumo de recursos naturais, a indústria da construção civil, juntamente com o setor siderúrgico, propõe a incorporação de resíduos do aço em materiais cimentícios (JIN, 2022). A aciaria gera vários tipos de resíduos sólidos (agregado siderúrgico de aciaria e de alto-forno, escórias, lama, pós e finos), os quais representam 22 milhões de toneladas de resíduos sólidos anuais, sendo 90% passível de reaproveitamento (IABr, 2022). Entre esses resíduos, destaca-se a escória de forno panela (EFP), que pode ser utilizada como agregado ou aglomerante em materiais de construção civil. A composição deste resíduo apresenta propriedades físico-químicas, granulométricas e altos teores de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e óxidos de cálcio (CaO), o que direciona a investigação sobre seu uso como aglomerante em materiais cimentícios (CHOI et al., 2020; HENRÍQUEZ et al. 2021; NAJM et al. 2021).

No estudo de segurança e desempenho nas edificações, pesquisas tem avaliado o efeito de altas temperaturas em concreto (SOLLERO, JUNIOR e COSTA, 2021; LAI et al., 2023) e argamassas (YON et al., 2022), entretanto ainda não há estudos sobre o efeito da substituição parcial de cimento portland (CP) por EFP em argamassas em situação de incêndio. Do mesmo modo, a incorporação de Metacaulim (MK) como adição pozolânica também desperta atenção, visto a literatura já aponta que seu uso apresenta resultados positivos em matrizes cimentícias (KHATIB, BAALBAKI, ELKORDI, 2018), contudo o efeito da combinação EFP+MK no comportamento de argamassas em situações de incêndio ainda não tenha sido objeto de análise.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi determinar a influência do uso da EFP, em substituição ao CP, nas propriedades mecânicas residuais de argamassas de revestimento, expostas a altas temperaturas.

MATERIAIS E METODOLOGIA:

Os materiais utilizados para a preparação das argamassas foram: Escória de Forno Panela (EFP), Cimento Portland II-F (CP), Areia Quartzosa (AQ), Cal Hidratada (CH), Metacaulim (MK) e água da rede pública de Campinas-SP. O lote da amostra de EFP utilizada teve como método o resfriamento lento ao ar e foi recebido de uma empresa siderúrgica. Na tabela 1, encontram-se as proporções em volume dos quatro traços utilizados no preparo das argamassas. A caracterização dos materiais foi realizada em projetos vinculados ao Grupo de Pesquisa MATS e o teor de substituição de CP por EFP também definido em função de estudos prévios do grupo (SILVA et al., 2022)

Identificação	Aglomerante			Metacaulim	Areia
	Cimento	EFP	Cal		
RR	1,0	0,0	2,0	0,0	6,0
RE	0,7	0,3	2,0	0,0	6,0
RR-MK	1,0	0,0	2,0	0,1	6,0
RE-MK	0,7	0,7	2,0	0,1	6,0

Tabela 1 – Composição unitária dos traços de argamassas estudados.

Para a caracterização das argamassas foram realizados ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica, NBR 15630 (ABNT, 2009), e determinação da resistência à compressão, NBR 13279 (ABNT, 2005). Juntamente com o ensaio de resistência a compressão foram obtidos os valores de módulo de elasticidade estático das argamassas para sua caracterização e comparação com o Ed. As argamassas foram avaliadas aos 90 dias em três 4 situações: à temperatura ambiente a 200 °, 400 °C e 600 °C. Foram também coletados dados aos 28 dias em temperatura ambiente para comparação dos resultados.

Na figura 1, está apresentado o equipamento USLab®, assim como alguns corpos de prova em temperatura ambiente, para a de determinação Ed aos 90 e 28 dias de cura. A figura 2 mostra a execução do ensaio de resistência mecânica e aferição do módulo de elasticidade estático em um dos corpos-de-prova.

A diferença estatística entre os traços foi verificada pela ANOVA, usando o teste de Tukey, com intervalo de confiança de 95%. Os *outliers* foram excluídos pelo teste de Grubbs, também com intervalo de confiança de 95%.



Figura 1 – Equipamento USLab para determinação do Ed – fonte: autores



Figura 2 – Ensaio de resistência mecânica e módulo de elasticidade estático – fonte: autores

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

A tabela 1 mostra os resultados de resistência à compressão das argamassas nas idades e temperaturas avaliadas.

Resistência à compressão					
Traço	28 dias	90 dias			
	Ambiente (MPa)	Ambiente (MPa)	200 °C (MPa)	400 °C (MPa)	600 °C (Mpa)
RR	2,27	1,75	1,72/0,99*	1,29/0,74*	0,63/0,36*
RE	2,26	2,33	2,17/0,94*	1,82/0,78*	0,92/0,39*
RR-MK	2,11	2,19	2,05/0,94*	1,54/0,70*	0,89/0,41*
RE-MK	2,24	2,11	2,08/0,98*	1,49/0,70*	0,84/0,40*

*Resistência à compressão residual em função da faixa de temperatura.

Tabela 2 – Resistência à compressão das argamassas estudadas.

Observou-se que aos 28 dias não houve variação significativa nos valores de resistência à compressão, sendo que o traço RR-MK apresentou o menor valor. Entretanto aos 90 dias os traços com escória (RE e RE-MK) foram significativamente melhor do que os demais em todas as temperaturas. Em relação aos traços com escória, a combinação com MK (RE-MK) promoveu aumento de resistência mecânica aos 28 dias, entretanto aos 90 dias esta diferença só se evidenciou na exposição da argamassa aos 400°C. Apenas a argamassa RR apresentou aumento da Rc após exposição a 200 C. Esse comportamento pode ser explicado pela ocorrência de poropressões internas devido a evaporação da água livre presente nos poros, que não tendo para onde escapar geram pressões internas negativas momentâneas. Já para as argamassas com MK, EFP ou EFP+MK apresentam comportamento semelhante, ou seja, menor geração de poropressões. Isso ocorre porque a presença do MK provoca reações químicas pozolânicas quando em contato com o CaOH₂ depositado nos poros das argamassas, o que reduz o volume desses poros e, conseqüentemente, do teor de água livre (KHATIB, BAALBAKI e ELKORDI, 2018). Já para as argamassas com EFP+MK, além das reações pozolânicas, há o efeito fíler, que também reduz a formação de poropressões negativas. Andreini et al. (2015) realizaram um estudo de argamassas expostas a altas temperaturas e verificaram aumento da Rc até os 400 °C.

Agora ao analisar o comportamento das argamassas para temperaturas mais altas (400 e 600 °C), verifica-se que a presença da EFP (RE; RE-MK) apresentaram maior resistência à compressão residual do que os traços sem escória (RR e RR-MK). Isso pode ser justificado pela formação de compostos, em função da temperatura, em locais como a zona de transição entre pasta e agregado miúdo e poros, deixando a matriz mais densa (PACHTA et al., 2018). As tabelas 3 e 4 apresentam respectivamente os valores de módulo de elasticidade estático e Ed das argamassas.

Módulo de elasticidade estático					
Traço	28 dias	90 dias			
	Ambiente (GPa)	Ambiente (GPa)	200 °C (GPa)	400 °C (GPa)	600 °C (GPa)
RR	1,970	1,525	1,585	0,803	0,103
RE	2,320	2,537	1,818	0,975	0,240
RR-MK	1,880	2,295	1,738	0,893	0,263
RE-MK	2,410	2,638	1,775	0,868	0,207

Tabela 3 – Resultados de módulo de elasticidade estático das argamassas estudadas

Módulo de elasticidade dinâmico										
Traço	28 dias		90 dias							
	Ambiente		Ambiente		200°C		400°C		600°C	
	ρ (Kg/m ³)	Ed (GPa)								
RR	1.668,28	4,92	1.685,55	4,43	1.690,41	3,77	1.678,71	2,16	1.686,97	0,35
RE	1.623,97	4,61	1.538,79	5,17	1.579,82	4,28	1.529,45	2,46	1.571,58	0,70
RR-MK	1.648,93	5,18	1.540,55	4,99	1.634,76	3,82	1.608,91	2,45	1.603,19	0,64
RE-MK	1.720,31	5,72	1.707,29	5,07	1.543,11	3,84	1.616,29	2,34	1.526,21	0,48

Tabela 4 – Resultados de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas estudadas.

O módulo de elasticidade estático das argamassas aos 28 dias apresentou diferenças na presença de escória e MK, sendo o traço RE-MK o de maior valor. Na presença de elevadas temperaturas as argamassas demonstraram progressiva diminuição destes valores proporcional ao aumento de temperatura, com exceção do traço RR aos 200 °C com pequeno aumento em relação à temperatura ambiente. O traço RE apresentou os maiores valores em todas as situações analisadas e os menores valores foram observados no traço RR. Em relação ao Ed, constatou-se os maiores valores no traço RR, também influenciado pela maior densidade no estado endurecido em todas as situações. O uso de escória sem combinação com MK (traço RE) provocou aumento deste parâmetro à medida que o traço com apenas a adição pozolânica (RR-MK) apresentou diminuição dos valores. Aos 28 dias o traço RE-MK apresentou o maior valor de densidade e Ed, entretanto submetido às altas temperaturas, demonstrou a maior diminuição. Cabe ressaltar, que menores valores de Ed indicam maior capacidade absorção de deformações, o que pode ser vantajoso para argamassas, principalmente usadas em revestimento, onde esta propriedade é mais evidenciada pelas solicitações de todo o sistema construtivo.

CONCLUSÕES:

Considerando os objetivos deste trabalho pôde-se concluir que o uso da EFP não prejudica a resistência à compressão de argamassas cimentícias nas faixas de temperatura de 200-600 °C. A adição pozolânica de MK com ou sem combinação com EFP também não afeta negativamente as argamassas nesta situação. O módulo de elasticidade estático não sofre alterações negativas com o uso de EFP e/ou MK. Argamassas com EFP apresentam comportamento similar às misturas sem escória em relação à densidade e Ed, sendo que para esta última propriedade a combinação EFP+MK pode elevar os índices à temperatura ambiente, entretanto tem valores inferiores em temperaturas elevadas.

Pode-se concluir que o uso de EFP não é prejudicial para o desempenho de argamassas cimentícias em situações de incêndio, favorecendo este uso do resíduo que pode contribuir para a economia circular entre as indústrias de construção civil e siderúrgica.

BIBLIOGRAFIA

- ANDREINI, Marco et al. Mechanical behavior of masonry materials at high temperatures. **Fire and Materials**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 41–57, 2015. Available from: <https://doi.org/10.1002/fam.2229>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281-1: Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- CHOI, S.; KIM, J. Hydration reactivity of calcium-aluminate-based ladle furnace slag powder according to various cooling conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 1–10, 2020.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço e Sustentabilidade**. 2020. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/08/SUSTENTAB_digital_2020-1.pdf Acesso em 16 de julho de 2022.
- HENRÍQUEZ, P. A. et al. Ladle furnace slag as a partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123106, 2021.
- JIN, Fei. Sustainable utilization of slags. In: **Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes**. Elsevier, 2022. p. 321-341.
- KHATIB, Jamal M.; BAALBAKI, Oussama; ELKORDI, Adel A. Metakaolin. In: **Waste and supplementary cementitious materials in concrete**. Woodhead Publishing, 2018. p. 493-511.
- LAI, M. H. et al. Enhancing the post-fire behavior of steel slag normal-strength concrete by adding SCM. **Construction and Building Materials**, v. 398, p. 132336, 2023.
- NAJM, Omar; EL-HASSAN, Hilal; EL-DIEB, Amr. Ladle slag characteristics and use in mortar and concrete: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125584, 2021
- SILVA, Tayná Fracção 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, p. e20220089, 2022.
- YÖN, Merve Şahin et al. High-temperature and abrasion resistance of self-compacting mortars incorporating binary and ternary blends of silica fume and slag. **Construction and Building Materials**, v. 355, p. 129244, 2022.