

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM ESCÓRIA DE FORNO PANELA

Palavras-Chave: RESÍDUO SÓLIDO, MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR, ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, ULTRASSOM

Autores(as):

FERNANDA ALVES CAMPELO, UNICAMP

EVERTON DE FREITAS CORDOVA DE SOUZA, UNICAMP

TAYNÁ FRACÃO DA SILVA, UNICAMP

EDUARDO FREIRE MARIANO, UNICAMP

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

INTRODUÇÃO:

Nos últimos anos, a preocupação com o passivo ambiental dos principais setores da economia aumentou significativamente. Neste contexto, está inserido o setor da construção civil, tanto pelo consumo de recursos naturais, como pela geração de gases de efeito estufa e de resíduos sólidos (JIN, 2022). O cimento Portland (CP) é um material essencial nesse setor, e seu consumo cresce com a urbanização e o desenvolvimento de infraestrutura, sendo a sua produção a maior responsabilidade em relação aos impactos ambientais do setor (IGHALO e ADENIYI, 2020). Por isso, é crucial buscar outras fontes para servir de material para a produção ou substituição do cimento Portland (CP).

Neste contexto, podemos citar o setor siderúrgico brasileiro, o 9^a maior produtor de aço do mundo em 2023, o que resultou na geração de 18 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos sólidos, entre os quais está a Escória de Forno Panela (EFP) (IABr, 2023). A EFP tem composição química variável, mas geralmente contém óxidos de cálcio (CaO) e dióxidos de silício (SiO₂), tornando-se um potencial substituto parcial para o CP (BORGES MARINHO et al., 2017; HERRERO et al., 2016; HENRÍQUEZ et al., 2021). Suas propriedades mineralógicas permitem boas reações de hidratação precoce, sendo promissora para uso em argamassas (NAJM et al., 2021), embora apresente desafios de instabilidade volumétrica devido a fases indesejadas formadas durante o refino do aço (HENRÍQUEZ et al., 2021).

Ao ser aplicada em misturas cimentícias, é essencial que se faça uma cuidadosa avaliação das propriedades afetadas por sua incorporação. Em argamassas, o módulo de elasticidade das argamassas é uma propriedade que influencia diretamente o desempenho mecânico e a durabilidade das construções. O módulo de elasticidade dinâmico, em particular, tornou-se uma característica essencial a ser observada, tendo sido incluído como um requisito na última revisão da norma ABNT NBR 13281

para argamassas (ABNT, 2023). Essa propriedade reflete a capacidade da argamassa de resistir a deformações sob carga, o que é crucial para a qualidade e segurança das estruturas. O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido de forma precisa e não destrutiva através de ensaios de ultrassom, conforme estabelecido na norma NBR 15630 (ABNT, 2009). Portanto, o objetivo deste trabalho é determinar o módulo de elasticidade das argamassas com EFP, utilizando ensaios de ultrassom, a fim de avaliar o potencial dessa escória como substituto parcial do cimento Portland e suas implicações para a qualidade e durabilidade das argamassas.

METODOLOGIA:

Para a composição das argamassas de revestimento, foram utilizados os seguintes materiais: Areia Quartzosa (AQ), Cimento Portland CP II-F (CP), Cal Hidratada (CH), Metacaulim (MK), Escória de Forno Panela (EFP) e água. O lote de EFP foi obtida por meio do método de resfriamento lento ao ar, fornecido por uma empresa siderúrgica da região de Campinas, SP. A composição química dos materiais empregados, apresentada na Tabela 1, foi obtida por meio de ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX). Observa-se também que a granulometria da EFP é semelhante à do CP, demonstrando uma compatibilidade para sua aplicação como aglomerante em matrizes cimentícias, conforme curvas granulométricas apresentadas na Figura 1.

Materiais	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	MnO	LOI (%)
EFP	28,5	4,03	2,79	50,70	9,32	2,34	0,45	<0,10
CP	15,30	3,62	2,32	57,5	4,28	2,65	<0,10	12,5
CH	1,01	0,15	0,25	38,7	27,3	0,04	0,03	32,4
MK	69,2	24,1	2,02	<0,10	0,23	<0,10	<0,10	1,18

Tabela 1 – Composição química dos materiais utilizados para a produção das argamassas desta pesquisa.

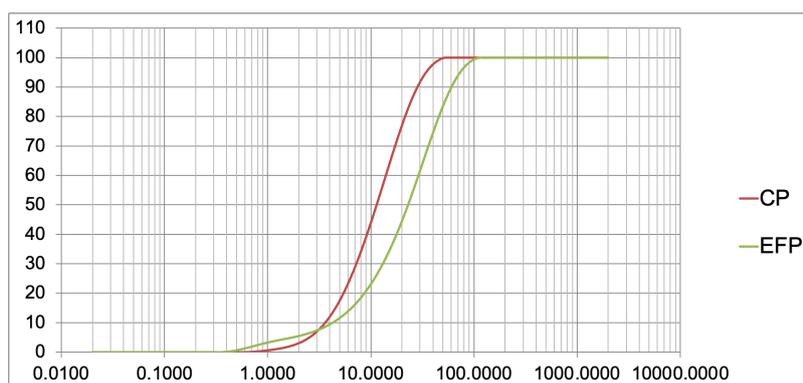


Figura 1 – Curvas granulométricas das amostras de EFP e CP utilizadas neste estudo

O uso da EFP como material cimentício suplementar ocorreu com a substituição de 30% do CP por EFP. Os traços experimentais das argamassas estão descritos na Tabela 2, com proporção volumétrica de 1:2:6 em volume (PC:CH:areia) e 1:1,47:9,52, em massa, definidos em função de estudos prévios realizados pelo GP-MATS (SILVA et al., 2022; SOUZA et al., 2023). A relação água-aglomerante foi ajustada para manter a consistência normal das argamassas, conforme as diretrizes da norma brasileira NBR 13276 (ABNT, 2016).

Identificação	Aglomerante			Adição	Agregado	Relação /a
	CP	CH	EFP	MK	AQ	
REF	1	1,47	-	-	9,52	0,87
MK	1	1,47	-	0,08	9,52	0,93
LFS	0,70	1,47	0,23	-	9,52	0,90
MKL FS	0,70	1,47	0,23	0,08	9,52	0,90

REF: argamassa referência (0% EFP); MK: argamassa referência com com MK; LFS: argamassa com EFP em substituição ao CP; MKLFS: argamassas com EFP e metacaulim.

Tabela 2 – Traços das argamassas de revestimento (em massa), conforme proporção definida em massa, em função do teor ótimo de EFP.

Os corpos de prova foram moldados em forma cilíndrica com dimensões de 50 mm de diâmetro por 150 mm de altura. A determinação da Resistência à compressão (R_c), módulo de elasticidade estático (E) e e módulo de elasticidade dinâmico (E_d) ocorreu após 28 dias de cura, considerando os objetivos de obter as propriedades mecânicas destas argamassas. A caracterização das argamassas envolveu a realização de ensaios para determinação do E_d por meio da propagação de ondas ultrassônicas, conforme a norma NBR 15630 (ABNT, 2009), e a determinação da resistência à compressão conforme a norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Além disso, foram obtidos valores para o E , proporcionando um panorama abrangente das propriedades mecânicas das argamassas estudadas. Detalhes da execução dos ensaios são apresentados na Figura 2

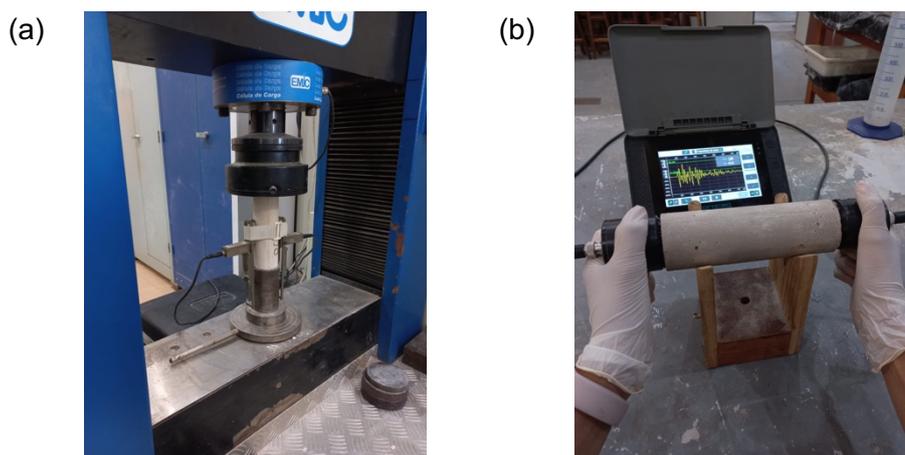


Figura 2 – (a) realização do ensaio de compressão para obtenção do módulo de elasticidade estático e (b) realização do ensaio de ultrassom para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A tabela 3 mostra os resultados de resistência à compressão das argamassas nas idades e temperaturas avaliadas.

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
REF	2,06	2.13	6,34
MK	2,06	2.02	5,83
LFS	1,14	1.20	4,02
MKL LFS	1,26	1.33	4,48

Tabela 3: Resistência à compressão e módulos de elasticidade estático e dinâmico das argamassas estudadas.

Ao analisarmos os dados atualizados relacionados à R_c , E e E_d das argamassas estudadas, podemos observar variações significativas entre os diferentes traços. A presença do MK, tanto no traço REF como com escória (LFS), não inferiu aumento significativo das propriedades mecânicas avaliadas (R_c ; E e E_d). Isso pode ser justificado pela idade de cura (28 dias), ainda insuficiente para que ocorram as reações químicas necessárias para a formação dos compostos químicos responsáveis pela resistência mecânica de materiais cimentícios (CSH), além da densificação da microestrutura. Deve-se ressaltar que os valores de E_d são maiores do que E devido o tipo do ensaio realizado. Isso ocorre porque o ensaio de ultrassom é realizado ainda com o corpo de prova intacto, sem a necessidade de aplicação de carga e alteração da microestrutura da argamassa (microfissuração). Com isso, a emissão da onda ultrassônica, provoca a excitação das partículas dos materiais que compõem as argamassas, resultando em maior ou menor tempo para a mesma distância entre os transdutores (DO NASCIMENTO MOURA et al., 2024)

Ao comparar os traços com e sem EFP, verifica-se que os valores de E e E_d do traço REF indicam maior rigidez, sendo maior que os demais. Por outro lado, os traços com EFP apresentaram menores valores de E e E_d , o que comprova a menor rigidez destas argamassas (NAJM et al., 2021). Esse comportamento pode ser considerado como melhoria do desempenho, já que as argamassas de assentamento e revestimento devem absorver as deformações diferenciais que ocorrem com o substrato, não resultando em fissurações generalizadas (BORGES MARINHO et al., 2017).

CONCLUSÕES:

Este estudo teve como objetivo determinar o módulo de elasticidade das argamassas contendo escória de forno panela (EFP) utilizando ensaios de ultrassom, visando avaliar seu potencial como substituto parcial do cimento Portland. Os resultados mostraram que a presença de EFP nas argamassas reduziu tanto o módulo de elasticidade estático quanto o dinâmico em comparação com a argamassa referência (REF), que apresentou valores mais elevados de rigidez. Apesar da diminuição da rigidez, o comportamento das argamassas com EFP pode ser vantajoso em aplicações em sistemas construtivos, onde a capacidade de absorver deformações pode prevenir fissurações. Portanto, a utilização de EFP mostra-se promissora para aplicações específicas na construção civil, promovendo a economia circular junto ao setor siderúrgico.

BIBLIOGRAFIA

- ABNT 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.
- ABNT 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.

ABNT NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT NBR 13281: Argamassa de revestimento - Requisitos, critérios e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2023.

BORGES MARINHO, Ana Luiza et al. Ladle furnace slag as binder for cement-based composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 04017207, 2017.

BOŠNJAK, Josipa et al. Experimental and numerical studies on masonry after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 116926, 2020.

BUENO, Guilherme Manfredini; GONZALEZ, Marco Aurélio Stumpf; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. Verificação da influência da exposição às altas temperaturas na aderência do revestimento de argamassa de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e13152, 2022.

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.

DO NASCIMENTO MOURA, Marinara Andrade et al. Post-fire prediction of residual compressive strength of mortars using ultrasonic testing. **Construction and Building Materials**, v. 416, p. 135273, 2024.

HENRÍQUEZ, Paulo Araos et al. Ladle furnace slag as a partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123106, 2021.

HERRERO, T. et al. Effect of high-alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 404–413, 2016.

IGHALO, Joshua O.; ADENIYI, Adewale George. A perspective on environmental sustainability in the cement industry. **Waste Disposal & Sustainable Energy**, v. 2, n. 3, p. 161-164, 2020.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Aço e Sustentabilidade. 2023. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/AcoBrasil_SUSTENTABILIDADE_2023.pdf. Acesso em 27 de fevereiro de 2024.

JIN, Fei. Sustainable utilization of slags. In: **Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes**. Elsevier, 2022. p. 321-341.

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.

SCHÄFER, Mauricio. Análise da influência de elevadas temperaturas em revestimento de argamassa. 2015.

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.

SOUZA, Everton de Freitas Cordova de et al. Combined Use of Ladle Furnace Slag and Rice Husk Ash as a Supplementary Cementitious Material. **Materials Research**, v. 26, p. e20230069, 2023.