



# PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO COM ESCÓRIA DE FORNO PANELA

**Palavras-Chave:** Resíduos sólidos, propriedades mecânicas, materiais sustentáveis.

**Autores(as):**

**Mylena Alves de Castro, FT – UNICAMP**

**Prof<sup>(a)</sup>. Dr<sup>(a)</sup>. Gisleiva C. S. Ferreira (orientadora), FECFAU – UNICAMP**

**Enga. MsC. Tayná Fracão da Silva (coorientadora), FECFAU – UNICAMP**

**Eng. MsC. Everton de Freitas Cordova de Souza (coorientador), FECFAU - UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

No Brasil, a produção anual de aço bruto é de 34 milhões de toneladas, o qual demanda grandes quantidades de resíduos (IABr, 2023). Entre estes resíduos, encontra-se a Escória de Forno Panela (EFP), proveniente dos fornos de aciaria, durante o processo secundário de refino do aço (oriundo e sucatas). A cada tonelada de aço produzido, gera-se de 30 a 50 kg de EFP (MAGHOOL et al., 2017), portanto, no Brasil há aproximadamente uma geração de 810 milhões de kg EFP por tonelada de aço produzido. Com esse cenário, justifica-se a necessidade de estudos sobre a utilização deste tipo de escória, buscando possibilidades sustentáveis para mitigar os impactos ambientais da indústria siderúrgica. Uma das principais opções do uso da EFP é no setor da construção civil, devido à demanda que o setor exige, compatível à quantidade de escória gerada. Além disso, destaca-se a composição química e características físicas (textura), compatíveis aos materiais cimentícios (RODRIGUEZ et al., 2009; ANASTASIOU, PAPAYIANNI, PAPACHISTOFOROU, 2014; VILAPLANA et al., 2015). Entre os materiais cimentícios que podem receber a EFP, destaca-se as argamassas de assentamento. Rodriguez et al. (2009) estudaram a substituição de 30% de CP por EFP e 20% de areia por EFP na produção de argamassas. Os resultados indicaram que os valores de resistência à compressão das argamassas com 30% de EFP e Referencia (0% EFP) foram estatisticamente iguais, o que direcionou o teor de EFP utilizado nas argamassas desta pesquisa.

Entretanto, para viabilizar o uso destas argamassas em escala industrial, é necessário atender aos parâmetros da NBR 13281 (ABNT, 2023). Além disso, há exigências de desempenho, considerando os aspectos de segurança, conforto térmico e acústico, conforme requisitos da NBR 15575 (ABNT, 2021). Assim, insere-se a hipótese deste trabalho, determinar a influencia do uso da EFP, em substituição a cal hidratada, nas propriedades mecânicas residuais de argamassas de assentamento de alvenaria.

## METODOLOGIA:

Os principais materiais que foram utilizados nesta pesquisa estão listados na tabela 1 e na Tabela 2 encontra-se a descrição dos traços das argamassas de assentamento.

Tabela 1 – Principais materiais que foram utilizados na pesquisa

Material	Sigla	Origem/Tipo	Localização
Escória de forno panela	EFP	Indústria do setor siderúrgico	Região de Campinas, SP.
Cimento Portland	CP II-F	Indústrias de cimento (Brasil)	Região de Limeira, SP.
Metacaulim	MK	-	-
Cal hidratada	Cal	-	-
Água	-	Rede de abastecimento	Limeira, SP
Areia quartzosa	AM AF	Depósitos de materiais de construção	Região de Campinas, SP

Tabela 2 – Traços das argamassas de assentamento (em volume), que foram utilizados na confecção dos corpos de prova

Traço	Materiais				
	CP	Cal	Areia	EFP	Metacaulim
AR	1	0,5	3	0	0
AR-MK	0,9	0,5	3	0	0,10
AE	1	0,0	3	0,5	0
AE-MK	0,9	0,0	3	0,5	0,10

Na primeira parte da pesquisa foi realizada a caracterização das argamassas de assentamento, no estado fresco e endurecido, conforme requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2023). Na segunda etapa desta pesquisa será realizado ensaios para analisar o comportamento das argamassas submetidas à patamares de temperaturas em corpos de prova cilíndricos (50mm x 150mm), cujas dimensões foram adaptadas conforme RILEM TC 200-HTC, parte 2 (2007), tais resultados estarão disponíveis no relatório final.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

As curvas granulométricas das amostras de EFP, Metacaulim, Cimento Portland e Cal estão representadas na Figura 1. Os principais dados extraídos da Figura 1 estão representados na Tabela 3 (D (0.1); D (0.5); D (0.9); DM), respectivamente, diâmetro correspondente a 10% do material passante; diâmetro correspondente a 50% do material passante; diâmetro correspondente a 90 % do material passante e diâmetro médio.

Figura 1 – Curvas granulométricas das amostras de CP II-F, EFP, Metacaulim e Cal.

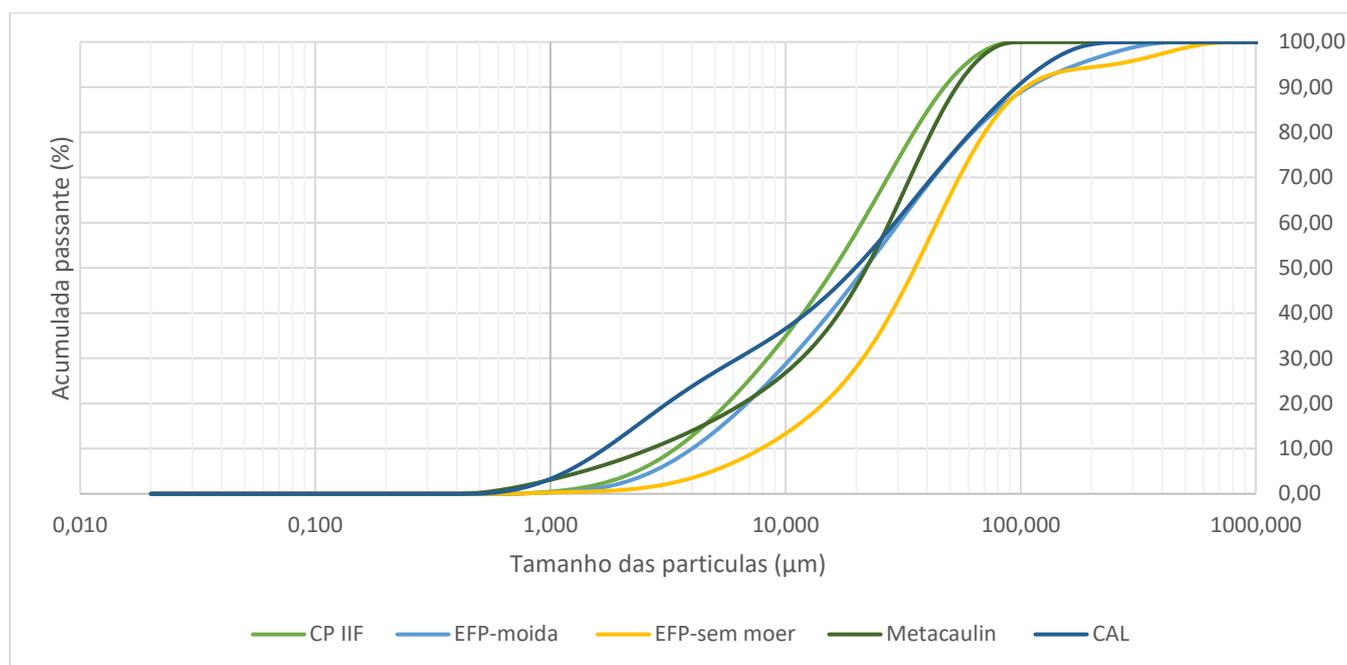


Tabela 3 – Diâmetro médio característico das amostras utilizadas na pesquisa.

Amostras	Diâmetros ( $\mu\text{m}$ )			Diâmetro médio (DM)
	D (0.1)	D (0.5)	D (0.9)	
CP II F	3,4	16,11	47,39	22,30
EFP moída	4,00	21,83	107,96	44,60
EFP sem moer	7,78	35,49	104,83	49,37
Metacaulim	2,66	22,1	53,34	26,03
Cal	1,70	19,76	95,95	39,14

A massa específica do cimento CP II F utilizado na pesquisa é  $3,01\text{g/cm}^3$ , a EFP tem massa específica de  $2,75\text{g/cm}^3$ , metacaulim e cal de  $2,50\text{g/cm}^3$  e a areia de  $2,65\text{g/cm}^3$ . Para caracterização química dos materiais utilizados nesta pesquisa realizou-se os ensaios de fluorescência de Raios X (FRX) e perda ao fogo (PF), cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química das amostras.

Amostra	Elementos químicos (%)									PF (%)
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	
EFP	54,60	9,78	5,79	7,59	7,29	-	-	-	-	12
CP II F	57,5	15,3	4,28	2,32	-	2,65	3,62	-	-	12,5
Cal	38,7	1,01	27,3	-	-	-	-	-	-	32,4
Metacaulim	-	69,2	-	2,02	-	-	24,1	-	1,72	1,18

De acordo com a composição química, verifica-se que as amostras de EFP e CP apresentam alto teor de CaO (54% e 57%, respectivamente), o que confirma a possibilidade de uso deste tipo de escória como aglomerante. Outros elementos químicos, também importantes para se obter reações químicas hidráulicas ( $\text{FeO}_2$ ;  $\text{SiO}_2$ ), estão presentes nos dois materiais, entretanto, em teores diferentes. A tabela 5 apresenta os resultados no estado fresco das argamassas de assentamento.

Tabela 5 – Ensaio realizados no estado fresco

Traço	Flow Table (mm) (NBR 13276)	Retenção de água (NBR 13277)	Densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) (NBR 13278)	Teor de ar incorporado (%) (NBR 13278)	Relação a/c
REF	262	82	2039	5	0,78
REF-MK	261	78	2053	5	0,78
EFP	260	84	2064	5	0,75
EFP-MK	261	87	2060	5	0,75

Relação a/c: Relação água/aglomerante.

A partir dos resultados obtidos no estado fresco, foi possível verificar que a substituição total da cal hidratada por EFP, não trouxe diferença significativa para as argamassas. A trabalhabilidade e teor de ar incorporado mantiveram-se, considerando que a relação água/aglomerante foi alterada de 0,78 para 0,75; x p y; a retenção de água teve ligeira melhora; a densidade teve ligeiro acréscimo, atribuído a massa específica dos materiais (EFP:  $2,75\text{g/cm}^3$ , cal:  $2,50\text{g/cm}^3$ ). Segundo Souza et al. (2023), a presença da EFP nas argamassas melhorou a trabalhabilidade, devido alto teor de CaO e  $\text{Ca(OH)}_2$  da EFP (elementos químicos com maior capacidade de absorção e retenção de água).

A tabela 6 apresenta os resultados no estado endurecido das argamassas de assentamento, juntamente com análise estatística.

Tabela 6 – Ensaio realizados no estado endurecido.

Traço	Densidade no estado endurecido ( $\text{kg/m}^3$ ) (NBR 13280)	Resistência à tração na flexão (MPa) (NBR 13279)	Resistência à compressão (MPa) (NBR 13279)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) (NBR 15630)
REF	1938	2,29	7,74	13,61
DV	8,06	0,47	0,93	0,33
CV (%)	0,42	20,57	12,07	2,42
REF-MK	1949	2,23	7,93	13,29
DV	5,48	0,08	0,50	0,14
CV (%)	0,28	3,72	6,25	1,05
EFP	1970	2,79	9,24	15,43
DV	3,48	0,27	0,97	0,22
CV (%)	0,18	9,66	10,49	1,43
EFP-MK	1962	2,53	8,62	15,03
DV	9,79	0,36	1,01	0,09
CV (%)	0,50	14,29	11,72	0,60

DV: desvio padrão / CV: coeficiente de variação.

Assim, como no estado fresco, a densidade apresentou pequeno aumento nos traços com escória, o que pode ser justificado pela redução dos vazios da argamassa com EFP, devido ao efeito filer que esse tipo de escória pode produzir, quando utilizado como aglomerante (SILVA et al., 2022; SOUZA et al., 2023) Em relação as propriedades mecânicas, também ocorreu aumento, em especial na resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico (em média 20%), o qual foi atribuído as reações químicas (maior formação de C-S-H). No estudo de Souza et al. (2023) foi identificado que a presença da EFP nas argamassas altera as propriedades mecânica das argamassas. Tal fato, pode ser evidenciado no nosso estudo, já que as argamassas com EFP apresentaram uma melhora nos resultados, quando comparados com a referência.

## CONCLUSÕES:

A partir dos resultados preliminares, foi possível concluir que a substituição total da cal por EFP, não alterou as propriedades no estado fresco das argamassas. Já no estado endurecido há um acréscimo dessas propriedades, devido as reações químicas envolvidas.

---

## BIBLIOGRAFIA

- ABNT-NBR NM 24 - Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT- NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT-NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ANASTASIOU, E. K.; PAPAYIANNI, I.; PAPACHRISTOFOROU, M. Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement. *Materials & Design*, v. 59, p. 454–460, 2014.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. Anuário Completo 2023. Disponível em: <>. Acesso em 30 de julho de 2023.
- MAGHOOL, Farshid *et al.* Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 19, n. 4, p. 949-958, 2017.
- MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. P. The action of fire on the components of the concrete. *Ciência Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 32, n.1, p. 47-55, 2011.
- RILEM Technical Committee. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications. Part 2: Stress–strain relation. *Materials and Structures*, vol 40, pp 855-864, setembro 2007.
- RODRIGUEZ, À. Et al. Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53, n. 11, p. 645-651, 2009.
- SILVA, T. F. et al. Influencia do processo de resfriamento nas propriedades físico-químicas da escória de forno panela, utilizada na substituição do cimento Portland. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 27, 2022.
- SOUZA, E. F. C. et al. Combined Use of Ladle Furnace Slag and Rice Husk Ash as a Supplementary Cementitious Material. *Materials Research*, v. 26, 2023.