



# DESEMPENHO DE ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS COM ESCÓRIA DE FORNO PANELA

**Palavras-Chave:** Material cimentício, resíduos industriais, propriedades mecânicas.

**Autores(as):**

**Jaqueline Rangel de Almeida, COTIL/UNICAMP**

**Verônica Brandão, COTIL/UNICAMP**

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

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

**Profa. Dra. Gisleiva C. S. Ferreira (orientadora), FT/UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

Atualmente, há uma preocupação expressiva em relação aos impactos ambientais gerados pelos principais setores da economia. Um desses setores é a indústria da construção civil, um dos setores com maior consumo de recursos naturais e geração de resíduos. Para mitigar tais impactos, avalia-se as oportunidades de incorporar resíduos aos materiais de construção mais consumidos (concretos e argamassas). Entre esses resíduos destaca-se a Escória de Forno Panela (EFP), resíduo sólido gerado na siderurgia, durante o processo de refino secundário do aço. Os estudos sobre a EFP se concentram no uso como agregados em materiais cimentícios, devido à sua natureza granular. No entanto, alguns lotes da EFP têm características físico-químicas que viabilizam o uso como aglomerante complementar, isso devido o método de resfriamento aplicado (SILVA *et al.*, 2022; SOUZA *et al.*, 2023). Silva *et al.* (2022), investigaram a caracterização físico-química de amostras de EFP para avaliar a influência do método de resfriamento em seu potencial como aglomerante suplementar em matrizes cimentícias. Os resultados indicaram que o resfriamento lento é o mais adequado como aglomerante, pois apresenta menor possibilidade de reações químicas expansivas e apresenta maior finura. SOUZA *et al.* (2023) estudaram as propriedades de argamassas de revestimento com substituição do Cimento Portland por EFP, combinado com o efeito pozolânico da cinza da casca de arroz (CCA). A substituição proporcionou redução na resistência mecânica, porém a presença de EFP+CCA foi benéfica para melhorar a retenção de água.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi mostrar essa visão aos alunos do ensino médio brasileiro, através do desenvolvimento de traços de argamassas com EFP, os quais foram comparados a um traço referência (0% EFP), em relação às propriedades mecânicas (resistência à tração na flexão, resistência à compressão). Para isso, a cal hidratada foi totalmente substituída pela EFP.

## MATERIAIS E MÉTODOS:

### Materiais

Os materiais que foram utilizados nesta pesquisa estão listados na Tabela 1. A amostra de EFP foi definida em função do tipo de resfriamento (lento ou ar), o que proporcionou uma textura mais fina, compatível com o objetivo desta pesquisa. Entretanto, ainda foi necessário realizar um pré-processamento que envolveu etapas de peneiramento (material passante em peneira com abertura 0,6mm) e moagem (moinho de bolas), resultando em granulometria compatível com o objetivo do estudo (uso como aglomerante complementar).

Materiais	Sigla	Origem/Tipo	Localização
Escória de forno panela	EFP	Indústria do setor siderúrgico	Região de Limeira, SP.
Cimento Portland	CP II-F	Indústrias de cimento (Brasil)	Região de Limeira, SP.
Cal hidratada	CH	Indústrias de cal (Brasil)	Indústrias de cimento (Brasil)
Água	-	Rede de abastecimento	Limeira, SP
Areia quartzosa	AQ	-	-

Tabela 1 – Principais materiais que foram utilizados durante as etapas experimentais da pesquisa

### Metodologia

A metodologia desta pesquisa foi dividida em duas etapas, as quais podem ser visualizadas conforme fluxograma representado na Figura 1. A EFP foi caracterizada conforme ensaios e análises descritas na Tabela 2.



Figura 1 – Fluxograma representativo das etapas experimentais da pesquisa.

O traço 1:0,5:3 (CP: cal: areia), no qual a relação água/aglomerantes foi definida em função do ensaio de Flow Table (NBR 13276 (ABNT, 2016)), considerando uma consistência normal de 260 mm ( $\pm 5$  mm). A Tabela 2 detalha as proporções do traço e respectivas identificações.

Traço	Materiais				Relação a/agl.
	CP	Cal	Areia	EFP	
AR	1	0,5	3	0	0,78
AE	1	0,0	3	0,5	0,75

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

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

As curvas granulométricas das amostras de EFP, Cimento Portland e Cal estão representados na Figura 2.

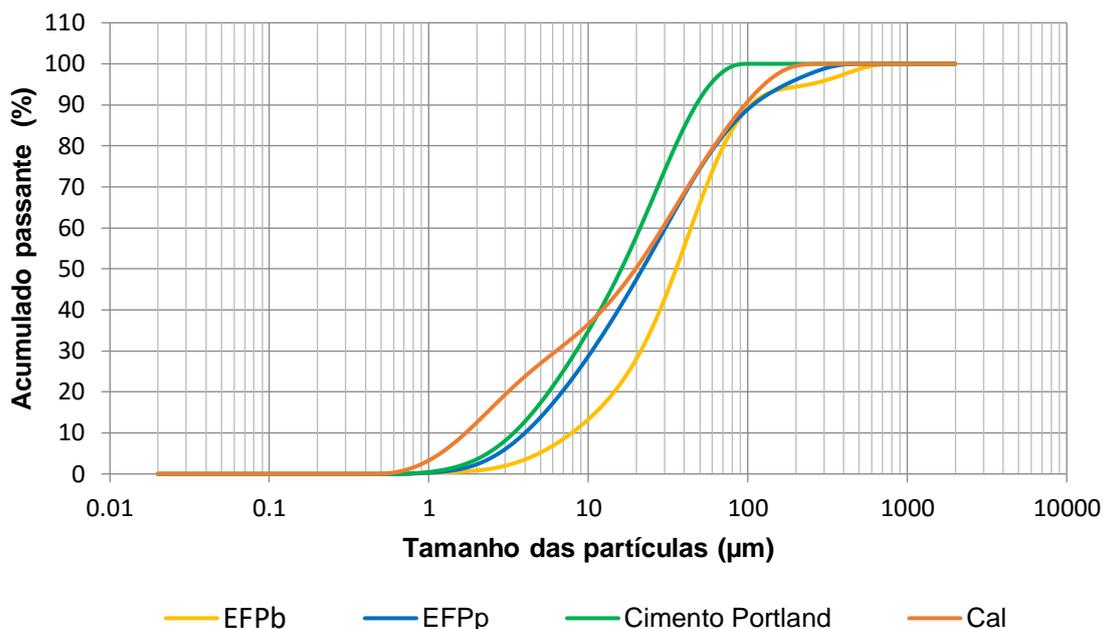


Figura 2 – Curva granulométrica dos materiais da pesquisa.

Os valores de massa específica do cimento CP II F, EFP e cal foram  $3,01\text{g/cm}^3$ ,  $2,75\text{g/cm}^3$  e  $2,50\text{g/cm}^3$ , respectivamente. Já a da areia quartzosa foi de  $2,65\text{g/cm}^3$ . A partir dos ensaios de fluorescência de Raios X (FRX) e perda ao fogo (PF), obteve-se a composição química dos aglomerantes utilizados nesta pesquisa (CP II-F; EFP; Cal), conforme Tabela 3.

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

A

Tabela 3 – Composição química das amostras.

tabela 4

apresenta os resultados no estado fresco das argamassas (densidade, retenção de água, ar incorporado). Com isso, foi possível verificar que a substituição total da cal hidratada por EFP, não trouxe diferença significativa para as argamassas nos requisitos de retenção de água, ar incorporado e densidade. Deve-se salientar que esses parâmetros foram mantidos em função da relação

água/aglomerante que diminuiu para o traço com EFP (0,75) em relação ao traço referência (0,78), mantendo a mesma trabalhabilidade ( $260 \pm 5\text{mm}$ ).

Traço	Flow Table (mm) (NBR 13276)	Retenção de água (NBR 13277)	Densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) (NBR 13278)	Teor de ar incorporado (%) (NBR 13278)
AR	262	82	2039	5
AE	260	84	2064	5

Tabela 4 – Resultados no estado fresco das argamassas de assentamento.

A tabela 5 apresenta os resultados no estado endurecido das argamassas de assentamento, juntamente com análise estatística. 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 o efeito filer que esse tipo de escória pode produzir, quando utilizado como aglomerante complementar (SILVA et al., 2022; SOUZA et al., 2023). Em relação às propriedades mecânicas, também apresentou aumento, em especial na resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico (em média 20%), o qual foi atribuído às reações químicas (maior formação de C-S-H). A análise estatística para identificar as diferenças entre as médias das propriedades mecânicas das argamassas (grupos homogêneos), indica que apenas a  $R_t$  foi estatisticamente igual para os 2 traços, o que não aconteceu para  $R_c$  e  $E_d$ . Esse comportamento pode ser justificado pela idade de ruptura (28 dias), que foi o suficiente para ocorrer ações físicas (efeito filer), tornando a matriz da argamassa com EFP mais densa, além da formação adicional de C-S-H (menor proporção), o que melhorou a  $R_c$  e  $E_d$ .

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)
AR	1938	2,29	7,74	13,61
DP	8,06	0,47	0,93	0,33
CV (%)	0,42	20,57	12,07	2,42
GH	A	C	D	F
AE	1970	2,79	9,24	15,43
DP	3,48	0,27	0,97	0,22
CV (%)	0,18	9,66	10,49	1,43
GH	B	C	E	G

DV: desvio padrão / CV: coeficiente de variação / GH: Grupos homogêneos.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios das argamassas no estado endurecido, juntamente com os dados de análises estatísticas..

## CONCLUSÕES:

A partir dos resultados apresentados, foi possível concluir que a substituição total da cal por EFP, não alterou as propriedades no estado fresco das argamassas. Já no estado endurecido, melhorou as propriedades mecânicas ( $R_c$  e  $E_d$ ), em relação ao traço sem EFP (AR). Isso ocorreu, principalmente, em função do efeito filer e, secundariamente, pela formação de C-S-H.

## BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 24: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13281-2: Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15258 - Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15259: Argamassa assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- PEREIRA, V. F. R. Utilização de Escória de Forno Panela da Indústria Siderúrgica em Matrizes Cimentícias. Dissertação (Mestrado em Tecnologia). Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 146f, 2018.
- SILVA, T. F. et al. Influência 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.