



Quantificação do fluxo de escória granulada por meio da equação do sistema INBA®

Jairo Antônio Reis Gomes¹

Jaqueline do Carmo Lima Carvalho²

Robson Pereira de Lima³

Alan Rodrigues Teixeira Machado⁴

RESUMO

Durante o processo de produção de ferro-gusa em alto-forno, a escória fundida é gerada como um subproduto. Essa escória pode ser transformada em escória granulada no sistema INBA®, para utilização na indústria cimentícia. Por outro lado, a quantidade de escória granulada produzida é pouco conhecida. Por isso, foi realizado um estudo para determinar os parâmetros da equação que determinam o fluxo de escória no sistema INBA® e para quantificar experimentalmente a escória granulada produzida. Os resultados revelaram que a escória granulada é produzida com teor de umidade de 6,0% e sob um fluxo médio de 1,58 toneladas por minuto.

Palavras-chave: Alto-forno. Escória granulada. INBA®.

¹Graduando em Engenharia Metalúrgica pela Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: jairo.0693008@discente.uemg.br.

²Graduada em Engenharia Civil pela Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade João Monlevade. Mestre em Materiais para Engenharia pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. É pesquisadora no CETEC – UEMG, Unidade João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: jaqueline.z.lima@gmail.com.

³Graduado em Ciências Econômicas pela Universidade Federal Fluminense – UFF. Mestre e também Doutor pelo Programa de Engenharia de Produção – PEP da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, com ênfase em Gestão e Inovação. É professor e pesquisador da Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade de João Monlevade, MG, Brasil. E-mail: robson.lima@uemg.br.

⁴Graduado em Química e Mestre em Agroquímica pela Universidade Federal de Lavras – UFLA. Doutor em Química pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Atualmente é professor da Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade João Monlevade, do Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH e orientador permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UEMG, Unidade de Frutal, MG, Brasil. E-mail: alan.machado@uemg.br.

Quantification of granulated slag flow using the INBA® system equation

ABSTRACT

During the blast furnace pig iron production process, molten slag is generated as a byproduct. This slag can be transformed into granulated slag in the INBA® system, for use in the cement industry. On the other hand, the amount of granulated slag produced is poorly known. To this end, a study was carried out to determine the specific parameters that determine the slag flow in the INBA® system and to experimentally quantify the granulated slag produced. The results revealed that the granulated slag is produced with a moisture content of 6.0% and under an average flow rate of 1.58 tons per minute.

Keywords: Blast furnace. Granulated slag. INBA®.

Artigo recebido em: 31/07/2023

Aceito em: 30/10/2023

1. INTRODUÇÃO

A siderurgia é a indústria responsável pela produção do aço, um material indispensável em diversos segmentos que são essenciais para a sociedade moderna, como construção civil, indústria automotiva e máquinas pesadas, entre outros. Os equipamentos utilizados na produção de aço incluem altos-fornos, convertedores e fornos elétricos. O alto-forno, particularmente, é um reator usado para a produção de ferro-gusa, a matéria-prima principal na produção de aço. No topo do alto-forno, o processo começa com a carga das principais matérias-primas, como sinter, minério granulado, pelota e coque metalúrgico. Em seguida, esses materiais são aquecidos a temperaturas extremamente elevadas, gerando uma reação química e resultando na produção de ferro-gusa e escória. Nesse contexto, ressalta-se que, somente no Brasil, em 2020, foram gerados cerca de 18,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos e líquidos pela produção de aço no país (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

A escória, subproduto resultante do processo siderúrgico, é composta principalmente por óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e dióxido de silício (SiO_2) (PAGIO *et al.*, 2022). A mesma pode ser encontrada em diferentes formas, seja líquida, bruta(fundida) ou granulada, produzida pelo seu resfriamento rápido sob alta pressão, usando o sistema *INBA®* (*Brochure Inba System*). O sistema *INBA®* foi desenvolvido na Bélgica, o seu funcionamento se baseia no resfriamento da escória bruta com água, no qual o produto é direcionado para um funil que a descarrega na parte central de um filtro com a estrutura de um tambor. Esse tambor, responsável por processar a mistura, possui uma tela apropriada em sua superfície de saída de água. A mistura que escoar pela tela é direcionada para um reservatório, enquanto partículas de escória são removidas na parte superior usando “dentes” revestidos. Esse sistema é considerado uma tecnologia avançada, por proporcionar a obtenção de partículas de tamanho uniforme, alta qualidade e valor agregado elevado (MATSUURA *et al.*, 2022). Ademais, oferece benefícios ambientais significativos, tais como a diminuição da emissão de gases de combustão e poeira do alto-forno, e a diminuição da demanda por água durante o processo de resfriamento da escória (MATSUURA *et al.*, 2022).

A escória granulada produzida pelo *INBA®* pode ser utilizada como matéria-prima para a indústria de cimento, em misturas de concreto e asfalto, em projetos de infraestrutura, dentre outras aplicações. Ela apresenta propriedades que melhoram as características do concreto, tornando-o mais resistente, com maior resistência à compressão e menos

permeável (HUYNH *et al.*, 2022). Dado que a escória granulada é matéria-prima útil para diversas aplicações, inclusive para produção de cimento, é importante saber a quantidade produzida após o processo de resfriamento. Por isso, o objetivo desse trabalho foi quantificar a escória granulada e a sua composição química, bem como caracterizar o fluxo de escória por meio dos parâmetros equacionais do sistema *INBA*®.

2. METODOLOGIA

2.1 Coleta da escória e medida de massa

A escória granulada foi coletada após a parada programada do alto-forno de uma siderúrgica. A baía de armazenamento foi completamente limpa e foram medidas as massas de três corridas subsequentes ao retorno do alto-forno. Para isso, usou-se uma pá carregadeira com uma balança em sua concha. A Tabela 1 apresenta as condições operacionais de cada corrida.

Tabela 1: Dados operacionais de cada corrida após o retorno do alto-forno

Corrida	Tempo de corrida (min)	Pressão do <i>INBA</i> ® com escória (bar)	Pressão do <i>INBA</i> ® sem escória (bar)	Velocidade do tambor (rpm)
1	22	116,3	34,7	0,4
2	103	120,08	34,7	0,4
3	47	117,08	34,7	0,4

Fonte: Autores, 2023.

2.2 Caracterização das amostras de escória

A umidade da escória foi avaliada para as amostras coletadas em cada corrida (Tabela 1), após a granulação. Essas amostras foram medidas em uma balança industrial e posteriormente colocadas em uma estufa para secagem a uma temperatura de 100-110 °C até massa constante. A diferença de massa entre a escória úmida e seca em porcentagem (análise gravimétrica) foi usada para indicar o teor de umidade em base seca. Ademais, as amostras foram caracterizadas por Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia, utilizado o Espectrômetro S2 PUMA série 2.

2.3 Cálculo do fluxo de escória

O fluxo de escória foi calculado pela Equação 1, conforme manual de utilização do sistema *INBA*® da empresa Paul Wurth (1988).

$$Q = \frac{(P - P_0) \cdot N}{K \cdot (0,5N + 1)} \quad (1)$$

Em que:

Q = fluxo de escória (t/min);

P = pressão hidráulica real (bar);

P_0 = pressão hidráulica com o tambor descarregado (bar);

N = velocidade do tambor (rpm);

K = constante.

Ainda de acordo com esse manual, a constante K pode ser determinada pela Equação 2.

$$K = \frac{(P - P_0) \cdot N}{\frac{PES}{TES} \cdot (0,5N + 1)} \quad (2)$$

Em que:

PES = massa da escória seca obtida pelo leito de fusão (t);

TES = tempo de escória (min).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Umidade da Escória (UE) variou entre 5,87% e 6,15% e o valor médio pode ser encontrado na Tabela 2.

Tabela 2: Características físicas da escória granulada por corrida

Corrida	Massa de escória úmida (t)	Massa de escória seca medida (t)	UE (%)	K	Q (t/min)	Escória bruta/tonelada de ferro gusa/dia (kg/t)
1	35,01	32,97	6,0 (0,14)*	17,51 (0,58)*	1,58 (0,08)*	321
2	180,20	168,99				
3	80,63	75,76				

*Desvio padrão da média das três corridas.

Fonte: Autores, 2023.

A umidade da escória granulada é um fator importante por indicar a quantidade de água presente na escória após sair do sistema *INBA*® e está diretamente relacionada à variação de massa entre a escória fundida e a granulada. No entanto, há poucos estudos sobre os teores de umidade da escória granulada, já que geralmente é repassada às cimenteiras em base seca, ou seja, sem a água. Pode ser observado também pela Tabela 2 que, os valores da constante K e do fluxo de escória (Q) são grandezas inversamente proporcionais, significando que para um fluxo de escória mais alto, menor será a constante K. Outro importante resultado foi a razão de escória fundida produzida por tonelada de gusa (Tabela 2). Esse valor é relevante para o controle do processo siderúrgico, sendo desejável um valor mínimo de escória produzida. No dia avaliado, o valor obtido foi de 321 kg de escória bruta por tonelada de ferro-gusa, abaixo do limite estabelecido pela siderúrgica de 340 kg de escória bruta por tonelada. A composição química da escória granulada é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3: Análise química da escória granulada

Corrida	SiO ₂	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	FeM*
	% (m/m)										
1	37,75	0,41	0,79	10,53	42,44	6,05	0,35	0,49	0,09	0,29	0,40
2	38,11	0,37	0,94	10,30	42,39	5,65	0,32	0,51	0,12	0,44	0,34
3	39,39	0,30	0,68	10,58	42,20	4,73	0,25	0,49	0,113	0,30	0,94

*FeM indica a quantidade de material retirada pelo ímã por massa da amostra.

Fonte: Autores, 2023.

Foi observado que a quantidade de FeM, ou seja, o material que o ímã retirou antes da análise da amostra, apresentou um desvio padrão de 0,30%, indicando uma leve variação na quantidade retirada pelo ímã em relação à massa da amostra. O uso do ímã se torna necessário para eliminar impurezas que podem estar presentes na amostra e prejudicar a assertividade da composição química. Além disso, é importante destacar que os teores de enxofre nas diferentes corridas da escória granulada variaram de 0,30% a 0,41%. Quando o teor de enxofre é superior a 3,5%, pode ocorrer a precipitação de sulfitos, o que pode retardar o tempo de pega do cimento (VOTORANTIM CIMENTOS, 2018).

Também foi observado que os teores de alumínio e sílica na escória são

suficientemente altos para que a escória apresente reatividade adequada com a água, formando compostos que contribuem para as propriedades do cimento, como resistência mecânica e durabilidade. Adicionalmente, é essencial destacar que o teor de ferro na escória não deve ser excessivamente alto, uma vez que isso pode resultar em uma coloração indesejada no cimento produzido. O teor recomendado de ferro na escória é de até 5% na forma de FeO, e foi observado que as amostras coletadas apresentam teores inferiores ao estipulado pelas cimenteiras (COELHO, 2002), sendo eles respectivamente em ordem crescente de corrida 0,41%, 0,37%, e 0,30%.

Embora o alto-forno tenha passado por uma parada programada, os teores apresentados na escória granulada apresentaram-se satisfatórios conforme estipulado pela norma NBR 16697. Portanto, a escória granulada estudada apresenta potencial promissor para aplicação em cimenteiras.

4. CONCLUSÃO

Com base nos parâmetros calculados (K e Q), tornou-se possível desenvolver métodos alternativos para medir o volume de escória produzida por tonelada de ferro gusa, isto é, calcular a taxa de escória, sem a necessidade de análises químicas das matérias-primas, que frequentemente requerem equipamentos mais sofisticados. No entanto, com o uso do sistema *INBA®*, é possível obter uma estimativa do fluxo de escória granulada que contribui para a eficiência e a sustentabilidade da indústria siderúrgica. Tal fator abre caminho para a utilização da escória granulada como matéria-prima de diferentes materiais, proporcionando agregação de valor ao resíduo, reduzindo o uso de recursos naturais, promovendo a economia circular e evitando descartes inadequados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e à Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) pelo apoio financeiro e por bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS

COELHO, M. A. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno.** 2002. 40 f. Dissertação. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

HUYNH, T.-P., Ho, L. S., & Ho, Q. V. *Experimental investigation on the performance of concrete incorporating fine dune sand and ground granulated blast-furnace slag.* *Construction and Building Materials*, 347, 128512, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128512>

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2021.** Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/Acesso em: 17 abr. 2023.>

MATSUURA, H.; YANG, X.; LI, G. *Recycling of ironmaking and steelmaking slags in Japan and China.* *Int J Miner Metall Mater* 29, 739–749 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2400-5>.

PAGIO, M. Z.; CARRARETO, L. F.; VIEIRA, G. L.; MAGALHÃES, D. C. **Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias.** *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 167-186, abr./jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000200599>

PAUL WURTH GROUP. *Brochure Inba System.* Disponível em: <https://www.paulwurth.com/wp-content/uploads/2020/08/Brochure-INBA-System-en.pdf>. Acesso em: 19 abr.2023.

.