



**Tratamento da escória e do pó de aciaria elétrica com ácido fosfórico: investigação da composição química e da área superficial específica**

**Paloma C. Silva1(G), Cristiele C. Souza2(PQ), (PG), Jaqueline C. L. Carvalho1(PG), Filipe G. Fagundes1 (PG), Evaneide N. Lima1 (PG), Robson P. Lima³ (PQ), Magno A. Oliveira⁴ (PQ), Augusto C. S. Bezerra⁴ (PQ), Osania E. Ferreira2 (PQ) e Alan R. T. Machado¹²\* (PQ).**

¹ Departamento de Ciências Exatas, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade, Minas Gerais, 35930-314, Brasil.

² Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Minas Gerais, Frutal, Minas Gerais, 38202-436, Brasil.

³ Departamento de Geociências, Ciências Humanas e Linguagens, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade, Minas Gerais, 35930-314, Brasil.

⁴ Departamento de Engenharia de Transportes, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Minas Gerais, 30421-169, Brasil.

\*E-mail: [alan.machado@uemg.br](mailto:alan.machado@uemg.br)

**RESUMO**

Objetivando o desenvolvimento de produtos para uso como condicionadores de solo, este estudo avaliou a transformação de resíduos da indústria siderúrgica — especificamente a escória de aciaria (EA) e o pó de aciaria elétrica (PAE) — por meio de tratamento com ácido fosfórico (H3PO4). As análises por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) evidenciaram incremento no teor de pentóxido de fósforo (P2O5), atingindo 40,5% na amostra de EA modificada e 32,3% no PAE. Além disso, observou-se aumento da área superficial específica, alcançando 52,0 m²/g para o material a partir da EA e 8,5 m²/g para o PAE, valores superiores aos geralmente encontrados na literatura. Os resultados obtidos indicam que os resíduos modificados apresentam características físico-químicas favoráveis à retenção de água, fornecimento de nutrientes para o solo e estabilização do pH, evidenciando o potencial para aproveitamento em aplicações agroambientais.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_



*Palavras-chave: siderurgia, escória de aciaria; pó de aciaria elétrica.*

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*



**Introdução**



Em 2024, o setor siderúrgico brasileiro produziu aproximadamente 33,7 milhões de toneladas de aço bruto, gerando diversos resíduos sólidos ao longo de sua cadeia produtiva. Entre esses, destacam-se a escória de aciaria (EA) e o pó de aciaria elétrica (PAE), resíduos que, devido à composição química complexa e à presença de metais potencialmente tóxicos, são classificados como perigosos. Estima-se que, para cada tonelada de aço produzido em fornos elétricos, sejam gerados cerca de 180 kg de EA e 20 kg de PAE (1). A EA é composta principalmente por óxidos de cálcio, ferro, silício, magnésio e manganês, enquanto o PAE apresenta elevado teor de zinco, ferro e metais como cádmio, chumbo, cromo e níquel (2).

Nos últimos anos, esses resíduos passaram a ser investigados como potenciais condicionadores de solo, em função de sua natureza alcalina e do potencial para fornecer nutrientes e melhorar as propriedades químicas e físicas do solo. No entanto, a aplicação direta desses materiais é limitada pela possível lixiviação de metais potencialmente tóxicos e pela baixa área superficial específica, o que restringe sua capacidade de retenção de água e nutrientes. Para superar essas limitações, diferentes possibilidades de modificação têm sido propostas, entre as quais o tratamento com ácido fosfórico (H3PO4) que se destaca por promover a formação de fases minerais fosfatadas, capazes de imobilizar metais e melhorar as propriedades superficiais dos resíduos.

Apesar dos avanços, a maioria dos estudos se concentra na modificação isolada da escória, havendo poucas investigações sobre a modificação do PAE para uso como condicionador de solo. Além disso, informações sobre os efeitos desse tratamento nas propriedades físico-químicas desses materiais — como composição química, morfologia e área superficial específica — são limitadas.

Neste contexto, o presente estudo avaliou a modificação da EA e do PAE com H3PO4, realizando a caracterização integrada de ambos os resíduos tratados. Os dados obtidos contribuem para ampliar o conhecimento sobre as propriedades desses materiais e suas aplicações sustentáveis na agricultura e na gestão de resíduos industriais.

**Experimental**

Os resíduos EA e PAE foram obtidos de uma usina siderúrgica em Minas Gerais e processados em moinho de bolas planetário a 300 rpm por 15 minutos, até se obter partículas menores que 0,297 mm. Para o tratamento químico, 10 g de cada resíduo foram misturados com 10 mL de H3PO4 (85%) sob agitação manual, lavados com água destilada até pH neutro, secos a 300 °C por 3 h, lavados com solução de NaHCO3 a 1% m/v e novamente secos a 60 °C. Os materiais obtidos foram denominados EAM e PAEM. As amostras foram caracterizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura, MEV (Hitachi, TM 3000), Fluorescência de Raios X, FRX (Shimadzu, EDX-720), e a área superficial específica foi determinada pelo método BET (Quantachrome, Nova 1000), após degasificação a 300 °C (12 h para EAM e 6 h para PAEM) (3). A distribuição de poros foi avaliada por meio do modelo NLDFT (4).

**Resultados e Discussão**

As composições químicas dos materiais analisados apresentaram diferenças entre as amostras. Observou-se um aumento expressivo de P2O5 após o tratamento com ácido fosfórico: de 0,0% (PAE) para 32,3% (PAEM) e de 2,4% (EA) para 40,5% (EAM). Esse incremento é relevante para uso agrícola, uma vez que o fósforo é indispensável ao crescimento vegetal, promovendo o desenvolvimento radicular e o aumento da produtividade (1). Por outro lado, o teor de CaO diminuiu de 15,7% para 9,8% no caso do PAE/PAEM, e de 36,9% para 20,9% no caso do EA/EAM. Em termos de rendimento gravimétrico, observou-se aumento de massa para o PAEM (125%), enquanto a amostra EAM apresentou rendimento de 77%, isto é, a massa final da fração sólida correspondeu a 77% da massa inicial. Além da composição química, as imagens obtidas por MEV destacam mudanças morfológicas importantes após os tratamentos, revelando que a estrutura compacta e irregular original foi transformada em uma superfície porosa (Fig. 1).



**Figura 1.** Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos resíduos da indústria siderúrgica e seus produtos modificados, com aumento de 1000×. (a) EA, (b) EAM, (c) PAE e (d) PAEM.

A área superficial específica foi de 52,0 m²/g para a amostra EAM, valor superior aos reportados por Feng *et al*. (5) e Dimitrova e Mehanjiev (6), que descreveram áreas de 31,9 m²/g e 0,68 m²/g, respectivamente, para escórias siderúrgicas. Para a amostra PAEM, a área superficial foi de 8,5 m²/g, também superior aos valores



obtidos por Paula *et al*. (7), que variaram entre 4 e 7 m²/g. A distribuição de poros e o volume cumulativo reforçam esses achados. A amostra EAM apresentou pico máximo a 8,82 Å e volume cumulativo de 0,064 cm³/g para poros acima de 120 Å. Já a PAEM exibiu pico a 9,66 Å e volume de 0,009 cm³/g. Ambas as amostras apresentaram predominância de mesoporos (20–500 Å), de acordo com a classificação da IUPAC. A distribuição de poros indicou ainda que, para a EAM, 70% da área total corresponde a microporos (36,4 m²/g) e 30% a mesoporos (15,6 m²/g). Para a PAEM, a área microporosa foi de 5,97 m²/g e a mesoporosa de 2,6 m²/g. A maior área superficial específica e a predominância de mesoporos são características desejáveis para aplicações agrícolas, pois favorecem a retenção de água e nutrientes no solo.

**Conclusões**

O tratamento com ácido fosfórico promoveu a incorporação de fósforo aos resíduos siderúrgicos. A amostra EAM apresentou área superficial de 52,0 m²/g, com 70% de microporos e 30% de mesoporos, enquanto a PAEM alcançou 8,5 m²/g, com predominância de mesoporos. Essas transformações químicas e estruturais favorecem a retenção de água e nutrientes, tornando os materiais promissores para uso agrícola, embora estudos em campo ainda sejam necessários para confirmar o potencial agronômico desses materiais.



**Agradecimentos**

Os autores agradecem à FAPEMIG e à UEMG (PQ/UEMG) pelo apoio financeiro e bolsas concedidas. Agradecem também ao LAB-SIM/CEFET-MG pelas instalações disponibilizadas, que contribuíram para a realização deste trabalho.

**Referências**

1. I. Nikolić; D. Đurović; S. Marković; L. Veselinović; I. Janković-Častvan; V.V. Radmilović; V.R. Radmilović, J. Mater. Res. Technol. 2020, 9, 12783–12794. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.024>.
2. R.M. Khattab; M.M.E.-S. Seleman; M.F. Zawrah, Ceram. Int. 2017, 43, 12939–12947. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.192>.
3. C. C. Souza; L. Z. M. Souza, M. Yılmaz; M. A. Oliveira; A.C. S. Bezerra; E. F. Silva; M. R. Dumont; A. R. T. Machado, Clean. Mater. 2022, 3, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100052>.
4. M. Thommes; K. Kaneko; A. V. Neimark; J. P. Olivier; F. Rodriguez-Reinoso; J. Rouquerol; K. S. Sing, IUPAC. 2025, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
5. D. Feng; J.S.J. Van Deventer; C. Aldrich, Sep. Purif. Technol. 2004, 40, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.01.003>.
6. S.V. Dimitrova; Mehanjiev, Water Res. 2000, 34, 1957–1961. <https://doi.org/10.1016/s0043-1354(99)00328-0>.
7. L.N. Paula; L.A.D.R. Giusto; R.C.R. Filho; L.R. Castilho; F. Magalhães; M.G. Rosmaninho; D.Q. Lima, Quim. Nova 2013, 36, 1332–1337. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422013000900009>.