



CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA E DE ALTO-FORNO PRODUZIDAS EM USINAS AO LONGO DA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS PARA APLICAÇÃO INDUSTRIAL

COSTA, W.F.S.¹, CHOQUE FERNANDEZ, O. J.², SOUSA, M. S. C.³

¹ Instituto Federal do Pará – Campus Belém. Curso de Engenharia de Materiais. matfernando13@gmail.com

² Instituto Federal do Pará – Campus Belém. Curso de Engenharia de Materiais. ochoque.fernandez@gmail.com

³ Instituto Federal do Pará – Campus Belém. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais (PGEMAT). msilviacamarao@gmail.com

RESUMO

Resíduos siderúrgicos são produzidos nas diferentes usinas espalhadas ao longo da Estrada de Ferro Carajás (EFC) nos estados do Pará e Maranhão, gerando escórias que possuem potencial factível para aplicações industriais. Neste trabalho, foram caracterizadas escórias de aciaria e de alto-forno provenientes das usinas da EFC, através de ensaios mineralógicos e físico-químicos. De acordo com a sua origem, a escória de aciaria ou de alto-forno, diferenciam-se em sua morfologia, granulometria, mineralogia e composição química. As escórias de alto forno, tal como procedem, apresentam tamanhos de grão compatíveis com agregados miúdos, com massas específicas e unitárias na margem das normas, são amorfas com poucas fases cristalinas e predominância de SiO₂, CaO e Al₂O₃. As escórias de aciaria como agregados graúdos, possuem fases cristalinas ricas em FeO, CaO, SiO₂. A comparação em relação à basicidade mostrou escórias de alto-forno e de aciaria, ácida e básica, respectivamente não possuindo capacidade aglomerante, podendo ser utilizadas como agregado para concreto, pavimentação e lastro de vias férreas.

PALAVRAS-CHAVE: Carajás, Ferro-gusa, Alto-forno, Aciaria, Construção civil

ABSTRACT

Steel and blast furnace wastes are produced at the different plants scattered along the Estrada of Ferro Carajás (EFC) Railways in the states of Pará and Maranhão, generating slags that have potential for industrial applications. In this work, steel and blast furnaces slags from the EFC were used, characterizing them through mineralogical and physicochemical tests. According to their origin, the steel and blast furnace slags differ in their morphology, granulometry, mineralogy and chemical composition. Blast furnace slag, as they proceed, have grain sizes compatible with fine aggregates, with specific and unit masses at the margin of the standards, are amorphous with few crystalline phases and predominance of SiO₂, CaO and Al₂O₃. Steel slag as coarse aggregates have crystalline phases rich in FeO, CaO, SiO₂. The basicity of slag from blast furnace and steel slag are acid and basic, respectively and thus have no agglomerating capacity and can be used as aggregate for concrete, paving and ballast of railways.

KEYWORDS: Carajás, Pig iron, Blast furnace, Steelwork, Construction

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a Amazônia produz resíduos siderúrgicos nas diferentes usinas espalhadas ao longo da Estrada de Ferro Carajás (EFC) gerando escórias que possuem potencial factível para aplicações industriais, a exemplo da construção civil o que beneficia o aproveitamento desse material.

Por muitos anos a escória foi classificada como um resíduo sólido da produção siderúrgica. Atualmente, países como EUA, Canadá e Alemanha passaram adotar a classificação da escória como um coproduto da siderurgia (FREITAS, 2018). A escória de aciaria é um importante coproduto da indústria siderúrgica, também conhecida como agregado siderúrgico. Sua geração é na faixa de 100 a 150 kg por tonelada de aço produzido, dependendo das matérias-primas utilizadas e do processo de fabricação de aço empregado (ABM, 2008). Já a escória de alto-forno é definida como um produto não metálico constituído basicamente de silicatos e aluminatos que são desenvolvidos em condição de fundição simultaneamente com o ferro em um alto-forno (KALYONCU, 2000) e atualmente possui inúmeras aplicações na indústria.

A destinação da escória de aciaria, produzida após sua desmetalização, apresenta, em quase todos os países inclusive o Brasil, parcela significativa de utilização sem quase nenhuma agregação de valor ou apenas estocagem e disposição. Na maioria dos países, as escórias de aciaria ainda não alcançaram o mesmo nível de utilização econômica das escórias de alto-forno, que atinge a 95% na média global contra apenas 50% para a escória de aciaria. No Brasil, a utilização de escórias de aciaria é aplicada em: bases e sub-bases de estradas confinadas (cobertas com asfalto) ou não confinadas, pavimentação de estradas vicinais lastro para ferrovias, corretivo de solo na agricultura e outros usos artefatos de concreto (RAMOS et al., 2015).

Na Austrália, a escória de alto-forno granulada e moída é usada principalmente na produção de cimento e como um agregado fino (areia grossa) (ILYUSHECHKIN, et al., 2012). Segundo Ramos et al. (2015), como exemplo de usos consolidados nos demais países, há outras utilizações destacadas para as escórias de aciaria, tais como: reciclagem em alto-fornos, produção de concreto asfáltico, produção de cimento Portland, condicionamento de solos (uso agrônomo de escória) (RAMOS et al., 2015).

Para John & Agopyan (2014), uma aplicação interessante é a produção de blocos e lajotas de escória ativada com cal, produto tradicional em algumas regiões da Europa, assim como a utilização na produção de lã de rocha, um importante produto para absorção acústica, isolamento térmico e proteção contra chamas, dispensando o impacto ambiental da mineração de rochas e sua fusão. Mesmo no mercado de cimento Portland, existem algumas variantes que devem ainda ser exploradas. Este é o caso da combinação cimentos de escória com cura térmica, demonstrada por CAMARINI (1995). Outra alternativa é a adição de escória moída diretamente na betoneira, tecnologia adotada em muitos países mas praticamente ignorada no Brasil (MARQUES, 1994).

As escórias de aciaria e alto-forno devem apresentar diferenças físico-químicas em função das específicas operações do processo de cada indústria na obtenção do ferro-gusa e aço. Essas diferenças pretendem ser comparadas neste estudo por meio de ensaios físicos e químicos buscando comparar resultados e benefícios para aplicação industrial ou melhoramento dos produtos já utilizados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para este trabalho utilizou-se escórias de aciaria (EA) e escórias de alto-forno (EAF-1 e EAF-2). As escórias EA e EAF-1 (Figura 1. a e b) procedem de empresas siderúrgicas localizadas em Marabá/PA e EAF-2 (Figura 2) procede de São Luís/MA.



Figura 1. (a) Amostras de escórias EA; e (b) EAF-1 de siderúrgicas de Marabá/PA.



Figura 2. Amostras de escória EAF-2 de siderúrgica de São Luís/MA.

As escórias EA e EAF-1 devidamente homogêneas e quarteadas foram submetidas a ensaios granulométricos, segundo a norma NBR 7211 (2005). Na escória EAF-2 não foram feitos ensaios granulométricos, devido ter sua procedência em fração fina.

Foram realizados ensaios de massa específica, massa unitária, índice de vazios e módulo de finura. A massa unitária foi feita com base na norma NBR 7251 (1982) adaptada para ambas as escórias; a massa específica foi determinada pela norma NBR NM 52 (2003). O módulo de finura foi determinado mediante a norma 7211 ABNT (2005) a fim de determinar a grossura da amostra.

As análises mineralógicas por difração de raios-X foram realizadas pelo método do pó, usando o difratômetro da Bruker D2Phaser, da UFOPA, com tubo de cobre, $\lambda=1,5406\text{\AA}$ com faixa angular de varredura entre 4 e 65° (2 θ). A identificação de fases foi realizada através do software HighScore plus da Panalytical e fichas PDF-2 (*Powder Diffraction File*).

As análises químicas foram realizadas por fluorescência de raios-X (FRX) usando o espectrômetro Bruker S2 Ranger, em pastilhas prensadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a sua origem, de aciaria ou de alto-forno, as escórias diferenciam-se em sua composição e assim apresentam tonalidades de cores diferentes (Fig. 1 e 2). A escória de aciaria possui uma tonalidade cinza escura, devido ser constituída basicamente por ferro e carbono, já as escórias de alto-forno as cores variam de preto, cinza e verde em razão dos fundentes e aditivos incorporados dentro do alto-forno.

A distribuição granulométrica, mostrada na figura 3, tanto para as escórias de aciaria, quanto para as de alto-forno de Marabá mostraram tamanhos diferenciados entre as amostras. Para 80% passante a escória EA tem tamanho de grão na faixa de 10,5mm, mais grosseira que a EAF na faixa de 4mm. Para um 50% passante, a EA tem 7mm e a EAF 1,5mm. As curvas mostram que a escória de aciaria é mais grosseira que a de alto forno. Os tamanhos de grão variam desde 14mm ate 0,15mm. O agregado miúdo segundo a NBR 7211 (2005) corresponde entre 4,75mm e 0,15 mm e o agregado graúdo é de 75mm a 4,75mm usados para concreto, assim a escória de alto-forno poderia ser usado como agregado miúdo pois um 90% passante é < 4,75mm, entretanto a escória de aciaria poderia ser usada como agregado graúdo, pois apenas 60% retido corresponde a tamanhos >4,75mm. Este resultado, comparado com os ensaios granulométricos feitos por Santos (2013), é diferente. Santos (2013) determinou que a escória de alto-forno poderia ser usada como agregado graúdo em concreto.

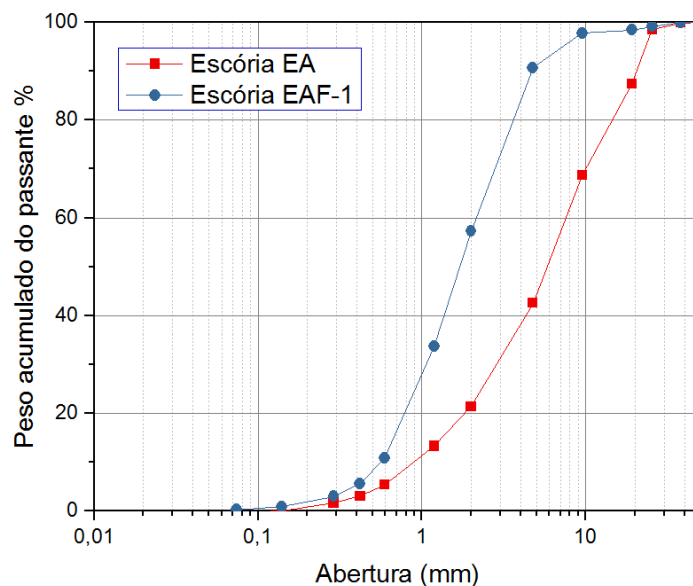


Figura 3. Distribuição granulométrica das escórias de Aciaria e de alto-forno de Marabá.

A escória de alto-forno do Maranhão tem como fração retida tamanhos maiores que 0,075mm, correspondente a 97% da amostra.

Os resultados de massa específica, massa unitária, índice de vazios e módulo de finura estão organizados na Tabela 3, e estão dentro das margens da norma DNER (1994).

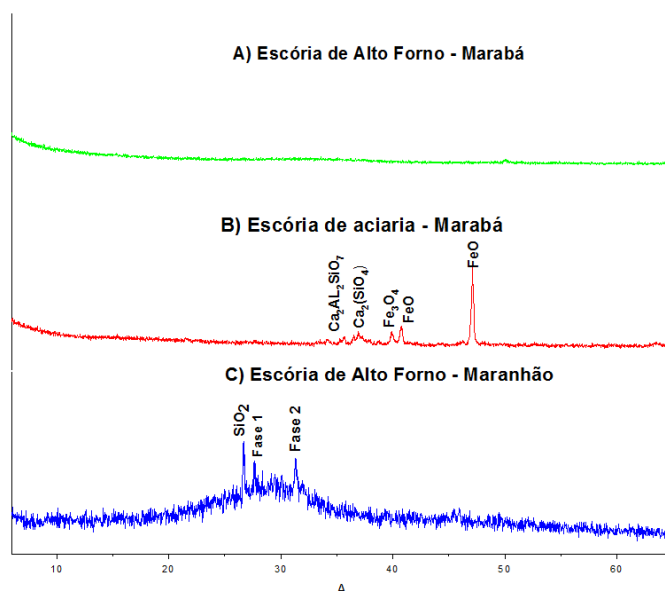
Tabela 3. Resultado das análises de Massa Específica, Massa Unitária e Índice de Vazios das Escórias

	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)	Índice de Vazios (%)	Módulo de finura
Escória de Alto Forno/PA	2,54	1,24	49	5,59
Escória de Alto Forno/MA	2,87	1,01	65	np
Escória de Aciaria/PA	3,73	2,17	58	4,07

Np= Não processado

Como podem ser observados na tabela 3, os valores relativos de massa específica e da massa unitária da EA são maiores que as de EAF. Isto é devido ao fato da diferença de processo produtivo assim como da composição química. As massas específicas e unitárias das escórias de alto-forno de Marabá e Maranhão são semelhantes. O módulo de finura das escórias de EAF e EA de Marabá resultou em 5,59 e 4,07 respectivamente. A EAF-2 não foi submetida a ensaios de granulometria devido ao seu processamento prévio na usina por moinhos de bolas, ocasionando uma finura homogênea.

A análise mineralógica das escórias de alto forno (EAF), tanto da siderúrgica do Pará quanto a do Maranhão, diferem na sua composição mineralógica, a EAF de Marabá possui fases amorfas (Figura 4a), entretanto a de Maranhão além de amorfa mostra fases cristalinas de SiO₂, Ca₂Mg(Si₂O₇), (Ca_{0.742}Fe_{0.087})(Mg_{0.016}Al_{0.888}Fe_{0.075}) (Al_{0.5}Si_{1.5})O₆ (Figura 4c). A escória da aciaria do Pará mostrou fases cristalinas FeO, Fe₃O₄, Ca₂(SiO₄) e Ca₂Al₂SiO₇ (Figura 4b).



Fonte: O autor (2019)

Figura 4. Difratomogramas de raios-X: A) Escória de alto-forno Marabá; B) Escória de aciaria de Marabá e C) Escória de Alto Forno do Maranhão.

Fase 1:Ca₂Mg(Si₂O₇), Fase 2: (Ca_{0.742}Fe_{0.087})(Mg_{0.016}Al_{0.888}Fe_{0.075}) (Al_{0.5}Si_{1.5})O₆

Os resultados das análises químicas feitas por FRX, apresentados na tabela 2 mostram predominância dos componentes Si e Ca, seguida de Al, Mg, Mg, Fe e Mn, confirmando os dados mineralógicos obtidos por DRX.

Tabela 2. Resultado das análises químicas das escórias por FRX

	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)
EAF-1	39.4	31.5	12.6	5.30	2.26	5.11
EAF-2	40.2	36.2	10.6	4.83	3.79	1.52
EA	11.8	25.7	4.37	4.17	43.3	6.22

As escórias de alto-forno do Pará e Maranhão, demonstraram composição química semelhante, exceto enquanto ao MnO. Isto mostra processos semelhantes na produção de escórias. As EAF estão compostas principalmente por SiO₂, CaO e Al₂O₃ com menores quantidades de MgO e Fe₂O₃. Na EA predomina o FeO com menores quantidades Al₂O₃ e MnO. Na escória de aciaria os componentes que predominam são Fe₂O₃, CaO e SiO₂ com menores quantidades de Al₂O₃ e MgO e MnO que prova que são utilizados mecanismos de processos diferentes para as escórias, como composição de fudentes, sínter e pelotas a fim de manter acidez ou basicidade necessária para a produção de aço, assim como variação de composição decorrente da geografia das escórias de alto forno listadas na tabela 2.

O índice de basicidade $BI = W_{CaO} / W_{SiO_2}$, na definição de ácido/base de G, N, Lewis (Ferraro, 2014) para a EAF-1 e EAF-2 são 0,79 e 0,90, para EA é 2,17, respectivamente. Segundo Nkinamubanzi et al. (1998, apud PIMENTEL, 2017) escórias maiores a 1 são básicas e menores são ácidas. Nas amostras são definidas que a razão de óxido de cálcio por óxido de silício deve ser maior do que 1 (módulo de basicidade $M_b > 1$), ou seja, levando em consideração as escórias de alto forno em estudo, ambas são apontadas como ácidas é determinada como básica.

A basicidade das Escórias de Alto forno, com grau de acidez poderia ser prejudicial na aplicação em concreto ou argamassa por aumentar ainda mais o traço dos componentes básicos para a neutralização da reação. Porém, o viés econômico em substituição aos agregados naturais, ainda torna as EAFs pertinentes para tais aplicações. As amostras de escória do Pará e do Maranhão aqui estudadas foram das amostras fornecidas pelas indústrias e não sofreram nenhum tipo de operação unitária (cominuição) no laboratório, o que permite uma aplicação ainda mais sustentável pois algum tipo de processo de cominuição poderia gerar custos, o que elevaria o preço do seu uso.

A EAF de Marabá é caracteristicamente considerada como granulada em detrimento de sua morfologia e granulometria, o que segundo as condições gerais da norma DNER (1994) a torna apta a ser considerada um agregado miúdo para pavimentação rodoviária sob a determinação de testes em laboratórios. Assim como também para escória de aciaria a qual

tem seus aspectos muitos semelhantes ao que a norma se refere, porém com necessidade de passar por cominuição ou fazer análises como agregado graúdo.

Enquanto a EAF do Maranhão, Carneiro (1999) afirma que a continuidade de granulometria de agregados finos passantes na peneira 0,15 mm é importante para redução do consumo de água, onde chegou a conclusão que argamassas com essas características são aprimoradas em estado fresco e endurecido.

4. CONCLUSÕES

Os ensaios granulométricos das escórias de alto-forno e de aciaria mostraram a viabilidade da utilização das mesmas, como agregado miúdo e graúdo para construção civil, pois, estão de acordo com a norma vigente, para este tipo de uso.

As escórias de alto forno mostraram predominância das fases amorfas, mascarando fases cristalinas minoritárias de SiO_2 , $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$, $(\text{Ca}_{0,742}\text{Fe}_{0,087})(\text{Mg}_{0,016}\text{Al}_{0,888}\text{Fe}_{0,075})(\text{Al}_{0,5}\text{Si}_{1,5})\text{O}_6$, entretanto a de aciaria mostrou fases como FeO , Fe_3O_4 e Ca_2SiO_4 e $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$.

Através da comparação relativa à basicidade entre as escórias de alto-forno e a de aciaria, em que ambas são ácidas, o que não proporciona a capacidade aglomerante, podendo ser utilizada como agregado para concreto, pavimentação e lastro de vias férreas.

As análises de Massa Específica, Massa Unitária e Índice de Vazios mostraram valores relativos às escórias de alto-forno maiores que o das EAF, provavelmente em razão da diferença de processos produtivos e da composição química.

Os tamanhos de grão das escórias indicam que podem ser usados para diversas finalidades de agregados como a construção civil por exemplo, porém a química, sugere que precisa de outros aditivos para torná-la viável em aplicações mais restritas, o que poderia proporcionar um acréscimo de custo em sua aplicação.

5. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Prof. Dr. Bruno Apolo Miranda pelas análises por DRX. O primeiro autor agradece ao IFPA/CNPQ pela concessão de bolsa PIBIC.

6. REFERÊNCIAS

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Centro de Gestão e Estudo Estratégico. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico. Relatório de Situação (Fase 1). Brasília, 2008.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 7251: Agregado em estado solto: Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

Athayde Junior, JDG. Otimização da Injeção do Gás Inerte no Convertedor MRP-L. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

Carneiro, AMP. Contribuição ao estudo da influência do agregado as propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas. [Tese de Doutorado]. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. DNER-EM 260/94: Escória de alto forno para pavimentos rodoviários, 1994.

Ferraro, BB. 2.1. Basicidade. *In*: FERRARO, Bruno Bertelli. Estudo das Propriedades Termofísicas de Escória Metalúrgica e de Escórias Sintéticas de CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO. [Trabalho de Conclusão de Curso]. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo; 2014.

Freitas, Suzy Magaly Alves Cabral. Escória de Aciaria: Caminhos para uma Gestão Sustentável. [Tese de Doutorado]. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2018.

Ilyushechkin, A. Y.; Roberts, D. G.; French, D.; Harris, D. J. IGCC Solids Disposal and Utilisation, Final Report for ANLEC Project 5-0710-0065. CSIRO, Australia; 2012.

John, V M, Agopyan, V. Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo; 2014.

Kalyoncu, Rustu S. SLAG—Iron And Steel. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, 2000.

Pimentel, MG, Vasconcelos ALR, Picanço MS, Souza JVB, Macêdo NA. Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. Brazilian Applied Science Review. v.3, n. 2, p. 895-907. Curitiba; 2019.

Ramos, FM, Polisseni, AE, Freesz, JWS. Gestão ambiental da escória de Aciaria. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/gestao-ambiental-da-escoria-de-aciaria>>. Acesso em: 30.05.19.

Santos, PB. Estudo da utilização de escória de alto forno como agregado graúdo em concretos fabricados em Marabá. Universidade Federal do Pará. Campus de Marabá, Marabá; 2013.