

CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO PROVENIENTE DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS VISANDO SEU USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

**MAURÍLIO GOMES PIMENTEL^{1*}, ADRIANO LUIZ ROMA VASCONCELOS²
MARCELO DE SOUZA PICANÇO³, JOSÉ VICTOR BRASIL DE SOUZA⁴, ALCEBÍADES NEGRÃO MACÊDO⁵**

¹Eng. Civil. Mestrando PPGEC, UFPA, Belém-PA, mauriliogp@ufpa.br;

²M.e. em Construção Civil PPGEC, UFPA, Belém-PA, adrianoromapa@hotmail.com;

³Dr. em Geologia e Geoquímica, Prof. ITEC, UFPA, Belém-PA, marcelosp@ufpa.br;

⁴Graduando em Eng. Civil, ITEC, UFPA, Belém-PA, josevictor002@hotmail.com;

⁵Dr. em Eng. de Estruturas, Prof. Associado IV, ITEC, UFPA, Belém-PA, anmacedo@ufpa.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2017
8 a 11 de agosto de 2017 – Belém-PA, Brasil

RESUMO:

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar química, mineralógica e fisicamente uma escória de alto forno resfriada lentamente. Para isso foram realizados os ensaios de massa específica e unitária, índice de vazios, bem como a caracterização química e mineralógica da escória de alto forno (EAF) da Siderúrgica Norte Brasil S.A. Os resultados mostraram que a EAF possui uma massa específica semelhante ao dos cimentos devido em especial a sua composição química e mineralógica. Da mesma forma a EAF apresentou predominância de óxidos de silício (SiO_2), cálcio (CaO) e alumínio (Al_2O_3), bem como em sua mineralogia predominância de quartzo, calcita e hematita. Além disso a EAF apresenta-se como um material inerte, podendo ser utilizado dessa forma, como material suplementar ao agregado natural para a produção de concretos e argamassas.

PALAVRAS-CHAVE: Escória de alto forno, caracterização, adição mineral.

CHARACTERIZATION OF HIGH FURNACE SLAG FROM INDUSTRIAL WASTE AIMING ITS USE IN CONSTRUCTION

ABSTRACT: The present work aims to characterize chemically, mineralogically and physically a blast furnace slag slowly cooled. (EAF) of Siderúrgica Norte Brasil SA The results showed that EAF has a specific mass for both types of cement Due to its chemical and mineralogical chemistry. Likewise, an EAF has a predominance of silicon oxides (SiO_2), calcium (CaO) and aluminum (Al_2O_3), as well as its predominant mineralogy of quartz, calcite and hematite. In addition, EAF is an inert material and can therefore be used as a complementary material for the natural aggregate for the production of concrete and mortar.

KEYWORDS: Blast furnace slag, characterization, mineral addition.

INTRODUÇÃO

As usinas siderúrgicas integradas utilizam basicamente ar, água, combustível, energia e minério de ferro como materiais para a produção de aço. Durante a produção de aço, cerca de 2 a 4 toneladas de resíduos vem sendo geradas para cada tonelada de aço produzido (DAS et al., 2007). Somente no Brasil o setor siderúrgico gerou cerca de 594 Kg de resíduos por tonelada de aço produzido no ano de 2013 (IBS, 2014), sendo que a produção do aço para o mesmo ano foi de 34,2 milhões de toneladas (IAB, 2013), desses resíduos 37% são de escória de alto forno (EAF), representando a maior parcela de geração de coprodutos e resíduos desse setor.

A escória de alto forno é um produto gerado na fabricação do ferro gusa, sua formação ocorre pela combinação química das impurezas do minério de ferro com calcário e dolomita e as cinzas de carvão mineral, durante a produção do ferro gusa a EAF flutua no topo do ferro fundido, localizado na parte inferior do forno, dessa forma, protegendo o mesmo de se reoxidar por meio do jato de ar quente que funde através do forno, durante o reaproveitamento do forno, o ferro fundido e a escória são

separados, enquanto o ferro é fluído em moldes de ferro gusa para fabricação do aço, a escória é direcionada em grandes recipientes, em seguida despejada dos mesmos. Durante o despejo da escória é feito o resfriamento da mesma. É nesse processo de resfriamento que é gerado os diferentes tipos de escória (ZEGHICHI, 2006).

A EAF é normalmente produzida de duas formas, que dependem da técnica de resfriamento, podendo ser com a ajuda de jatos de água (resfriada rapidamente) ou ao ar (resfriada lentamente). Após passar pelo processo de resfriamento, já no estado solidificado a EAF mantém sua composição química inalterada, mas suas propriedades físicas e reativa variam amplamente com a mudança no processo de resfriamento (DINA, 2014).

Quando a EAF é resfriada rapidamente de forma brusca com a utilização de jatos de água, há sua solidificação numa forma granular e amorfa. A EAF resfriada rapidamente consiste em um material amorfo de silicatos de Ca-Mg- Al, com uma estrutura celular basicamente não cristalina, que após moída com uma finura adequada, pode ser amplamente utilizada como material complementar na fabricação de cimento (ÖZBAY et al., 2016).

Por outro lado, quando a EAF é resfriada lentamente ao ar em condições ambientes, há sua solidificação em um material cristalino de coloração cinza e rígido. Um sólido basicamente estável que é composto de silicatos cristalizados, especialmente gehlenite (C_2AS) e akermanite (C_2MS_2). Assim, a EAF resfriada lentamente não tem ou possui poucas propriedades pozolânicas.

Apesar da EAF resfriada lentamente ser relatada com predominância da sua estrutura como sólido cristalino estável, a sua fração amorfa depende basicamente da sua acidez (DAUGHERTY et al., 1983), algumas EAF resfriada lentamente podem apresentar de 30-50% em massa de fases amorfas (DAUGHERTY et al., 1983). Da mesma forma Talling & Krivenko (1996) mostra a formação de estrutura amorfa formada por EAF resfriada lentamente, e que essas estruturas dependem da quantidade de alumínio. Esses resultados têm estimulados os estudos das propriedades da EAF resfriada lentamente. Por conta disso, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar química, mineralógica e fisicamente uma escória de alto forno resfriada lentamente.

MATERIAIS E MÉTODOS

A EAF utilizada no presente trabalho foi coletada na Siderúrgica Norte Brasil S.A. (SINOBRAS) conforme NBR 10007 (ABNT, 2004). Sua peculiaridade está no resfriamento da escória, por esta ser resfriada lentamente ao ar. Após a coleta o material passou por um processo de britagem em um britador de mandíbulas para redução de sua granulometria, em seguida a escória passou por um processo de moagem para obtenção de uma granulometria inferior a 75 μm para os experimentos a serem realizados.

Foram utilizados também como material nesse trabalho o cimento Portland CII F – 32 com massa específica de 3020 Kg/m^3 , hidróxido de cálcio com massa específica de 2560 Kg/m^3 , areia normal com massa específica 2530 Kg/m^3 e água potável com temperatura de 28°C e pH 6.

Antes de cada ensaio, as amostras de EAF após sua moagem eram armazenadas em estufa em temperatura de 100°C até obter constância de massa. Após alcançar constância de massa eram expostas em ambiente de laboratório em temperatura de 28°C por um período de 24 horas.

O primeiro experimento, foi para verificação da finura da EAF conforme a NBR 11579 (ABNT, 2012), isso foi realizado para verificar a necessidade do tempo de moagem necessário para obter a finura necessária para os experimentos a serem realizados no presente estudo. O experimento de finura mostrou que a escória após 5 horas de moagem apresentava um índice de finura (IF) de 9,56%. Por isso foi realizado um ensaio de massa específica conforme NBR NM 23 (ABNT, 2001) e massa unitária de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A EAF foi analisada quanto a sua mineralogia em um difratômetro de raios-X com faixa angular de varredura entre 4° e 65° (2 θ) e voltagem de 40kV, com tamanho de 0,02 (2 θ) e 2s de passo. Também foi analisada a composição química por espectrometria de fluorescência de raios-X.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise das propriedades físicas (Tabela 1), a EAF apresentou um índice de vazios inferior ao das areias naturais para a produção de concretos e argamassas (SHEN et al., 2016) da mesma forma a EAF ainda sim apresentou um índice de finura superior a maioria dos cimentos (IF = 9,56). A massa específica da escória de alto forno está bem acima dos agregados naturais geralmente utilizado na construção civil (NEVILLE, 2013) e de outros resíduos utilizados como material suplementar para a

produção de cimento Portland (PARIS et al., 2016), o valor da massa específica está próximo ao de cimentos Portland (HEWLETT, 2003).

Tabela 1 – Propriedades físicas Da escória de alto forno. Número de repetições (N) = 3.

-	Massa específica (Kg/m ³)	Massa Unitária (Kg/m ³)	Índice de Vazios (%)
Média	3060	1600	47,71
Desvio padrão	20	12	0,75

O valor de massa específica apresentado está diretamente relacionado com a composição química (Tabela 2) e mineralógica (Figura 1) da EAF. No experimento de fluorescência de raios-X, a EAF em estudo apresentou predominância em sua composição química dos óxidos de silício (SiO₂), cálcio (CaO) e alumínio (Al₂O₃). Sua composição química é altamente dependente dos minérios encontrado na escória de alto forno, normalmente sílica, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio somam mais de 95% da composição química da escória de alto forno (ÖZBAY et al., 2016).

Tabela 2 – Caracterização química da escória de alto forno. Valores expressados em (%).

Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂
15,10	35,00	0,96	1,12	2,34	4,90	0,31	0,03	0,38	39,00	0,86

A composição química da EAF apresentada nesse estudo não foge dos padrões de composição química de escórias em diferentes cantos do mundo (Tabela 3). A composição química da escória é de grande importância, principalmente para a avaliação de sua reatividade.

A EAF também pode ser analisada quanto ao seu módulo de basicidade (Mb) (NKINAMUBANZI et al., 1998). Quimicamente essa classificação pode ser obtida com a relação do óxido de cálcio por óxido de silício. Nkinamubanzi et al., (1998) menciona que a proporção de óxido de cálcio por óxido de silício deve ser maior do que 1 (Mb > 1) para a escória ser classificada como básica. No presente estudo o Mb foi de 0,89, valor inferior ao limite de classificação da escória como básica. Esse módulo de basicidade se torna ainda menor quando é levado em consideração na relação os óxidos de magnésio (MgO) e de alumínio (Al₂O₃) (YUAN et al., 1983) resultando em Mb = 0,69. Classificando dessa forma a escória do presente estudo como ácida, o que inviabiliza sua utilização como adição na produção de cimento para confecção de concretos e argamassas, possibilitando dessa forma a utilização da escória como agregado para a produção de concretos e argamassas.

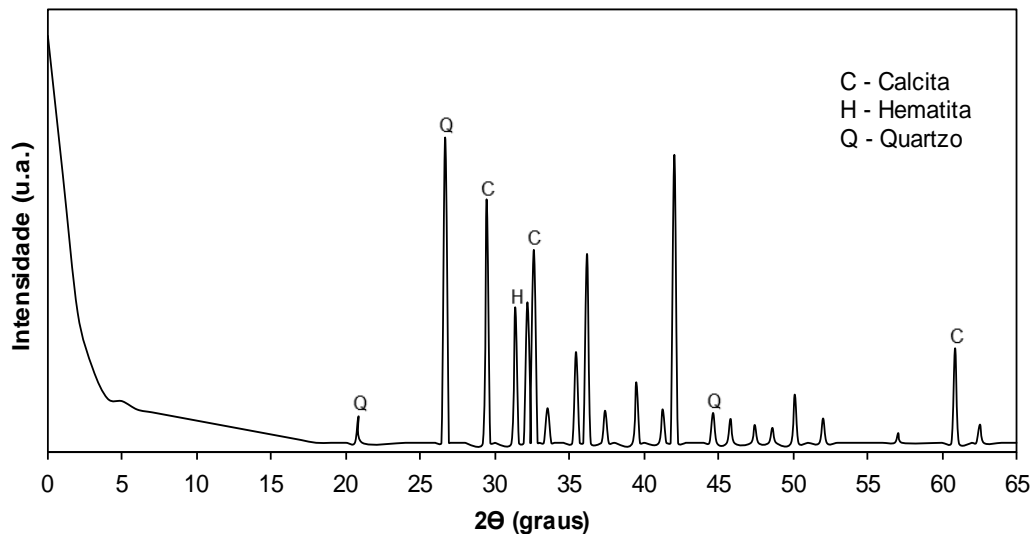
Vale ressaltar que a identificação da basicidade da EAF é relevante em especial para a caracterização da sua reatividade, pois a reatividade da escória é dependente de sua basicidade, quanto mais básica for a escória, maior será a sua reatividade (ÖZBAY et al., 2016), principalmente na presença de ativadores alcalinos.

Tabela 3 – Composição química típica da escória de alto forno produzidas em diferentes países (ÖZBAY et al., 2016).

Países	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	SO ₃
EUA	29-50	30-40	7-18	0,1-1,5	0-19	0,2-1,5	-
África do Sul	30-40	30-36	9-16	-	8-21	-	0
Peru	34-41	34-36	13-19	0,3-2,5	3,5-7	1-2,5	-

Quanto a análise por difração de raios-X, a EAF aqui estudada apresentou uma estrutura predominantemente cristalina, mostrando a presença de inúmeros picos de difração (Figura 1), embora esta ainda apresente um discreto halo de amorfização. Esses picos de difração corroboram com a ideia de que, em virtude de resíduo industrial serem depositado ao ar livre para o seu resfriamento, gera associações entre os átomos segundo as próprias afinidades, em cristais, fato denominado cristalização (FUJIYAMA, 2012). Além disso há a verificação da predominância do mineral quartzo e calcita, bem como a presença de hematita em sua análise de DRX.

Figura 1– Análise da estrutura cristalina da escória de alto forno por difração de raios-X (DRX). Os padrões de DRX da EAF foram os picos de exposição principal em 26,4°, 29,4° e 33,11° que pode ser atribuído aos planos (101), (104) e (012), correspondente ao quartzo, calcita e hematita, respectivamente.



A análise de DRX da escória, mostra que quando a escória passa por um processo de resfriamento lento em condições ambientes, há sua solidificação em um material cristalino de coloração cinza. Esse sólido consiste em silicatos cristalizados (Ca-Mg-Al). Apesar da EAF resfriada lentamente apresentar uma estrutura predominantemente cristalina, suas propriedades aglomerantes ainda podem ser exploradas (MOSTAFA et al., 2001), pois as condições de resfriamento da EAF não é o único fator que determina sua atividade pozolânica (DEMOULIAN et al., 1983).

Esses experimentos permitem classificar a escória como um material predominantemente inerte, possuindo propriedades semelhante ao de agregados utilizados na construção civil (KALALAGH et al., 2005), que após britagem e separação granulométrica pode ser utilizada como substituto do agregado natural para confecção de concretos (BESHR et al., 2003).

CONCLUSÕES

O presente estudo investigou a caracterização física, química, mineralógica e as propriedades pozolânicas da EAF. Após análise e discussão dos resultados conclui-se aqui que:

- A EAF possui uma massa específica semelhante ao dos cimentos devido em especial a sua composição química e mineralógica.
- A EAF apresentou predominância de óxidos de silício (SiO_2), cálcio (CaO) e alumínio (Al_2O_3). Bem como em sua mineralogia predominância de quartzo, calcita e hematita.
- Além disso a EAF apresenta-se como um material inerte, podendo ser utilizado dessa forma, como material suplementar ao agregado natural para a produção de concretos e argamassas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a equipe do Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), por ajudar na análise da composição química da EAF. A Kelly Silva Oliveira do Laboratório de Difração de Raios-X do Programa de Pós-Graduação em Física da UFPA pela ajuda na análise e identificação dos minerais presente na EAF.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. NBR 45. Rio de Janeiro. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostragem de resíduos sólidos. NBR 10007. Rio de Janeiro. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm . NBR 11579. Rio de Janeiro. 2013.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. NBR NM 23. Rio de Janeiro. 2001.
- BESHR, H.; ALMUSALLAM, A. A.; MASLEHUDDIN, M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, v. 17, p. 97-103, 2003.
- DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, R. S. P.; MISRA, V. N. Na overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, p. 40-57, 2007.
- DAUGHERTY, K. E.; SAAD, B.; WEIRICH, C.; EBERENDU, A. The glass content of slag and hydraulic activity. *Silicates Industriels*, v. 4, p. 107-110, 1983
- DEMOULIAN, E.; GOURDIN, P.; HAWTHORN, F.; VERNET, C. Influence of slags chemical composition and texture on their hydraulicity, 7^o International Congress on the Chemistry of Cement. Paris, 1980.
- DINA, M. S. Effect of cooling technique of blast furnace slag on the thermal behavior of solid cement bricks. *Journal of Cleaner Production*, v. 79, p. 134-141, 2014.
- FUJIYAMA, K. Crystallographic observation and delamination damage analyses for thermal barrier coatings under thermal exposure. In: BORISENKO, E. *Crystallization and materials Science of modern artificial and natural crystals*. Intech, 2012. Cap. 1, p.1-21.
- HEWLETT, P. C. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier. Burlington, 2003.
- IAB – Instituto Aço Brasil. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp?par=201312>>. Acesso em: 26 de abril de 2016.
- IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia, SIDERURGIA BRASILEIRA – Relatório de Sustentabilidade 2014, Conceção AMCE Negócios Sustentáveis, 2014.
- KALALAGH, A.; MARANDI, S.; SAFAPOUR, P. Technical effects of air cooled blast furnace slag on asphalt mixtures. Disponível em: <http://www.sid.ir/en/viewssid/j_pdf/100620050301.pdf>. Acesso em: 14 de Maio de 2016.
- MOSTAFA, N. Y.; EL-HEMALY, S. A. S.; AL-WAKEEL, E. I.; EL-KORASHY, S. A.; BROWN, P. W. Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 899-904, 2001.
- NEVILLE, A. M. *Tecnologia do concreto*. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- NKINAMUBANZI, P. C.; BAALBAKI, M.; BICKLEY, J.; AITCIN, P. C. The use of slag for making high performance concrete, 6^o NCB International Seminar on Cement and Building Materials. NBC, 1998.
- ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUS, H. I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction and Building Materials* v. 105, p. 423-434, 2016.
- PARIS, J. M.; ROESSIER, J. G.; FERRARO, C. C.; DEFORD, H. D.; TOWNSEND, T. G. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 121, p. 1-18, 2016.
- PIATAK, N. M.; PARSONS, M. B.; SEAL, R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: a review. *Applied Geochemistry*, v. 57, p. 236-266, 2015.
- QIAN, J.; SHI, C. High performance cementing materials from industrial slags – a review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 29, p. 195-207, 2000.
- SHEN, W.; YANG, Z.; CAO, Z.; CAO, L.; LIU, Y.; YANG, H.; LU, HUI.; LU, Z.; BAI, J. Characterization of manufactured sand: Particle shape, surface texture and behavior in concrete. *Construction and Building Materials* v. 114, p. 595-601, 2016.
- TALLING, B.; KRIVENKO, P. Blast furnace slag-the ultimate binder. In: CHARDRA, S. *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*. William Andrew, 1996. Cap. 5, p. 235-289.
- ZEGHICHI, L. The effect of replacement of natural aggregates by slag products on the strength of concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, v. 7, p. 27-35, 2006.
- YUAN, R.; OUYANG, S.; GAO, Q. Structure and hydraulic activity of slags in the system $\text{CaO} \pm \text{MgO} \pm \text{Al}_2\text{O}_3 \pm \text{SiO}_2$. *Silicates Industriels*, v. 1, p. 3-6, 1983.