Brazilian Applied Science Review

Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil

Characterization of blast furnace slag from industrial waste aiming its use in construction

Recebimento dos originais: 07/11/2018
Aceitação para publicação: 10/12/2018

Maurílio Gomes Pimentel
Mestrando em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Pará
Endereço: Rua Augusto Corrêa – n° 01 66075-110 – Belém – Pará
E-mail: mauriliogp@ufpa.br

Adriano Luiz Roma Vasconcelos
Mestre em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Pará
Endereço: Rua Augusto Corrêa – n° 01 66075-110 – Belém – Pará
E-mail: adrianoromapa@hotmail.com

Marcelo de Souza Picanço
Doutor em Geologia e Geoquímica
Instituição: Universidade Federal do Pará
Endereço: Rua Augusto Corrêa – n° 01 66075-110 – Belém – Pará
E-mail: marcelosp@ufpa.br

José Victor Brasil de Souza
Mestrando em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Pará
Endereço: Rua Augusto Corrêa – n° 01 66075-110 – Belém – Pará
E-mail: josevictorbrasil002@gmail.com

Alcebíades Negrão Macêdo
Doutor em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Pará
Endereço: Rua Augusto Corrêa – n° 01 66075-110 – Belém – Pará
E-mail: anmacedpo@ufpa.br

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.

ABSTRACT

The present paper aims to characterize chemically, mineralogically and physically a slowly cooled blast furnace slag. Therefore, we determined the specific and unit weight, such as the void index, we also realized the chemical and mineralogical characterization of the blast furnace slag (BFS) of the Siderúrgica Norte Brasil SA. The results showed that the BFS has similar specific weight results for both types of cement due to its chemical and mineralogical composition. Likewise, the BFS has a predominance of oxides of silicon (SiO2), calcium (CaO) and aluminum (Al2O3), as well as predominance of quartz, calcite and hematite in its mineralogy. In addition, BFS is an inert material and, for that reason, it can be used as a complementary material to the natural aggregate for the concrete and mortar production.

Keywords:. Blast furnace slag, characterization, mineral addition.

1 INTRODUÇÂO

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 (GRUEN, 1921), 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 (FLEISSNERN, 1912), 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 (GRUEN, 1921). 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 mantem 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 (SHI; QIAN, 2000), que após moída com uma finura adequada, pode ser amplamente utilizada como material complementar na fabricação de cimento (SAADE; SILVA; GOMES, 2015; ÖZBAY; ERDEMIR; DURMUS, 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) (SHI; QIAN, 2000). Assim, a EAF resfriada lentamente não tem ou possui poucas propriedades pozolânicas, mas apresenta propriedades semelhante ao de agregados utilizados na construção civil (KALALAGH; MARANDI; SAFAPOUR, 2005), que após britagem e separação granulométrica pode ser utilizada como substituto do agregado natural para confecção de concretos (BESHR; ALMUSALLAM; MASLEHUDDIN, 2003).

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; YUAN; OUYANG; GAO, 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 (WANG; XIE, 1980; SHARMA et al., 1997). Por conta disso, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar química, mineralógica e fisicamente uma escória de alto forno resfriada lentamente, bem como avaliar sua atividade pozolânica com a cal e com o cimento Portland, e analisar seu potencial uso na construção civil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

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 CPII F – 32 com massa específica de 3020 Kg/m³, hidróxido de cálcio com massa específica de 2560 Kg/m³, areia normal com massa específica 2530 Kg/m³ e água potável com temperatura de 28ºC e pH 6.

2.2 MÉTODOS

Antes de cada ensaio, as amostras de EAF após sua moagem eram armazenadas em estufa em temperatura de 100ºC até obter constância de massa. Após alcançar constância de massa eram expostas em ambiente de laboratório em temperatura de 28ºC 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 4º e 65º (2Θ) e voltagem de 40kV, com tamanho de 0,02 (2Θ) e 2s de passo. Também foi analisada a composição química por espectrometria de fluorescência de raios-X. Além desses ensaios foi realizado outros dois experimentos para verificar seu índice de atividade pozolânica, para isso efetuou-se um experimento de atividade pozolânica com a cal NBR 5751 (ABNT, 2015) e com cimento NBR 5752 (ABNT, 2014).

2.3 ANÁLISE DOS DADOS

Para os experimentos de pozolanicidade com a cal e cimento, aplicou-se um teste de Shapiro-Wilk que mostrou que as amostras foram derivadas de populações que seguem distribuições normais. Um teste de Levene mostrou que as variâncias são homogêneas para o mesmo experimento. Por isso foi aplicado o teste T de Student para amostras independentes quando havia até duas condições experimentais. Foram consideradas diferenças estatísticas quando $P<0,05$. Para os demais experimentos não houve utilização de métodos estatísticos para determinar previamente o tamanho das amostras e os mesmos não foram randomizados. Os investigadores não estavam cegos à alocação dos dados durante os experimentos e avaliação dos resultados.

3 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/m³)**	**Massa Unitária (Kg/m³)**	**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 (SiO_2), cálcio (CaO) e alumínio (Al_2O_3). 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; ERDEMIR; DURMUS, 2016).

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

Al_2O_3	**CaO**	**Fe_2O_3**	**K_2O**	**MgO**	**MnO**	**Na_2O**	**P_2O_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 (M_b) (NKINAMUBANZI et al., 1998). Quimicamente essa classificação pode ser obtida com a relação do óxido de cálcio por óxido de silício (Equação 1). NKINAMUBANZI et al., (1998) menciona que a proporção de óxido de cálcio por óxido de silício deve ser maior do que 1 ($M_b > 1$) para a escória ser classificada como básica. No presente estudo o M_b 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 (Al_2O_3) (YUAN; OUYANG; GAO, 1983; Equação 2) resultando em $M_b = 0,69$. Classificando dessa forma a escória do presente estudo como ácida, o que inviabiliza sua utilização como adição na produção de concretos e argamassas, possibilitando dessa forma a utilização da escória como agregado para a produção de concretos e argamassas.

$$Mb = \frac{[CaO]}{[SiO2]} \qquad \text{(Equação 1)}$$

$$Mb = \frac{[CaO + MgO]}{[SiO2 + Al2O3]} \qquad \text{(Equação 2)}$$

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; ERDEMIR; DURMUS, 2016), principalmente na presença de ativadores alcalinos (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003).

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

Países	**CaO**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_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.

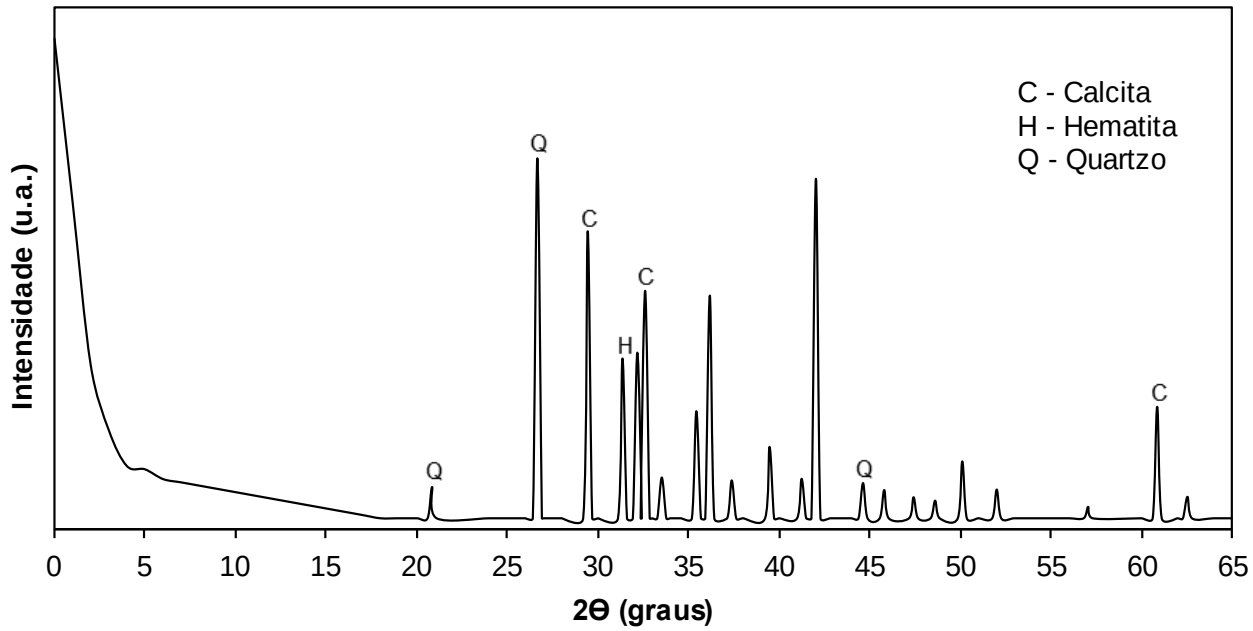

Figura 1– Análise da estrutura cristalina da escória de alto forno por difração de raios-X (DRX). Os padrões de DRX da EAF foram os picos de exposição principal em 26,4º, 29,4º e 33,11º que pode ser atribuído aos planos (101), (104) e (012), correspondente ao quartzo, calcita e hematita, respectivamente.

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) (SHI; QIAN, 2000). 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).

Para a atividade pozolânica da EAF, foram utilizados ensaios que visam o aspecto qualitativo do comportamento da mesma, em vez de aspecto quantitativo da reação da cal com o material em estudo. Para a atividade pozolânica com a cal a escória apresentou valores de resistência à compressão muito inferior da recomendação normativa (teste T de Student para amostra única $t(3)=62,453$, $p<0,001$; Figura 2a). A NBR 12653 (ABNT, 2012) recomenda que o material deve apresentar um valor mínimo de 6 MPa em ensaios de índice de atividade pozolânica com a cal, o que não aconteceu no presente estudo. Ressalta-se que apesar da escória não ter apresentado a resistência recomendada pela norma, isso não indica que ela não possua reatividade, para isso seria necessário realizar ensaios de reatividades diretos e quantitativos como a computação de coeficientes cinéticos das reações (VILLAR et al., 2003; VILLAR et al., 2006).

Já para o índice de atividade pozolânica com o cimento Portland a resistência à compressão das argamassas com os 25% de substituição do cimento por escória foi bem inferior das argamassas de referência (teste T não pareado $t(9)=11,083$; $p<0,001$; Figura 2b).

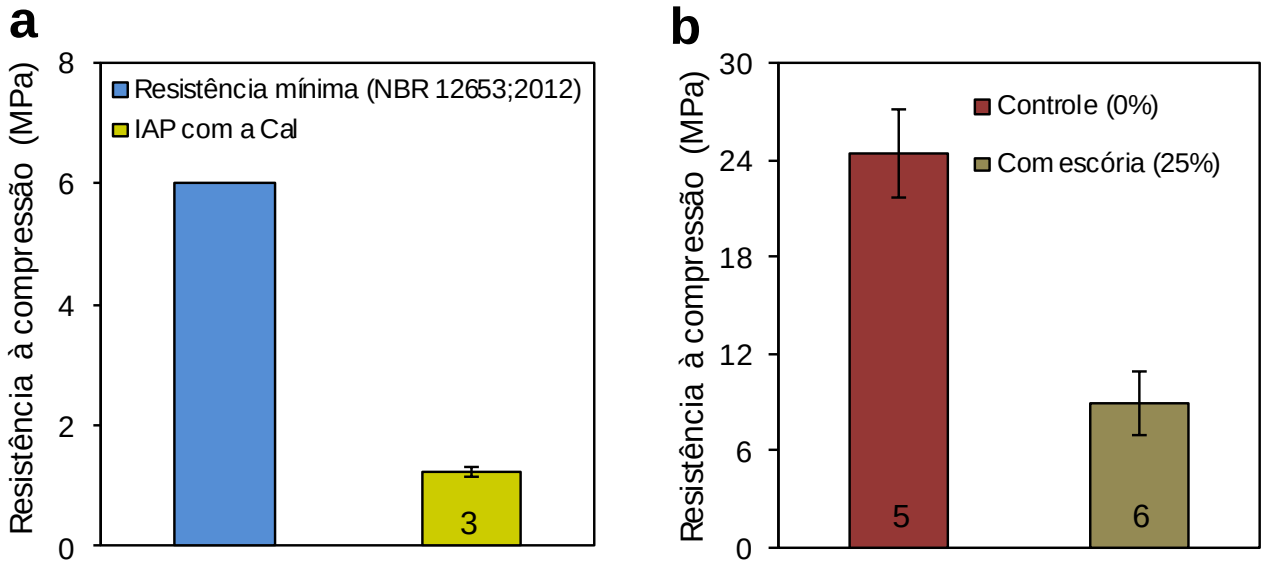

Figura 2 – Avaliação da atividade pozolânica (**a** – atividade pozolânica com a cal. Resistência mínima NBR 12653 (ABNT, 2014); **b** – atividade pozolânica com o cimento) na escória de alto forno. Valores expressados em média ± desvio padrão. Os números de repetições (N) estão representados dentro de cada coluna (teste T não pareado, $p<0,05$).

A EAF por apresentar uma estrutura predominantemente cristalina não apresentou atividade pozolânica nos ensaios de resistências mecânicas com a cal e cimento. Mas a EAF quando resfriada lentamente pode apresentar propriedades semelhantes ao de agregado graúdo (MEHTA; MONTEIRO, 2014), que após a britagem e obtenção do tamanho adequado de agregados, pode ser usada para a produção de concreto asfáltico, lastro ferroviário, bases e sub-bases de estrada bem como para a confecção de concretos (BESHR; ALMUSALLAM; MASLEHUDDIN, 2003; KALALAGH; MARANDI; SAFAPOUR, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

4 CONCLUSÃO

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.

A Escória não apresentou atividade pozolânica nos ensaios mecânicos aqui realizados, o que nos sugere que a mesma não possa ser utilizada como material suplementar em substituição ao cimento Portland, mas sim como agregado na confecção de concretos e argamassas após britagem e beneficiamento de separação granulométrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a equipe do Laboratório de Fluerescência 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 e finalmente a equipe do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA pela ajuda nos ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. **NBR 45**. Rio de Janeiro. 2006.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostragem de resíduos sólidos. **NBR 10007**. Rio de Janeiro. 2006.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm. **NBR 11579**. Rio de Janeiro.
2013.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. **NBR NM 23**. Rio de Janeiro. 2001.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio. **NBR 5751**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais pozolânicos – determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. **NBR 5752**. Rio de Janeiro. 2014.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais pozolânicos — Requisitos. **NBR 12653**. Rio de Janeiro. 2014

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 slang and sludge from steel industries. **Resources, Concervation and Recycling**, v. 50, p. 40-57, 2007.

DAUGHERTY, K. E.; SAAD, B.; WEIRICH, C.; EBERENDU, A. The glass contente 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, **7º International Congresso n the Chemistry of Cement**. Paris, 1980.

DINA, M. S. Effect of cooling technique of blast furnace slag on the termal behavior of solid cement bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 79, p. 134-141, 2014.

FLEISSNERN, H. Blast furnace slag and Its applications – an importante by-product of the iron industry. **Scientific American,** v. 72, p. 386-400, 1912.

FUJIYAMA, K. Crystallographic observation and delamination damage analyses for termal barrier coatings under termal exposure. In: BORISENKO, E. **Crystallization and materials Science of modern artificial and natural crystals**. Intech, 2012. Cap. 1, p.1-21.

GRUEN, R. Blast furnace slag – what It Is, and how It my be used as a building materials. **Scientific American**, v. 125, p. 265-280, 1921.

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**, Concepção AMCE Negócios Sustentáveis, 2014.

KALALAGH, A.; MARANDI, S.; SAFAPOUR, P. **Technical effects o air cooled blast furnace slag on asphalt mistures**. Disponível em: < http://www.sid.ir/en/vewssid/j_pdf/100620050301.pdf>. Acesso em: 14 de Maio de 2016.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

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 anda ir-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, **6º NCB International Seminar on Cement and Bulding 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 rewiew of waste products utilized as supplements to Potland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1-18, 2016.

PIATAK, N. M.; PARSONS, M. B.; SEAL, R. R. Characteristics and evironmental 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, Concervation and Recycling**, v. 29, p. 195-207, 2000.

SAADE, M. R. M.; SILVA, M. G.; GOMES, V. Apropriateness of environmental impact distribution methods to model blast furnace slag recycling in cement making. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 99, p. 40-47, 2015.

SHARMA, K. M.; SHARMA, P. S.; YADAV, D.; AHLUWALIA, S. C. Hydration characteristics of steel slag in ordinary portland cement blends. **10º International Congresso n the Chemistry of Cement**. Gotemburgo, 1997.

SHEN, W.; YANG, Z.; CAO, Z.; CAO, L.; LIU, Y.; YANG, H.; LU, HUI.; LU, Z.; BAI, J. Characterization of manufatured 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.

VILLAR, C. E.; FRÍAS, M.; E. MORALES, V. E.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I. An evaluation of different kinetic models for determining the kinetic coefficients in sugar cane straw-clay ash/lime system. **Advances in Cement Research**, v. 18, p. 17-26, 2006.

VILLAR, C. E.; MORALES, V. E.; RODRIGUEZ, R. G.; RUIZ, H. J. Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: a kinetic-diffusive model. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 517-524, 2003.

WANG, Y.; XIE, G. Research on the mineral phase and its cementituous properties of oxygen converter slag (O.C.S.). **7º International Congresso n the Chemistry of Cement**. Paris, 1980.

YUAN, R.; OUYANG, S.; GAO, Q. Structure and hydraulic activity of slags in the system $CaO \pm MgO \pm Al_2O_3 \pm SiO_2$. **Silicates Industriels**, v. 1, p. 3-6, 1983.

ZEGHICHI, L. The effect of replacement of naturals agregates by slag products on the strength of concrete. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 7, p. 27-35, 2006.