

## **AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS SIDERÚRGICOS: ESCÓRIA E LAMAS DE ALTO-FORNO**

**LOBATO, N.C.C.<sup>1</sup>, VILLEGAS, E.A.<sup>2</sup>, MANSUR, M.B.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais. natalia.candian@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais. marcelo.mansur@demet.ufmg.br

<sup>3</sup>Universidade Federal de Minas Gerais. auza@demet.ufmg.br

### **RESUMO**

No presente trabalho, alternativas tecnológicas voltadas ao gerenciamento de escória e lama de alto-forno são apresentadas e discutidas criticamente. Estes subprodutos são resíduos siderúrgicos gerados em elevadas quantidades no Brasil e no mundo durante o processo de produção do gusa. A escória de alto-forno já é considerada por muitos como um subproduto bastante empregado como matéria-prima no setor da construção civil. O reaproveitamento ou a reciclagem da lama de alto-forno, porém, ainda consiste em um desafio. Independentemente do grau de conhecimento e dos métodos de reaproveitamento disponíveis, uma quantidade significativa de ambos resíduos ainda é armazenada, assim busca-se avaliar as possíveis tecnologias aplicáveis ao gerenciamento ambiental destes resíduos.

**PALAVRAS-CHAVE:** siderurgia; sustentabilidade; meio ambiente; escória; lama; alto-forno.

### **ABSTRACT**

In this work, technological alternatives focused on the management of blast furnace slag and sludge are presented and deeply discussed. Such materials are steelmaking wastes generated in large amounts in Brazil and worldwide during the production process of steel. The blast furnace slag is already considered as a byproduct, widely used as a raw material in the construction industry. The reuse or recycle of blast furnace sludge, however, is still a challenge. Regardless the level of knowledge and available methods of reusing, a significant amount of both residues is still stored, so the evaluation of possible technologies for environmental management of these wastes is searched.

**KEYWORDS:** steelmaking; sustainability; environment; slag; sludge; blast furnace.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente a preocupação com a sustentabilidade do planeta é parte indispensável do plano de marketing de qualquer indústria, principalmente daquelas que exploram bens naturais de caráter não renovável, como é o caso da siderurgia. Conforme estabelecido pela Política Nacional do Meio Ambiente, a disposição final de todos os resíduos gerados durante qualquer processo industrial é de responsabilidade da própria empresa geradora. Portanto, ações como “reduzir, reciclar e reutilizar” passaram a fazer parte do cotidiano industrial pois, além de diminuir o volume de resíduos descartados em aterros, há o reaproveitamento de recursos naturais e a redução dos custos de tratamento e disposição final adequados dos rejeitos sólidos.

No Brasil, que constitui o nono maior produtor mundial de aço do mundo, com uma produção de 35 milhões de toneladas de aço em 2011, foram gerados por volta de 20 milhões de toneladas de resíduos. Logo o gerenciamento dos resíduos siderúrgicos escória e lama de alto-forno, gerados durante o processo de redução do minério de ferro, constitui importante contribuição ambiental em função dos volumes gerados. Assim, estes dois resíduos são tratados a seguir, buscando apontar as possíveis tecnologias aplicáveis ao seu gerenciamento ambiental, tanto em nível nacional quanto internacional, na tentativa de contribuir com o aumento da sustentabilidade deste setor industrial.

## 2. ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

A escória de alto-forno é gerada a partir da fusão das impurezas contidas no minério de ferro (como silício, enxofre e fósforo), juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque ou carvão vegetal. São gerados por volta de 200 a 400kg de escória por tonelada de gusa para alto-fornos à coque e de 150 a 300kg por tonelada de gusa para alto-fornos movidos a carvão vegetal (JACOMINO *et al.*, 2002). Sua composição contém elevados teores de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de manganês ( $\text{MgO}$ ) e óxido de ferro ( $\text{FeO}$ ). A concentração de cada um destes óxidos varia em decorrência da constituição química da matéria-prima utilizada na redução, além do tipo de refratário usado na parede do forno. De uma maneira geral, as escórias oriundas de altos-fornos a coque são conhecidas como básicas, enquanto as escórias de altos-fornos a carvão vegetal como ácidas.

Ao sair do alto-forno, a escória se encontra no estado líquido, passando em sequência por um processo de solidificação. Existem várias formas de resfriamento, e cada uma confere à escória características diferentes, acarretando, portanto, empregabilidades distintas. Os processos mais comuns são o resfriamento ao ar, obtendo-se uma escória cristalina, e o processo de granulação, na qual a escória é resfriada rapidamente tornando-se amorfa. A escória granulada possui maior possibilidade de reaproveitamento quando comparada aos demais tipos de escória, devido à sua hidraulicidade, ou seja, a característica de endurecer ao se acrescentar água.

A escória de alto-forno já é considerada hoje um subproduto da siderurgia, devido às suas várias aplicações, principalmente para a indústria da construção civil. Mas apesar das possibilidades de reaproveitamento, uma quantidade considerável deste material ainda é estocado, daí a necessidade de se buscar aplicações alternativas. A seguir são citadas as principais formas de reaproveitamento deste resíduo.

### 2.1. Fabricação de cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico utilizado pela construção civil, composto pelo clínquer e por adições como o gesso. Quimicamente, a escória de alto-forno e o cimento Portland são constituídos pelos mesmos óxidos, porém em proporções diferentes, como pode ser verificado

na Tabela I Além disso, a escória granulada também possui a característica de hidraulicidade tal qual o clínquer, o que a torna, portanto, um material potencial para se adicionar na produção de cimento, minimizando-se, pois, o custo referente à disposição deste resíduo, além da economia na compra de matéria-prima.

**Tabela I. Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento Portland (JOHN, 1995; GEYER, 2001).**

	<b>Escória básica (%)</b>	<b>Escória ácida (%)</b>	<b>Cimento (%)</b>
<b>CaO</b>	40 – 45	24 – 39	61 - 67
<b>SiO<sub>2</sub></b>	30 – 35	38 – 55	20 - 23
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	11 – 18	8 – 19	4,5 – 7,0
<b>MgO</b>	2,5 – 9,5	1,5 – 9,0	0,8 – 6,0
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0 – 2	0,4 - 2,5	3

Assim o cimento Portland de alto-forno é obtido pela mistura homogênea de clínquer e escória granulada de alto-forno, moídos em conjunto ou em separado, sendo que a porcentagem de escória varia entre 35% e 75% da massa total do aglomerante. Como vantagem, este processo permite uma redução da poluição emitida na produção do clínquer, em que implica na calcinação de calcário, que libera quantidade considerável de CO<sub>2</sub>, uma vez que a escória não precisa ser calcinada. Já em relação aos benefícios de engenharia, tem-se a redução do calor de hidratação e a melhoria das propriedades mecânicas (BENQUERER, 2000).

## **2.2. Fabricação de cimento sem clínquer**

A produção de cimentos sem clínquer é outra possibilidade da utilização da escória granulada de alto-forno. Neste processo, a escória granulada moída é misturada a produtos químicos, conhecidos como ativadores, e substitui totalmente o clínquer na produção do cimento. Quanto à ativação da escória, esta somente acontece se houver um suprimento de íons OH<sup>-</sup>, pois sua dissolução se dá por ataque hidroxílico. Como ativadores tem-se, por exemplo, o hidróxido de sódio e a cal hidratada (JOHN, 1995). Assim, a utilização da escória como aglomerante elimina totalmente a etapa de calcinação da matéria-prima, permitindo a redução do consumo de energia e do custo dos cimentos, além de evitar a liberação de uma grande quantidade de CO<sub>2</sub> relacionada a este processo.

## **2.3. Fabricação de concreto**

Uma outra aplicação da escória granulada de alto-forno consiste no seu uso como agregado no concreto. Para essa função, são utilizadas a escória de alto-forno bruta britada e a escória de alto-forno granulada como, respectivamente, agregado miúdo e agregado graúdo (LI *et al.*, 2009). O resultado é um concreto com um acréscimo de 20% na resistência em relação aos concretos convencionais, principalmente quanto aos esforços de resistência à compressão axial (LIDUÁRIO *et al.*, 2005).

Porém, devido à propriedade hidráulica da escória granulada de alto-forno, existe a possibilidade de substituição parcial do cimento utilizado para a fabricação do concreto (DOUGLAS & BRANDSTETR, 1990). Neste caso a substituição acarreta uma melhora na trabalhabilidade, na durabilidade e na resistência do concreto, além de uma maior uniformidade da composição química e características físicas (BERNDT, 2009; DINAKAR *et al.*, 2013). Os resultados também indicaram

que misturas de concreto contendo 50% de substituição de cimento por escória forneceram os melhores resultados em relação às propriedades mecânicas e durabilidade.

#### **2.4. Fabricação de argamassa**

Da mesma forma que no concreto, pode-se utilizar a escória de alto-forno na substituição de parte do cimento na fabricação da argamassa. Akçaözoglu & Cengiz (2011) afirmam que o ideal seja uma razão de substituição em massa de 50%, o que acarreta em um aumento à resistência mecânica de compressão. É importante ressaltar que a escória de alto-forno granulada utilizada tanto em argamassas quanto em concreto, para um melhor desempenho, deve ser ativada através de reagentes alcalinos (DOUGLAS & BRANDSTETR, 1990). No entanto, Kumar *et al.* (2008) afirmam ser possível ativar a escória mecanicamente através da sua fragmentação em um moinho de bolas, eliminando a necessidade de um ativador químico sem prejudicar a qualidade final do material.

#### **2.5. Fabricação de briquetes**

A briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas por meio de pressão a frio com auxílio ou não de um aglutinante, permitindo a obtenção de um produto não só compactado, mas também com forma, tamanho e parâmetros tanto mecânicos quanto físico-químicos metalúrgicos adequados. Como na maioria dos processos de briquetagem utiliza-se o cimento Portland como aglutinante e, segundo Mäkelä *et al.* (2012), é possível trocar parte do cimento por escória granulada de alto-forno. Os briquetes obtidos tiveram satisfatória resistência mecânica e durabilidade. A porcentagem mais adequada de acordo com este estudo foi em que 20% do teor de cimento Portland foi substituído por uma quantidade três vezes maior de escória, apresentando um aumento de 30% de força em relação a um briquete não contendo o resíduo siderúrgico.

#### **2.6. Fabricação de pavimento**

Para o uso na pavimentação, podem ser utilizadas as escórias granuladas ou brutas, seja como agregado ou como aglomerante. Segundo Velten *et al.* (2006), para o emprego da escória como aglomerante, a adição de uma mistura de escória de alto-forno granulada moída, amostra de solo residual jovem de gnaiss e cal hidratada à camada de pavimento de estradas, aumenta consideravelmente a resistência mecânica do pavimento. Neste contexto, a cal atua como agente de ativação de reações de hidratação da escória. E os resultados comprovaram a ação positiva da escória como agente estabilizante do solo.

#### **2.7. Fabricação de adsorvente para dessulfuração de gases**

A dessulfuração é um processo que visa reduzir a quantidade de dióxido de enxofre emitida em correntes gasosas para a atmosfera, convertendo-a em ácido sulfúrico. O adsorvente mais utilizado é a cal hidratada, apesar desta operação não ser altamente eficiente. Por isto, vários pesquisadores começaram a buscar um adsorvente de maior reatividade e com um menor custo, como a escória de alto-forno. De acordo com Liu & Shih (2004) o adsorvente preparado a base de escória apresenta maior área de superfície específica e maior reatividade do que a cal hidratada. Já Gong *et al.* (2008) verificaram que as atividades dos adsorventes com escória foram maiores do que  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sozinho, devido à formação de cálcio hidratados de silicato. Todavia, apesar dos estudos realizados, ainda faltam dados principalmente em relação ao preparo e a aplicação desta tecnologia na indústria.

## 2.8. Fabricação de cerâmica

Mostafa *et al.* (2010) demonstraram que a escória pode ser utilizada sozinha ou com a combinação de minerais de silicato de alumínio para produzir materiais cerâmicos utilizando o processo de queima convencional de cerâmica. Este processo convencional se baseia em um tratamento a altas temperaturas (aprox. 1200°C) com base na fusão ou sinterização. Segundo Karamanova *et al.* (2011) a aplicação de escória de alto-forno em cerâmica proporciona um material de elevada dureza e resistência à flexão. Porém, quanto ao consumo de energia e a emissão de CO<sub>2</sub>, tais processos à alta temperatura podem tornar a reciclagem inviável.

## 2.9. Fabricação de vitrocerâmicas

Os materiais vitrocerâmicos são produzidos a partir da cristalização controlada de materiais vítreos, ou seja, não cristalinos, como, por exemplo, a escória. O processo conhecido como devitrificação consiste na cristalização que ocorre mediante um tratamento térmico apropriado a altas temperaturas (aprox. 900°C), contendo um agente nucleante dissolvido (como o óxido de titânio e o óxido de zircônio) (LIU *et al.*, 2009). As vitrocerâmicas são materiais interessantes não somente por suas características próprias, como baixa condutividade elétrica, dilatação térmica e elevada resistência mecânica, mas também porque seu processo de produção envolve a possibilidade de consumo de variadas matérias-primas de baixo custo. Assim, o uso de escória de alto-forno na fabricação já é um processo bem conhecido e utilizado.

## 2.10. Utilização na agricultura

A acidez do solo quando elevada é um fator limitante do desenvolvimento e conseqüentemente da produção da grande parte das plantas cultivadas. Neste contexto, a escória de alto-forno pode ser usada como corretivo de acidez do solo e como fonte de silício. Outra aplicação envolvendo a correção de acidez do solo seria no tratamento de resíduos geradores de drenagem ácida. Estudos com escórias aplicadas ao solo têm demonstrado aumento de pH, em razão da presença de agente neutralizante da acidez como o SiO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, incrementos de fósforo, cálcio, magnésio e silício no solo, o que, para culturas acumuladoras de silício como o arroz e a cana-de-açúcar, tem refletido em tolerância a doenças e aumentos de produtividade. Além do mais, o aumento nos teores de cálcio e magnésio no solo pode apresentar efeito positivo no desenvolvimento de raízes (CARVALHO-PUPATTO *et al.*, 2004).

## 3. LAMA DE ALTO-FORNO

A lama de alto-forno é obtida através do sistema de tratamento à úmido dos gases que saem do alto-forno. Sua geração é de cerca de 6kg por tonelada de ferro-gusa (LÓPEZ-DELGADO *et al.*, 1998). Quimicamente, esta lama é composta principalmente por carbono e ferro, além de outros elementos como cálcio, silício, alumínio, zinco e magnésio, como podem ser observados na Tabela II. É importante ressaltar que a composição pode variar significativamente de acordo com a matéria-prima empregada no processo de produção.

Tabela II. Composição química de uma lama de alto-forno (MANSFELDT & DOHRMANN, 2004).

Elementos	C	Fe	Ca	Si	Al	Zn	Mg	Pb	K	S	Mn	N	P
Média (g/kg)	190	158	83,0	77,3	35,8	32,6	20,6	10,3	6,39	5,78	5,75	3,52	1,53

Ao contrário da escória, o reaproveitamento da lama se apresenta como um problema mais complexo, devido à presença de elementos indesejados como zinco e chumbo, que impossibilitam a reciclagem direta deste resíduo por causarem problemas operacionais nos alto-fornos. A seguir também serão apresentados os principais destinos deste resíduo.

### **3.1. Reciclagem da lama**

Como já foi citada, a reciclagem direta da lama de alto-forno seca é impossibilitada pela presença de elementos indesejáveis como o zinco e chumbo. Assim existem vários tipos de tratamentos que visam a retirada destes elementos para que a lama resultante, rica em ferro, possa ser reciclada. Entre os tratamentos físicos destacam-se a aglomeração (briquetagem, pelletização, aglomeração a quente), o ajuste granulométrico e a secagem. Já os tratamentos químicos abrangem a via pirometalúrgica (volatilização seletiva, escorificação, etc) e a via hidrometalúrgica (lixiviação seletiva, precipitação, cementação, extração por solventes, etc).

Todavia, com a retirada do zinco e chumbo, a lama resultante seca não pode ser carregada diretamente dentro dos processos de redução ou refino por se tratar de um material fino (menor que 1mm). Desta forma é necessário o emprego de processos de aglomeração, tais como a pelletização, a sinterização e a fabricação de briquetes (TAKANO *et al.*, 2000).

### **3.2. Indústria de cerâmica vermelha**

A lama de alto-forno é um resíduo que apresenta granulometria e composição mineralógica apropriada para a incorporação em cerâmica vermelha. Seu emprego contribui para aumentar a absorção de água, reduzir a tensão de ruptura à flexão e aumentar a retração linear da cerâmica queimada, além de colaborar para a economia energética durante a etapa de queima. Porém, sugere-se que este resíduo seja incorporado em percentuais abaixo de 5% em peso para minimizar os efeitos deletérios nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica (VIEIRA *et al.*, 2007).

### **3.3. Fabricação de adsorventes para metais presentes em efluentes industriais**

O uso de carvão ativado, zeólitos e óxidos de ferro e alumínio como adsorventes é o método mais amplamente utilizado para a eliminação de metais pesados de águas residuais industriais. Mas recentemente, pesquisadores têm buscado materiais alternativos, como por exemplo resíduos, na tentativa de se minimizar os custos de processamento. Como a lama de alto-forno possui um alto teor de óxido de ferro além de coque, torna-se um material indicado para o uso como adsorvente em águas residuais industriais. Segundo López-Delgado *et al.* (1998) a lama é um adsorvente eficaz na adsorção de íons de metais pesados como chumbo, cobre, cromo, zinco e cádmio em soluções aquosas e nas mais variadas concentrações.

## **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Quanto à escória de alto-forno, a sua reutilização na fabricação do cimento Portland é um processo antigo e também o mais utilizado nos dias de hoje. Porém a utilização do cimento sem o clínquer é um processo mais complicado e portanto, não muito utilizado devido à necessidade de uma ativação adequada da escória. Do mesmo modo, a utilização da escória no concreto, na argamassa, na fabricação de briquetes e de pavimento também é limitada pela necessidade de uma ativação adequada, muitas vezes desconhecida pelos profissionais envolvidos. Quanto ao uso na fabricação da cerâmica, o empecilho para a indústria é o elevado consumo de energia. Na fabricação da vitrocerâmica, a introdução da escória já é bem conhecida e utilizada, contudo o volume utilizado é pequeno. Já o uso da escória como adsorvente ainda está em fase de pesquisa, mas o consumo também deve ser reduzido. E por fim, o aproveitamento da escória na agricultura é pouco utilizado

no Brasil, porém em outras partes do mundo o seu emprego já é comum. Quanto à lama de alto-forno, por ser um resíduo rico em ferro, inúmeras pesquisas buscam processo que retirem o zinco e o chumbo contidos nela para que se possa reciclá-la, através de pelotas, sínter ou briquetes, no próprio processo siderúrgico. Porém nenhum método encontrado é viável ainda para a aplicação industrial. Em relação à reutilização da lama na fabricação da cerâmica vermelha, apesar de totalmente viável o volume aplicado é pequeno.

## **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPEMIG e INCT-AQUA pelo apoio à pesquisa.

## **6. REFERÊNCIAS**

AKÇAÖZOGLU, S.; CENGİZ, D.A. Effect of granulated blast furnace slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates. *Construction and Building Materials*, v.25, p.4052-4058. 2011.

BENQUERER, R.A. Gerenciamento de resíduos sólidos em siderúrgicas integradas a coque. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - UFMG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Minas e de Materiais, Belo Horizonte. 2000. 200p.

BERNDT, M.L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, n.23, p.2606–2613. 2009.

CARVALHO-PUPATTO, J.G.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, n.12, p.1213-1218, 2004.

DINAKAR, P.; SETHY, K.P.; SAHOO, U.C. Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag. *Materials and Design*, n.43, p.161–169. 2013.

DOUGLAS, E.; BRANDSTETR, J. A preliminary study on the alkali activation of ground granulated blast-furnace slag. *USA: Cement and Concrete Research*, v.20, p.746-756. 1990.

GEYER, R.M.T. Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre. 2001. 187p.

GONG, G.; YE, S.; TIAN, Y.; CUI, Y; CHEN, Y. Characterization of blast furnace slag-Ca(OH)<sub>2</sub> sorbents for flue gas desulfurization. *Ind. Eng. Chem. Res*, v.47, p.7897–7902. 2008.

JACOMINO, V.M.F.; CASTRO, L.F.A.; RIBEIRO, E.D.L.; LEÃO, M.M.D.; SOUZA, C.M.; GOMES, A.M.; ALMEIDA, M.L.B.; LOPES, L.E.F. Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.

JOHN, V.M. Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo. 1995. 189p.

KARAMANOVA, E.; AVDEEV, G.; KARAMANOV, A. Ceramics from blast furnace slag, kaolin and quartz. *Journal of the European Ceramic Society*, v.31, p.989-998. 2011.

KUMAR, S.; KUMAR, R.; BANDOPADHYAY, A.; ALEX, T.C.; KUMAR, B.R.; DAS, S.K.; MEHROTRA, S.P. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of Portland slag cement. *Cement & Concrete Composites*, v.30, p.679-685. 2008.

LI, Y.F.; YAO, Y.; WANG, L. Recycling of industrial waste and performance of steel slag green concrete. *Beijing- China, J. Cent. South Univ. Technol*, n.16, p.768-773. 2009.

LIDUÁRIO, A.S.; FARIAS, L.A.; ALBUQUERQUE, A.C.; ANDRADE, M.A.S. Utilização da escória de alto-forno moída no concreto convencional e compactada com rolo. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. São Paulo, v.2, n.1, p. 35-39, 2005.

LIU, C.F.; SHIH, S.M. Kinetics of the reaction of iron blast furnace slag/hydrated lime sorbents with SO<sub>2</sub> at low temperatures: effects of sorbent preparation conditions. *Chemical Engineering Science*, v.59, p.1001-1008. 2004.

LIU, H.; LU, H.; CHEN, D.; WANG, H.; XU, H.; ZHANG, R. Preparation and properties of glass-ceramics derived from blast-furnace slag by a ceramic-sintering process. *Ceramics International*, v.35, p.3181-3184. 2009.

LÓPEZ-DELGADO, A.; PÉREZ, C.; LÓPEZ, F.A. Sorption of heavy metals on blast furnace sludge. *Water Research*, v.32, n.4, p.989-996. 1998.

MÄKELÄ, M. PAANANEN, T.; HEINO, J.; KOKKONEN, T.; HUTTUNEN, S.; MAKKONEN, H.; DAHL, O. Influence of fly ash and ground granulated blast furnace slag on the mechanical properties and reduction behavior of cold-agglomerated blast furnace briquettes. *ISIJ International*, v.52, n.6, p.1101-1108. 2012.

MANSFELDT, T.; DOHRMANN, R. Chemical and mineralogical characterization of blast-furnace sludge from an abandoned landfill. *Environ. Sci. Technol*, v.38, p.5977-5984. 2004.

MOSTAFA, N.Y.; SHALTOUT, A.A.; ABDEL-AAL, M.S.; EL-MAGHRABY, A. Sintering mechanism of blast furnace slag-kaolin ceramics. *Materials and Design*, v.31, p.3677-3682. 2010.

TAKANO, C.; CAPOCCHI, D.T.; NASCIMENTO, R.C.; MOURÃO, M.B.; LENZ, G.; SANTOS, D.M. A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos. *Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais*. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo. 2000.

VELTEN, R.Z.; SANT'ANA, A.P.; LIMA, D.C.; SILVA, C.H.C.; CARVALHO, C.A.B.; COUTO, L.G.; MACHADO, C.C. Caracterização mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para aplicações em estradas florestais. *Revista Árvore, Viçosa*, v.30, n.2, p.235-240. 2006.

VIEIRA, C.M.F.; DIAS, C.A.C.; MONTHÉ, A.V.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S.N.. Incorporação de lama de alto-forno em cerâmica vermelha. *Cerâmica*. São Paulo, v.53, n.328, p.381-387. 2007.