

AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O GERENCIAMENTO DAS ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO E DE ACIARIA¹

Natália Cristina Candian Lobato²
 Edwin Auza Villegas³
 Marcelo Borges Mansur⁴

Resumo

A questão ambiental é parte indissociável 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 legislação brasileira vigente, a disposição final de todos os resíduos gerados durante qualquer processo industrial é de responsabilidade da própria empresa geradora, logo ações como “reduzir, reciclar e reutilizar” passaram a fazer parte do cotidiano industrial. Além de diminuir o volume de resíduos descartados em aterros, a reutilização dos resíduos acarreta em menores custos com consumo de matérias-primas, descarte de materiais, etc. Neste contexto, o gerenciamento das escórias geradas durante a produção de aço é abordado no presente trabalho, mais especificamente as escórias de alto-forno e de aciaria LD, que constituem quantidades significativas de materiais gerados por tonelada de aço produzido. O intuito do trabalho é avaliar as possíveis tecnologias aplicáveis ao gerenciamento ambiental para estes resíduos e apontar tendências e/ou alternativas tecnológicas para o seu destino.

Palavras-chave: Escória; Siderurgia; Sustentabilidade; Resíduo.

EVALUATION OF TECHNOLOGICAL ALTERNATIVES FOR THE MANAGEMENT OF BLAST FURNACE AND LD CONVERTER SLAGS

Abstract

The environmental issue is essential to any industry marketing plan, especially for industries that explore non-renewable natural resources, such as the steel industry. According to Brazilian legislation, the final disposal of all wastes generated during any industrial process is responsibility of the generating industry, so actions like "reduce, reuse and recycle" become part of day-to-day industrial activities. In addition to reducing the volume of waste disposed in landfills, waste reuse leads to lower costs of raw material and their disposal. In this context, the management of the slags generated during steel production is discussed in this article, specifically the blast furnace and LD converter slags, which represent significant amounts of waste generated per ton of steel produced. The purpose of the study is to evaluate the possible technologies for environmental management to these wastes and to point trends and/or technological alternatives to their destination.

Key words: Slag; Steelmaking; Sustainability; Waste.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheira Metalurgista, Aluna de Pós-Graduação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Químico, Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Reflexo da tendência filosófica de crescimento sustentável é o aumento contínuo verificado no rigor das atuais leis ambientais ao redor do mundo. No Brasil, a Política Nacional do Meio Ambiente atribui ao fabricante a responsabilidade por todos os danos ambientais causados por ele, desde a extração dos bens naturais até a disposição final dos rejeitos produzidos.⁽¹⁾ Consequentemente, o gerenciamento dos resíduos gerados torna-se uma questão fundamental para as indústrias. Além disso, a sociedade e o mercado consumidor exigem das empresas uma atuação transparente e concreta na preservação e conservação do meio ambiente. Toda esta pressão tem criado condições que favorecem a adoção de atividades/processos com menor impacto ambiental, desenvolvimento de novas tecnologias e aumento da eficiência dos processos existentes.

Dentro deste contexto, a indústria metalúrgica, tida como poluidora em potencial, vem realizando significativo esforço para reduzir seu impacto ambiental. Apesar da adoção de novas tecnologias - menos poluentes e energicamente mais eficazes -, a geração de grandes volumes de resíduos preocupa quanto ao seu gerenciamento e/ou disposição adequados. Assim, a busca de processos de reciclagem ou reutilização constitui uma alternativa para se diminuir o volume de resíduos descartados em aterros, além da vantagem do reaproveitamento de recursos naturais.

O Brasil constitui atualmente o nono maior produtor mundial de aço, com produção em torno de 35 milhões de toneladas em 2011,⁽²⁾ o que resulta na geração de aproximadamente 20 milhões de toneladas de resíduos. Considerando a média de 300 kg de escória de alto-forno e 120 kg de escória de aciaria por tonelada de aço bruto, foram gerados em torno de 10 milhões de toneladas de escórias de alto-forno e 4 milhões de toneladas de escórias de aciaria em 2011, sendo estas escórias portanto, os resíduos de maior volume dentre os rejeitos gerados pela siderurgia.

Portanto, o gerenciamento dos resíduos siderúrgicos como as escórias constitui em uma importante contribuição ambiental. Neste sentido, 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 ESCÓRIAS

As escórias ferrosas são resíduos gerados ao longo do processo de produção do aço. A escória de alto-forno é formada pela combinação, em elevadas temperaturas, da ganga do minério, fundentes e cinzas de carvão vegetal ou coque. Sua geração varia por volta de 200 a 400 kg de escória de alto-forno por tonelada de gusa, para altos-fornos à coque, e de 150 a 300 kg por tonelada de gusa para altos-fornos movidos a carvão vegetal.^(3,4) Já durante o processo de refino do aço através do convertedor LD, o oxigênio introduzido combina-se com o silício, manganês e carbono formando a escória e os gases CO e CO₂. A geração média de escórias de aciaria LD varia de cerca de 120 a 150 kg por tonelada de aço, podendo chegar até a 200 kg por tonelada.⁽⁵⁻⁷⁾

A separação entre a escória e a fase metálica ocorre devido à imiscibilidade e à diferença de densidade entre estas duas fases. A escória é eliminada na forma líquida, passando em sequência pela etapa de solidificação. As escórias de alto-forno são resfriadas comumente por dois processos: 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 possibilidade de reaproveitamento da escória granulada é bem maior quando comparada aos outros tipos de escória, devido à sua hidraulicidade, ou seja, a característica de endurecer ao acrescentar água. Importante ressaltar que somente as escórias amorfas possuem tal propriedade. Então quanto mais rápido for o resfriamento, maior será o grau de vitrificação, e melhores serão as propriedades hidráulicas.⁽⁸⁾

Quanto à escória de aciaria, esta é normalmente vazada em uma panela ou descarregada em uma área na qual possa ser resfriada ao ar até a sua solidificação, obtendo-se, assim, uma estrutura cristalina. Em seguida, passa pelo processo de britagem, sendo enviada para uma unidade de processamento onde passa por uma etapa de separação magnética. A porção metálica, chamada de sucata, é enviada para a reciclagem no próprio convertedor LD e corresponde em média 30% da escória gerada.⁽⁶⁾

As escórias de uma maneira geral são constituídas por óxidos, como sílica (SiO_2), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de manganês (MgO) e óxido de ferro (FeO), além de silicatos como FeO.SiO_2 , MnO.SiO_2 e CaO.SiO_2 . Ressaltando que a concentração de cada um destes óxidos é decorrente da constituição química das matérias-primas utilizada no processo de fabricação, além do tipo de refratário das paredes dos fornos. Na Tabela 1 é mostrada a composição típica das escórias.

Tabela 1. Composição química típica das escórias de alto-forno (AF) e de aciaria (LD)^(6,9)

	Escória AF (%)	Escória LD (%)
CaO	24 - 45	6 - 45
SiO₂	30 - 55	7 - 16
Al₂O₃	8 - 19	1 - 4
MgO	1,5 - 9	1 - 9
FeO	0 - 2	8 - 30

Devido ao grande volume gerado das escórias de alto-forno e de aciaria e da possibilidade de reutilização, estas escórias passaram a ser consideradas como coprodutos. Mas apesar da significativa aplicação destas na indústria civil, um volume considerável deste material ainda é estocado e, portanto, novas formas de gerenciamento ainda precisam ser desenvolvidas. A seguir são citadas as principais formas de reaproveitamento deste resíduo.

2.1 Fabricação de Cimento Portland

O cimento é um material aglomerante muito utilizado na construção civil. Os aglomerantes que endurecem por ação da água, através da hidratação, são chamados hidráulicos, como o cimento Portland. Existem também aglomerantes inertes, que endurecem por simples secagem, por exemplo, argilas e betumes, e o aglomerante aéreo, que endurece pela simples ação do CO_2 do ar, como por exemplo cal aérea e gesso.⁽⁵⁾

Quimicamente, a escória é uma mistura de cal (CaO), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), ou seja, os mesmos óxidos que constituem o cimento Portland, mas não nas mesmas proporções (Tabela 2).

Tabela 2. Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento Portland^(6,9)

	Escória de alto-forno (%)	Escória de aciaria (%)	Cimento (%)
CaO	24 - 45	6 - 45	61 - 67
SiO₂	30 - 55	7 - 16	20 - 23
Al₂O₃	8 - 19	1 - 4	4,5 - 7
MgO	1,5 - 9	1 - 9	0,8 - 6

Além da constituição química, a escória granulada de alto-forno também possui a característica de hidráulidade, e apresenta leve caráter pozolânico (capacidade de reagir com o cal), o que a torna um material potencial para se adicionar na produção deste tipo de cimento, minimizando-se, com isto, o custo referente à disposição deste resíduo, além da economia na compra de matéria-prima na indústria do cimento.⁽¹⁰⁾

Já escória de aciaria para ser empregada na produção de cimento deve ser submetida a um resfriamento brusco, ou seja, uma granulação, como no caso da escória de alto-forno, de modo que se torne amorfa e obtenha propriedades de hidráulidade.

A fabricação do cimento Portland tradicional é composto pelo clínquer, formado de calcário e argila, e por adições, como o gesso. Já o cimento Portland com o uso de escória é obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e escória granulada, moídos em conjunto ou em separado. Ou seja, a escória é utilizada para substituir parte do clínquer.

Assim, além da redução da quantidade CO₂ pela descarburatação, é também reduzida a quantidade de combustível, uma vez que a escória não precisa ser calcinada. Já em relação aos benefícios de engenharia, tem-se: (i) a redução do calor de hidratação, importante em grandes peças de concreto, como barragens; (ii) a melhoria da resistência contra a penetração de cloretos; além do (iii) melhoramento das propriedades mecânicas do material final.^(11,12)

Quanto à escória de alto-forno, o uso dentro da indústria do cimento é uma forma de reutilização antiga, tendo sido iniciado no Brasil por volta da década de 50⁽⁹⁾. Atualmente é também o processo de reciclagem de escória mais utilizado, consumindo a maior parte das escórias geradas no Brasil.⁽¹¹⁾ Assim, segundo Benquerer,⁽⁵⁾ o conteúdo de escória granulada de alto-forno deve estar compreendido entre 35% e 75% da massa total do aglomerante.

Já a escória de aciaria é um resíduo bem menos utilizado dentro da produção de cimento devido às suas propriedades hidráulicas mais pobres se comparadas à escória granulada de alto-forno, assim somente pequenas quantidades são usadas para este propósito.⁽⁶⁾

2.2 Fabricação de Cimento Sem Clínquer

A produção de cimentos sem clínquer é outra possibilidade de utilização da escória 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. O poder aglomerante das escórias provavelmente está ligada à sua forma vítrea. Quanto à ativação da escória, somente acontece se houver um suprimento de íons OH⁻, pois sua dissolução se dá por ataque hidroxílico. Como exemplos de ativadores tem-se o hidróxido de sódio, silicato de sódio e a cal hidratada.⁽⁹⁾

Assim a utilização da escória como aglomerante elimina totalmente a etapa de calcinação da matéria-prima, o que permite a redução do consumo de energia e do custo dos cimentos, além de evitar a liberação de uma grande quantidade de CO₂ relacionada a este processo.⁽¹¹⁾ Cabe ressaltar que a calcinação realizada no processo de fabricação de cimento Portland tradicional envolve temperaturas de aproximadamente 1.500°C e é a etapa responsável por 40 a 60% dos custos de produção de cimentos.⁽⁵⁾ No entanto a fabricação deste tipo de cimento não é realizada devido à dificuldade de se ativar adequadamente a escória.

2.3 Uso como Agregado

Outra forma de utilização das escórias é como agregado. Esta é a principal destinação da escória de aciaria, sendo a escória de alto-forno também bem utilizada para este fim.^(8,13)

Como agregado na construção civil as escórias substituem parcialmente a areia e/ou a brita. As vantagens da utilização da escória graúda sobre a brita são o menor custo; maior resistência à abrasão do concreto gerado; estrutura vesicular, permitindo perfeita drenagem quando utilizados em drenos e lastros ferroviários; forma de grão (cúbica), que confere ótima consistência às misturas asfálticas e maior peso próprio, resultando em economia de material no dimensionamento de contenções e lastros, assegurando maior estabilidade.

Porém, segundo Geyer,⁽⁶⁾ o uso da escória de aciaria pode levar a danos devido à sua expansibilidade elevada em decorrência da presença de óxidos livres reativos como o CaO e o MgO. A expansibilidade é solucionada caso o material esteja devidamente curado, processo que consiste basicamente em se estender o material num pátio, onde o mesmo possa entrar em contato direto com as intempéries ambientais por um longo tempo (cerca de seis meses), de modo a assegurar que todas as reações envolvidas ocorram.

Segundo Liduário et al.,⁽⁸⁾ quando se emprega a escória de alto-forno como agregado no concreto há um acréscimo de 20% na resistência em relação aos concretos convencionais, principalmente quanto aos esforços de resistência a compressão axial.⁽¹⁴⁾

2.4 Uso como Aglomerante

Devido à hidraulicidade da escória de alto-forno, existe a possibilidade também de substituição parcial do cimento pela escória para a fabricação de materiais como o concreto, pavimentos, entre outros.⁽¹⁵⁾

O uso da escória na substituição do cimento melhora a trabalhabilidade, a durabilidade e a resistência do concreto.^(8,16) Os estudos de Berndt⁽¹⁷⁾ indicaram que misturas de concreto contendo 50% de substituição de cimento por escória de alto-forno resultam em melhores propriedades mecânicas e durabilidade, além de apresentar composição química e características física mais uniformes quando comparadas com a substituição por outros materiais. No entanto, Kim⁽¹²⁾ apontou que o uso desta escória tem os seus inconvenientes, como o retardamento do tempo de pega do concreto e, portanto, o aumento do tempo de construção.

Da mesma forma que no concreto, pode-se utilizar a escória na substituição de parte do cimento na fabricação da argamassa. Akçaözoglu e Cengiz⁽¹⁸⁾ afirmam que ao substituir 50% em massa de cimento por escória obtém-se um material com elevada 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, é sempre ativada através de reagentes alcalinos, tais como NaOH e Ca(OH)₂.⁽¹⁹⁾

Velten *et al.*⁽²⁰⁾ verificaram a ação positiva da escória de alto-forno como agente estabilizante do solo, na fabricação de pavimento, devido ao teor de óxido de cálcio presente na escória. Desta forma, a reação é lenta mas, em meio fortemente alcalino e/ou através da ação de sulfatos, torna-se acelerada, sendo a velocidade de reação favorecida pela finura da escória

Quanto à escória de aciaria, não se costuma utilizá-la como aglomerante devido às suas propriedades hidráulicas mais pobres, principalmente se comparadas à escória granulada de alto-forno.

2.5 Fabricação de Cerâmica

A produção de cerâmica exige quantidades significativas de matérias-primas naturais, principalmente argila, sílica e feldspato, compostas basicamente de óxidos de alumínio, silício, ferro, sódio, magnésio, cálcio, que são os mesmos compostos formadores da escória. Logo, diversos trabalhos vêm sendo realizados abordando a incorporação de resíduos em massas cerâmicas, cuja relevância é destacada com o objetivo de reduzir os impactos ambientais causados por eles, bem como melhorar as propriedades funcionais e estruturais das cerâmicas vermelhas.⁽²¹⁾

Mostafa *et al.*⁽²²⁾ demonstraram que a escória de alto-forno 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. 1.200°C) com base na fusão ou sinterização. Segundo Karamanova, Avdeev e Karamanov,⁽²³⁾ 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 CO₂, no entanto, tal processo pode tornar a reciclagem inviável.

Quanto ao uso da escória de aciaria nas massas cerâmicas, resultados descritos por Freitas *et al.*⁽²⁴⁾ demonstram que a substituição parcial de argila por escória e filito, quando misturada nas proporções de 30% de escória, 50% de filito e o resto de argila não influencia de maneira significativa nas propriedades tecnológicas do material após a queima, sobretudo em temperaturas superiores a 1.000°C. Isto se deve provavelmente ao fato do filito atuar como fundente na formulação final da massa cerâmica. Porém, a massa de cerâmica obtida apresenta boa resistência mecânica, possuindo, portanto, características adequadas para ser empregada na produção de cerâmicas estruturais.

2.6 Fabricação de Vitrocerâmicas

Vitrocerâmicas são materiais de grãos finos policristalinos formados por vidros de composições apropriadas, tratados termicamente e submetidos a uma cristalização controlada.⁽²⁵⁾ Esses materiais são interessantes não somente por suas características próprias, como baixa condutividade elétrica e dilatação térmica e elevada resistência mecânica, mas também porque seu processo de produção envolve o consumo de matérias-primas de baixo custo, com possibilidade de reaproveitamento de resíduos industriais como as escórias siderúrgicas.

O uso de escória de alto-forno como matéria-prima na fabricação de vitrocerâmicas já é bem conhecido e utilizado, mas a utilização de escória de aciaria para o mesmo fim ainda constitui um desafio. A escória de aciaria possui baixa concentração de SiO_2 e composição química variável, o que limita o seu uso. Porém os resultados obtidos por Ferreira⁽²⁶⁾ permitem concluir que é possível produzir vitrocerâmicas a partir de escória de aciaria, com o devido ajuste da composição química da mistura através de adições de areia e carbonato de sódio. Com uma mistura contendo 60% em peso de escória, 35% areia e 5% Na_2O (após fusão a 1.350°C), é possível produzir placas de vitrocerâmicas suficientemente grandes para utilização como revestimento em construção civil.

2.7 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. Sua ação desencadeia diretamente um aumento da concentração de íons de hidrogênio e alumínio no solo, que são condições adversas ao crescimento dos vegetais e à vida microbiana útil. E indiretamente causa o desaparecimento de nutrientes essenciais as plantas, tais como cálcio e magnésio. Comportamento semelhante é observado em aterros de minérios beneficiados com elevada concentração de materiais piritosos, que podem originar drenagem ácida de mina quando expostos aos efeitos atmosféricos.

Os elevados teores de CaO e MgO , bem como o de Al_2O_3 baixo, sugerem a possibilidade da escória ser usada como corretivo da acidez do solo

Estudos com escórias de alto-forno aplicadas ao solo têm demonstrado aumento de pH em razão da presença de agente neutralizante da acidez como o SiO_3^{-2} , incrementos na disponibilidade 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, especialmente em relação ao cálcio, uma vez que são bem conhecidos os efeitos positivos deste elemento no crescimento radicular.⁽²⁷⁾

Experimentos conduzidos por Das et al.⁽⁷⁾ e López⁽²⁸⁾ utilizando escória LD pulverizado para o cultivo de vegetais como tomate, batata, cebola, espinafre, e de culturas como o trigo, no solo ácido, demonstraram um aumento no pH do solo, bem como as alterações no complexo de troca, conseqüentemente melhorando a qualidade e produtividade do solo.

O aproveitamento agrícola de resíduos industriais como a escória de siderurgia é pouco utilizado no Brasil, apesar da quantidade disponível, no entanto já é aplicado em países Espanha, Bélgica, França e Alemanha.⁽²⁹⁾

2.8 Fabricação de Adsorvente para Dessulfuração de Gases

A dessulfuração consiste em 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 da operação não ser altamente eficiente. Por isto, vários pesquisadores buscam um adsorvente de maior reatividade e com um menor custo, como a escória de alto-forno. De acordo com Liu e Shih,⁽³⁰⁾ 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.⁽³¹⁾ 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.

2.9 Reciclagem

A escória de aciaria LD possui potencial de ser reciclada devido ao seu teor de ferro, além dos valores de cálcio. Como já foi citado, através da separação magnética, a parte da escória que contém maior concentração de ferro pode ser reciclada. Ao contrário da Brasil, nos países europeus este processo é comumente realizado. Segundo Das et al.,⁽⁷⁾ na Europa, 30% destas escórias são recicladas em altos-fornos. No entanto, é necessária muitas vezes uma etapa de remoção dos metais nocivos presentes na escória, como o enxofre e o fósforo, para que posteriormente a escória siga normalmente para o processo de sinterização.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais tecnologias aplicáveis e as tendências ao gerenciamento ambiental das escórias de alto-forno e aciaria foram apontadas ao longo do texto e são sucintamente apresentadas na Tabela 3. Conclui-se que, apesar destes resíduos apresentarem rotas de reutilização já aplicáveis na indústria, principalmente na construção civil, ainda é necessária a realização de estudos para o aperfeiçoamento destas rotas e o desenvolvimento de novas tecnologias.

Tabela 3. Principais gerenciamentos das escórias de alto-forno e de aciaria

	Escória de alto-forno	Escória de aciaria LD
Fabricação de cimento Portland	A utilização da escória granulada na substituição parcial do clínquer já é um processo consagrado, que consome boa parte das escórias de alto-forno geradas no Brasil.	Sua utilização dentro da produção de cimento é pequena, devido às suas propriedades hidráulicas mais pobres se comparadas à escória granulada de alto-forno.
Fabricação de cimento sem clínquer	Apesar de ser uma possibilidade, a substituição total do clínquer pela escória não é utilizada devido à dificuldade de se ativar adequadamente a escória.	Devido às suas propriedades hidráulicas, não há estudos sobre o uso da escória de aciaria na fabricação do cimento sem o clínquer.
Uso como agregado	O emprego da escória de alto-forno como agregado no concreto resulta em um concreto com excelentes propriedades.	É a principal destinação da escória de aciaria, apesar de que o material deve ser devidamente curado e não conter certos elementos para evitar a expansibilidade elevada do material.
Uso como aglomerante	Devido a hidráulidade da escória de alto-forno granulada, existe a possibilidade de substituição parcial do cimento pela escória para a fabricação de materiais como o concreto, pavimentos e argamassas.	A escória de aciaria não é utilizada como aglomerante devido as suas propriedades hidráulicas mais pobres.

Tabela 3. Principais gerenciamentos das escórias de alto-forno e de aciaria (Continuação)

Fabricação de cerâmica	É possível a incorporação da escória na fabricação da cerâmica, resultando em cerâmicas de elevada dureza e resistência à flexão. Porém tal processo não é viável quanto ao consumo de energia e a emissão de CO ₂ .	O uso da escória de aciaria resulta em uma cerâmica com boa resistência mecânica e características adequadas para ser empregada na produção de cerâmicas estruturais.
Fabricação de vitrocerâmicas	O uso de escória de alto-forno como matéria-prima na fabricação de vitrocerâmicas já é bem conhecido e utilizado.	A utilização de escória de aciaria constitui-se em um desafio, mas experimentos demonstram ser possível através do devido ajuste da composição química.
Utilização na agricultura	Estudos com escórias de alto-forno aplicadas ao solo resultaram em efeitos positivos para a plantação.	Do mesmo modo, experimentos escória LD demonstraram um aumento no pH do solo e um melhoramento na qualidade e produtividade do solo.
Fabricação de adsorvente	Estudos buscam a utilização desta escória como um adsorvente no processo de dessulfuração.	Não há estudos utilizando este material.
Reciclagem	Devido ao seu baixo teor de ferro, não há possibilidade de reciclagem deste resíduo dentro da produção de aço.	A escória de aciaria LD possui uma grande capacidade de reciclagem devido ao seu teor de ferro elevado, além dos valores de cálcio.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, Capes, Fapemig e INCT-AQUA pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 CONAMA. Resolução CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002. Publicada no DOU nº 226, 22 de novembro de 2002, Seção 1, páginas 85-91.
- 2 INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade 2012. Disponível em <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/publicacoes.asp>>. Acesso em: 14 de agosto de 2012.
- 3 JACOMINO, V.M.F. *et al.* Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.
- 4 SOUZA JÚNIOR, D. S. Estudo do comportamento de escórias de alto-forno a carvão vegetal produzidas a partir de ativação à quente. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belo Horizonte. 2007.
- 5 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.
- 6 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.

- 7 DAS, B. *et al.* An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. Resources, Conservation and Recycling, v.50, p.40-57. 2007.
- 8 LIDUÁRIO, A.S. *et al.* 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.
- 9 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.
- 10 KUMAR, S. *et al.* 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.
- 11 JOHN, V.M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de escória de alto forno no Brasil. Seminário Reciclagem de resíduos sólidos domésticos - USP, São Paulo, 2000.
- 12 KIM, H.S. *et al.* Activation of ground granulated blast furnace slag cement by calcined alunite. Materials Transactions, v.52, n.2, p.210-218. 2011.
- 13 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.
- 14 QUEIROZ, M.T.A. *et al.* Resultados preliminares: utilização da escória de alto-forno a carvão vegetal em estruturas de concreto. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2007.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 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.
- 18 AKÇAÖZOĞLU, 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.
- 19 DOUGLAS, E.; BILODEAU, A.; BRANDSTETR, J. Alkali activated ground granulated blast-furnace slag concrete: preliminary investigation. USA: Cement and Concrete Research, v.21, p.101-108. 1991.
- 20 VELTEN *et al.* Caracterização mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para aplicações em estradas florestais. Revista Árvore, Viçosa - MG, v.30, n.2, p.235-240. 2006.
- 21 RÊGO, V.R. Efeito da adição da escória de aciaria em formulações de massa cerâmica para telhas. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Natal. 2010.
- 22 MOSTAFA, N.Y. *et al.* Sintering mechanism of blast furnace slag-kaolin ceramics. Materials and Design, v.31, p.3677-3682. 2010.
- 23 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.
- 24 FREITAS, M.C. *et al.* Efeito da incorporação de filito e escória de aciaria nas propriedades tecnológicas de cerâmicas estruturais. In: 20^o CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2012, Joinville. 20^o CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p. 2444-2451. 2012.
- 25 LIU, H. *et al.* 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.
- 26 FERREIRA, E.B.; ZANOTTO, E.D.; SCUDELLER, L.A.M. Nano vitrocerâmica de escória de aciaria. Química Nova, v.25, n.5, p.731-735, 2002.

- 27 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.
- 28 LOPÉZ, F.A. The recycling of Linz–Donawitz (LD) converter slag by use as a liming agent on pasture land. *Waste Management & Research*, v.13, p.555-568. 1995.
- 29 PRADO, R. M.; FERNANDES, F.M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um latossolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.1199-1204, 2001.
- 30 LIU, C.F.; SHIH, S.M. Kinetics of the reaction of iron blast furnace slag/hydrated lime sorbents with SO₂ at low temperatures: effects of sorbent preparation conditions. *Chemical Engineering Science*, v.59, p.1001-1008. 2004.
- 31 GONG, G. *et al.* Characterization of blast furnace slag-Ca(OH)₂ sorbents for flue gas desulfurization. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.47, p.7897–7902. 2008.