

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO REAPROVEITAMENTO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD COMO AGREGADO SIDERÚRGICO

DOI:10.19177/rgsa.v7e22018206-229

**Bianca Stephanie Oliveira¹,
Juni Cordeiro², Patricia Carla Brito Neves³,
Giovanna Moura Calazans¹¹, Jose Gustavo Souza Costa¹²**

RESUMO

A grande quantidade de resíduos sólidos industriais gerados, ocasionada pelo desenvolvimento industrial, vem se tornando um problema mundial, despertando um interesse na promoção de tecnologias que visem a eficiência dos processos produtivos com relação à minimização da geração e o reaproveitamento destes resíduos. Neste contexto, esta pesquisa visou avaliar o potencial do reaproveitamento da escória de aciaria LD como agregado siderúrgico por meio da análise de documentos internos da ArcelorMittal Monlevade S.A. Dessa forma, a caracterização química da escória da aciaria produzida na ArcelorMittal Monlevade S.A. permitiu constatar a presença de 42% de cal, 19% de ferro total, 14% de sílica, 6% de óxido de magnésio, 6% de óxido de manganês, 6% de trióxido de dimanganês, 3% de alumina e 2% de pentóxido de fósforo. A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização, verificou-se que a escória da aciaria é classificada como um resíduo do tipo II A – não inerte. Além disso, salienta-se que a reutilização da escória de aciaria mostra-se benéfica ao meio ambiente por promover a substituição de substâncias não metálicas.

Palavras-chave: Beneficiamento de escória de aciaria. Impactos ambientais. Resíduos Sólidos Siderúrgicos.

¹ Engenheira Ambiental. Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira. E-mail: bisoliveira_92@hotmail.com

² Mestre em Geologia Regional. Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: juni.cordeiro@funcesi.br

³ Mestre em Modelagem Matemática e Computacional. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. E-mail: patricia.neves@funcesi.br

¹¹ Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail: giovanna.calazans@funcesi.br

¹² Pós-graduado em Gestão Ambiental. Centro Universitário do Leste de Minas Gerais. E-mail: josegustavo.souza@arcelormittal.com.br

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional aliado ao desenvolvimento industrial acarreta uma grande produção de produtos e insumos, gerando aumento do consumo de recursos naturais não renováveis e grande quantidade de resíduos sólidos pelas indústrias, podendo suscitar impactos ambientais negativos. Além do acréscimo na quantidade, os resíduos sólidos podem abrigar em sua composição elementos sintéticos e perigosos aos ecossistemas e à saúde humana, promovendo aumento da poluição da água, do ar e do solo, caso sua destinação e/ou disposição final não ocorra de forma adequada (COSTA, 2010).

Neste sentido, a Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, propõe a prevenção e a redução na geração de resíduos sólidos, em âmbito nacional, tendo como alternativa a realização de hábitos de consumo sustentáveis e um conjunto de instrumentos para proporcionar o crescimento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos e a disposição ambientalmente correta dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Ademais, de acordo com Cantarino (2007), uma outra linha que vem crescendo é a valorização de resíduos sólidos, fazendo a modificação destes a fim de desenvolver novas aplicações. Com isso, dá-se um novo sentido ao termo “resíduo”, o qual passa a ser chamado de coproduto por ter uma utilização técnica econômica e ambientalmente viável.

Um dos segmentos industriais que geram resíduos passíveis de utilização como coproduto em outras áreas é representado pelas aciarias da siderurgia. A indústria do aço no Brasil é uma das mais competitivas do mundo, produzindo anualmente mais de R\$ 45 bilhões em valor adicionado para o país, sendo responsável por um saldo comercial além de US\$ 4 bilhões, o que constitui aproximadamente 18% do total do país. Ademais, admite atualmente cerca de 110 mil pessoas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015).

Por outro lado, a siderurgia gera grande quantidade de resíduos, que na maioria das vezes, são dispostos em aterros industriais, promovendo o descarte na

“natureza”, fazendo com que estes deixem de ser reaproveitados e reutilizados nos processos produtivos, implicando em uma maior extração de recursos naturais não renováveis. Além disso, quando o resíduo é tratado como “desperdício”, a problemática, além de ambiental, também passa a ser econômica, uma vez que a empresa deixa de lucrar e/ou economizar, não utilizando o rejeito como coproduto. Portanto, o correto gerenciamento dos resíduos sólidos pode ser benéfico tanto para as organizações quanto para o meio ambiente.

Neste contexto, este trabalho buscou avaliar o potencial do reaproveitamento da escória de aciaria LD como agregado siderúrgico, a partir da análise de documentos internos da ArcelorMittal Monlevade S.A.

2 O SETOR SIDERÚRGICO BRASILEIRO

O setor siderúrgico brasileiro detém, atualmente, capacidade instalada para fabricar 48,9 milhões de toneladas de aço bruto por ano e um parque produtor de aço com 29 usinas, todas de grande porte, administradas por 11 grupos empresariais. Neste contexto, o Brasil é o 14º exportador mundial de aço em exportações indiretas e 6º maior exportador líquido de aço, exportando para mais de 100 países. O consumo *per capita* de aço no Brasil equivale a 121 quilos de produtos siderúrgicos por habitante, sendo que os principais setores consumidores de aço são a construção civil, automotivo, bens de capital, máquinas e equipamentos, utilidades domésticas e comerciais (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014a).

Segundo dados do Instituto Aço Brasil (2014b), a produção de aço bruto em 2013 totalizou 34,2 milhões de toneladas, com diminuição de 1% comparada ao ano anterior, que foi de 34,5 milhões de toneladas. As usinas brasileiras operaram com 70,5% de sua capacidade de produção, inferior ao resultado alcançado em 2012, de 71,3%. Entretanto, a indústria brasileira do aço foi responsável, em 2013, por 2,1% da produção mundial, permanecendo em 9º lugar no *ranking* liderado pela China. Adicionalmente, faz-se importante ressaltar que no Brasil existem fatores que

atrapalham a competitividade do produto nacional, tais como uma elevada carga tributária, os custos de energia, problemas de infraestrutura e de logística.

De maneira geral, o processo de produção do aço pode ser dividido em três etapas básicas: redução, refino e conformação mecânica. A primeira é a redução, em que o minério de ferro é transformado em ferro metálico (gusa ou ferro-esponja). Em seguida, no refino, são removidas as impurezas da liga metálica e reduzido o teor de carbono, etapa na qual se obtém o aço propriamente dito. A terceira etapa é a conformação mecânica, na qual o produto semiacabado, resultado da solidificação do aço (lingotamento), é laminado na forma de chapas, barras, fios, tubos, entre outros (CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015).

A divisão do processo produtivo do aço nas três etapas básicas permite uma classificação da siderurgia em dois segmentos: as usinas integradas e semi-integradas. As usinas integradas realizam as etapas de redução, refino e conformação mecânica, procedendo à redução do minério de ferro através do coque, do carvão vegetal ou do gás natural. Já as semi-integradas, o aço é adquirido por meio da fusão/refino da carga metálica, composta de sucata e ferro-gusa ou ferro-esponja (CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015).

Segundo Cantarino (2007), existem três processos de fabricação do aço, caracterizados pelo uso de distintas formas de refino: o Siemens – Martin (OH – *Open Hearth*), o conversor a oxigênio (LD – *Linz Donawitz* ou BOF – *Basic Oxygen Furnace*) e o Forno Elétrico a Arco (EAF – *Electric Arc Furnace*).

De acordo com Carvalho, Mesquita e Araújo (2015), o processo Siemens – Martin se encontra em desuso (atualmente tem sido aplicado apenas na Ucrânia e na Rússia) devido a sua baixa produtividade e alto potencial poluidor. O processo de refino do aço em conversores a oxigênio (processo LD/BOF) tem como finalidade minimizar os teores de carbono do ferro-gusa, na fase líquida, por meio de injeção de oxigênio com lanças de sopro. Nessa fase, também acontece a diminuição dos teores de elementos como silício, enxofre e fósforo, entre outros.

Já o processo de produção do aço em forno elétrico a arco (EAF), denominado aciaria elétrica ou usina semi-integrada, é composto pela fusão de sucata de aço e de ferro primário (gusa ou ferro-esponja) a partir do calor gerado por um arco elétrico formado entre os eletrodos e a carga metálica. Após a fusão da carga, é injetado oxigênio através de uma lança, com a finalidade de proporcionar a

reação de oxidação de carbono, silício e fósforo, visando a diminuição desses elementos (CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015).

Destaca-se que o conversor LD gera entre 45 a 150 kg de escória oxidante por tonelada de aço bruto produzido, dependendo do tipo de conversor LD utilizado; com relação ao EAF utilizado, podem ser geradas entre 80 a 150 kg de escória oxidante por tonelada de aço bruto produzido (CANTARINO, 2007).

2.1. Escória

Segundo dados do Instituto Aço Brasil (2014b), em 2013, cada tonelada de aço produzido gerou 594 quilos de coprodutos e resíduos, atingindo um total de 17,7 milhões de toneladas destes, dos quais 88% foram reaproveitados, 6% estocados e 6% destinados para a disposição final. A geração de escória de alto-forno totalizou 37% e a escória de aciaria 29%, já o valor restante é representado pelos finos, pós, lamas e outros resíduos, decorrentes dos processos e sistemas de tratamento existentes.

As escórias de alto-forno, em sua quase totalidade (99%) foram vendidas especialmente para a indústria cimenteira, sendo que o restante destas (1%) foi reutilizado internamente. No caso das escórias de aciaria 52% foram vendidas, 26% reutilizadas internamente, 13% foram doadas e 9% foram estocadas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014b).

Salienta-se que a escória de alto-forno é o resíduo do processo siderúrgico que tem como etapa inicial a obtenção do ferro bruto e impuro (ferro-gusa) através da redução do minério de ferro. Por outro lado, a escória da aciaria é obtida no processo de produção do aço pela utilização do ferro-gusa, processo que requer menor grau de impureza (PRADO *et al.*, 2001).

Desta forma, a escória de alto-forno é um resíduo não metálico da produção de ferro-gusa, assim, quando resfriada bruscamente possui propriedades aglomerantes, apresentando maior liberação de potássio, enquanto que a escória de aciaria apresenta maior disponibilidade de cálcio (NOVAIS *et al.*, 1993).

A escória de aciaria é um subproduto da produção do aço, correspondendo à fração leve que se desmembra do aço líquido devido à diferença de peso específico.

É resultante da agregação de vários elementos desnecessários no material aço, sendo, desta forma, composta por óxidos, como o cálcio e o magnésio, além de ser expansível, devido às reações químicas desses compostos. As limitações identificadas neste material são a heterogeneidade, alto teor de cal livre e a ausência de atividade hidráulica (PIAU, 1995).

Uma das vantagens da escória da aciaria é a diversidade de aplicações que ela proporciona, tanto no próprio processo siderúrgico quanto em outros processos. Desta forma, de acordo com a ArcelorMittal Brasil (2015a), as principais aplicações da escória da aciaria LD são como cobertura de pátios, cimento, base e sub-base rodoviária, *rip rap*, lastro ferroviário, corretivo agrícola, concreto, reciclagem nos processos siderúrgicos, tratamento anti-pó, gabiões, drenos rodoviários, capa asfáltica, aterro, jateamento de estruturas, berços de rios e tratamento de águas ácidas.

2.2 Resíduos Sólidos

A classificação de resíduos compreende a identificação do processo ou atividade que lhes originou, seus constituintes e suas características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias, para as quais se conhece o impacto à saúde e ao meio ambiente. Dessa forma, de acordo com a norma brasileira NBR 10004, os resíduos podem ser classificados em resíduos classe I – perigosos e resíduos classe II - não perigosos; que são subdivididos em resíduos classe II A - não inertes e resíduos classe II B – inertes (ABNT, 2004a).

Os resíduos classe I são aqueles que apresentam periculosidade, ou seja, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas podem oferecer risco à saúde pública e ao meio ambiente, quando gerenciados de forma incorreta; ou quando apresentam uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Os resíduos classe II A - não inertes são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe II B, podendo ter como propriedades a biodegradabilidade, a combustibilidade ou a solubilidade em água (ABNT, 2004a).

Já os resíduos classe II B são aqueles que quando amostrados, segundo a NBR 10007 (que tem como objetivo fixar os requisitos exigíveis para a amostragem de resíduos sólidos), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme a NBR 10006 (que objetiva fixar os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, com o intuito de distinguir os resíduos classificados como não inertes e inertes), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água vigentes, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor (ABNT, 2004a, 2004b, 2004c).

Quanto à periculosidade, a Lei nº 12.305/2010 classifica os resíduos sólidos em resíduos perigosos, que são aqueles que por conta de suas propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, podem apresentar risco à saúde pública ou à qualidade ambiental; e resíduos não perigosos, que são aqueles não enquadrados nos resíduos perigosos (BRASIL, 2010).

3 METODOLOGIA

Para a elaboração desta pesquisa foram analisados documentos internos da ArcelorMittal Monlevade S.A. referentes ao repasse da escória da aciaria realizado por esta à empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda. no período compreendido entre os meses de maio de 2014 e abril de 2015; ao repasse do agregado siderúrgico realizado pela empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda. nesse mesmo período; e aos ensaios de caracterização química e ambiental deste resíduo.

O município de João Monlevade, dista cerca de 120km de Belo Horizonte e está localizado na porção centro-leste do estado de Minas Gerais. Salienta-se que a ArcelorMittal Monlevade é a principal siderúrgica da ArcelorMittal Aços Longos e a única da América Latina a possuir instalações e processos apropriados para a fabricação de aço para reforço de pneus radiais (*steel cord*). Além disso, sua

produção é repassada aos clientes internacionais, ao mercado nacional e as trefilarias do Grupo ArcelorMittal (ARCELORMITTAL BRASIL, 2015b).

A empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda., que possui como atividade econômica principal a recuperação de materiais metálicos, exceto alumínio, recebe a escória da aciaria, gerada na ArcelorMittal Monlevade S.A. para promover o beneficiamento deste resíduo e, posteriormente, repassa o agregado siderúrgico para a empresa de Transportes Debisa Ltda. (a qual realiza transporte rodoviário de carga, exceto produtos perigosos e mudança); Prefeitura Municipal de Bela Vista de Minas; ArcelorMittal Mina do Andrade S.A. (atuante na extração de minério) e ArcelorMittal BioFlorestas S.A. (responsável pela produção de carvão vegetal a partir de eucalipto), as quais utilizam este material como base ou sub-base em obras de pavimentação de vias (ARCELORMITTAL MONLEVADE, 2015a).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ano de 2014 foram produzidas aproximadamente 1.100.000 toneladas de aço líquido na ArcelorMittal Monlevade S.A., sendo que a geração de escória da aciaria corresponde a 13% deste valor, ou seja, 143.000 toneladas, representando uma geração de escória da aciaria de cerca de 12.000 toneladas por mês. Salienta-se, contudo, que o valor correspondente à geração de escória da aciaria é considerado apenas uma estimativa, visto que não há pesagem desta na empresa.

Essa quantidade de escória gerada na ArcelorMittal Monlevade S.A. era repassada para a empresa Harsco Metals Ltda., responsável pela recuperação de conteúdos metálicos das escórias da aciaria. Porém, a partir do dia 01 de janeiro de 2015 este serviço começou a ser realizado pela P.H. Transportes e Construções Ltda., responsável pela movimentação industrial e manipulação de metálicos. A P.H. Transportes e Construções Ltda. recolhe a escória da aciaria e a transporta para a planta de beneficiamento, onde ocorre a separação da sucata (material contendo alto teor de ferro) que é vendida à ArcelorMittal Monlevade S.A. para ser reutilizada no processo de aciaria, já o restante desse material é repassado à empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda.

Destaca-se que o beneficiamento realizado pela P.H. Transportes e Construções Ltda. consiste no resfriamento da escória e posterior separação de grandes placas metálicas por um eletroímã, sendo que o material metálico selecionado retorna ao processo de fabricação do aço como sucata.

Durante o período compreendido entre os meses de maio de 2014 e abril de 2015, após o beneficiamento realizado pela Harsco Metals Ltda. ou P.H. Transportes e Construções Ltda., 122.917,7 toneladas de escória da aciaria foram repassadas à empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda., que realizou um novo beneficiamento deste material, visando a separação em agregado siderúrgico e sucata metálica, sendo que esta última é vendida somente à ArcelorMittal Monlevade S.A. (ARCELORMITTAL MONLEVADE, 2015a). Esta nova sequência de beneficiamento se faz necessária visto que a P.H. Transportes e Construções Ltda. separa somente o material com teor de ferro mais elevado.

Verifica-se, no Gráfico 1, que a média da quantidade de escória repassada à empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda. pela ArcelorMittal Monlevade S.A. no período analisado corresponde a 10.243,14 toneladas, sendo que o maior repasse ocorreu no mês de julho de 2014 (cerca de 13.362,51 toneladas) e o menor no mês de março de 2015 (totalizando 7.326,44 toneladas). Vale ressaltar que no período analisado houve uma transição de empresas responsáveis pelo beneficiamento inicial da escória, visto que no ano de 2014 esta atividade era realizada pela Harsco Metals Ltda. e no ano de 2015 começou a ser feita pela P.H. Transportes e Construções Ltda.

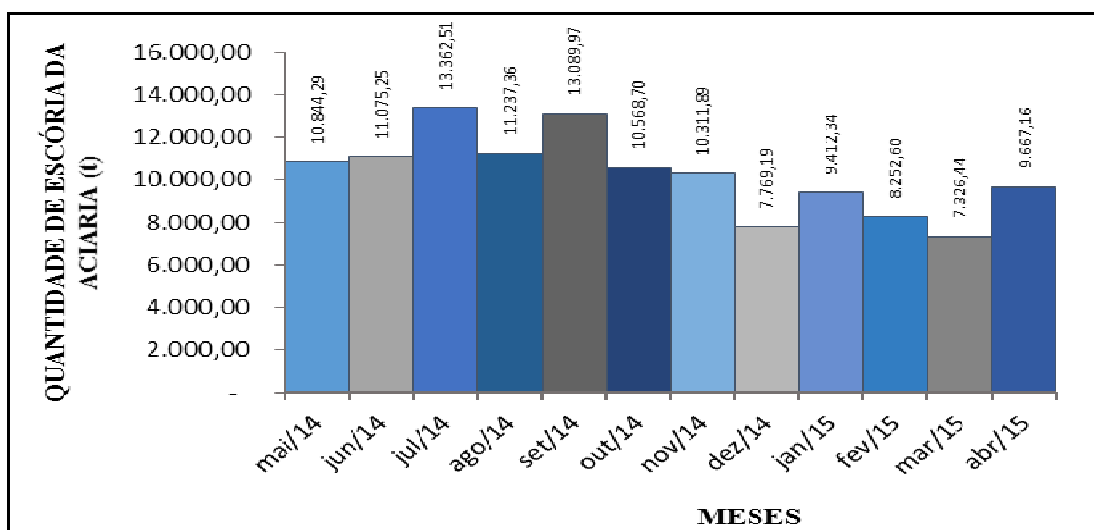


Gráfico 1: Quantidade mensal de escória da aciaria repassada à empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda. pela ArcelorMittal Monlevade S.A., durante o período compreendido entre os meses de maio de 2014 e abril de 2015

Fonte: Adaptado de ARCELORMITTAL MONLEVADE, 2015b.

A soma da quantidade de agregado siderúrgico repassado pela empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda. às empresas ArcelorMittal BioFlorestas S.A.; ArcelorMittal Mina do Andrade S.A. e ArcelorMittal Monlevade S.A.; Transportes Debisa Ltda. e Prefeitura Municipal de Bela Vista de Minas após o beneficiamento, durante o período compreendido entre os meses de maio de 2014 e abril de 2015, totalizou um valor de 13.192,18 toneladas.

Desta forma, verificou-se que a ArcelorMittal Monlevade S.A. recebe 65,18% de agregado siderúrgico da empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda., o que corresponde a 8.598,66 toneladas; a ArcelorMittal Mina do Andrade S.A. adquire 3.642,36 toneladas (27,61% do total de agregado siderúrgico); a ArcelorMittal BioFlorestas S.A. obtém cerca de 773,06 toneladas (5,86%) e a Prefeitura de Bela Vista de Minas e Transportes Debisa Ltda., recebem juntas, 178,09 toneladas, respectivamente 0,92% e 0,43% do total de agregado siderúrgico.

Todas estas empresas utilizaram o agregado siderúrgico como base ou sub-base em obras de pavimentação de vias. Além disso, a ArcelorMittal Monlevade S.A. também empregou este agregado para a construção de células no Aterro Industrial e para o recobrimento do conversor LD da aciaria (ARCELORMITTAL MONLEVADE, 2015a).

Destaca-se ainda que a ArcelorMittal Monlevade S.A. testou a aplicação da escória da aciaria beneficiada (agregado siderúrgico) e argila na pavimentação do Pátio Norte, localizado próximo à área do alto-forno da própria empresa. Entretanto, nesta aplicação, notou-se que a não conformidade granulométrica acarretava em um piso irregular e indesejável, fazendo-se necessária a retirada do material não conforme e reaplicação do material com granulometria correta.

4.1. Aplicação de agregado siderúrgico produzido através de escória de aciaria na pavimentação de rodovias brasileiras

De acordo com a norma brasileira NBR 16364, um agregado siderúrgico é o material resultante da produção e refino do aço, constituído por óxidos e silicatos, com alta resistência ao desgaste, empregado em obras de pavimentação, entre outras, com as mesmas funções dos agregados naturais não renováveis (ABNT, 2015).

Como requisitos gerais, a NBR 16364 relata que o agregado siderúrgico deve estar isento de solo vegetal, matéria orgânica, grãos ou fragmentos que são facilmente alterados pelo intemperismo, substâncias nocivas e impurezas. Além disso, não é permitida a realização de obras com esse agregado, em dias chuvosos e cabe ao executante a preservação dos serviços e materiais contra a ação da chuva, do trânsito, entre outros aspectos que possam danificá-los (ABNT, 2015).

Segundo informações internas da ArcelorMittal Monlevade S.A. (2015b), a NBR 16364 é importante para as unidades de aços longos do grupo ArcelorMittal S.A., uma vez que essa norma respalda tecnicamente o uso do agregado siderúrgico produzido a partir da escória de aciaria na pavimentação de ruas e também possibilita ao grupo participar das concorrências do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), responsável por contratar as principais obras viárias do Brasil. Com isso, há um avanço no reconhecimento das qualidades técnicas das escórias de aciaria para a aplicação em rodovias de alto tráfego na forma de agregado siderúrgico.

Ainda, de acordo com informações internas da ArcelorMittal Monlevade S.A. (2015b), o agregado siderúrgico é produzido em cinco unidades da ArcelorMittal Brasil S.A., localizadas nas usinas de João Monlevade (MG), Juiz de Fora (MG), Piracicaba (SP) e Cariacica (ES), que estão realizando adequações para atender à essa norma, além de Tubarão (SC), que já produz a Acerita®, coproduto normalizado.

Ademais, está em desenvolvimento junto ao DNIT a aplicação do agregado siderúrgico em dois trechos-teste, sendo um na rodovia BR-120 (que liga os estados do RJ e MG), com fornecimento da ArcelorMittal Juiz de Fora S.A., e o outro, em um trecho da BR-381 (responsável pela ligação entre os estados de SP, MG e ES), com fornecimento da ArcelorMittal Tubarão S.A., quando será possível verificar seu desempenho em comparação à brita, material tradicionalmente empregado neste tipo de obra.

4.2 Caracterização química e ambiental da escória da aciaria

Para aplicação das escórias da aciaria como base e sub-base devem ser levados em consideração o tamanho e a forma das partículas; a análise granulométrica; o limite de consistência, que descreve o comportamento do material fino na presença de água; a massa específica dos sólidos; a absorção; a compactação; a resistência ao desgaste; a desintegração e o Índice de Suporte Califórnia, que é a capacidade de suporte de um solo compactado (CANTARINO, 2007).

As caracterizações física, química e ambiental (ensaio de lixiviação e solubilização) da escória da aciaria são procedimentos necessários para analisar os aspectos positivos e negativos da utilização desse resíduo para a pavimentação e também para propor medidas adequadas de destinação e/ou disposição final.

Dessa forma, os ensaios de caracterização física contribuem para o conhecimento detalhado da escória da aciaria, permitindo a elaboração de procedimentos e normas para o lastro ferroviário com o agregado siderúrgico (PACHECO, 2006). Nesta pesquisa não foram obtidos dados da ArcelorMittal Monlevade S.A. referentes aos ensaios de caracterização física, contudo, as informações bibliográficas disponíveis envolvendo a caracterização da escória da aciaria da usina de João Monlevade, permitem ressaltar suas principais propriedades físicas, as quais são importantes para a utilização desse material como base.

Em geral, as escórias de aciaria possuem massa específica de cerca de 3g/cm^3 , textura superficial áspera, forma angular e teor de absorção de água menor que 3% da massa total (MANCIO, 2001). Além disso, ressalta-se que as propriedades físicas das escórias da aciaria vêm sendo comparadas com agregados naturais e com especificações para a aplicação em pavimentação (CANTARINO, 2007).

Desse modo, a Tabela 1 permite a comparação de algumas propriedades físicas do basalto, do granito e do agregado siderúrgico da antiga Belgo Mineira-João Monlevade.

Tabela 1: Comparação de propriedades físicas entre o agregado siderúrgico da Belgo Mineira-João Monlevade, o basalto e o granito

Propriedades	Tipo de agregado		
	Escória da aciaria da Belgo-Mineira João Monlevade	Basalto	Granito
Massa específica de sólidos (g/cm ³)	3,08	2,8 - 3,1	2,6 - 2,8
Determinação da resistência ao impacto em agregados britados ((8-12 mm) (% massa))	---	9 - 20	12 - 27
Absorção de água (% massa)	1,74	< 0,5	0,3 - 1,2
Resistência ao congelamento e degelo (% massa)	---	≤ 1,0	0,8 - 2,0
Abrasão Los Angeles (% massa)	24,5	---	15 - 20
Valores de polimento de rocha (PSV)	---	45 - 55	45 - 55
Resistência à britagem	---	> 250	> 120

Fonte: Adaptado de GEISELER, 1996 *apud* CANTARINO, 2007; PACHECO, 2006.

De acordo com a norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER (1998), a abrasão “Los Angeles” de um agregado é o desgaste sofrido por este, quando posicionado na máquina “Los Angeles” junto com uma carga abrasiva, à velocidade de 30 rpm a 33 rpm. Com isso, mensura-se o desgaste de um agregado por abrasão através da colisão entre agregados e esferas de aço.

Percebe-se na Tabela 1 que o agregado siderúrgico da Belgo Mineira-João Monlevade possui massa específica de sólidos e absorção de água superiores àqueles observados para o basalto e o granito e maior abrasão “Los Angeles” do que o granito.

Na Tabela 2 tem-se os resultados da faixa de valores das principais propriedades físicas do agregado siderúrgico encontrado na Belgo-Mineira João Monlevade e a faixa de valores especificados pela NBR 5564: 1991 - Via férrea - Lastro padrão, que define as condições exigíveis ao lastro-padrão para via férrea e também para outros tipos de lastro de pedra (camada de pedra britada que fica entre os dormentes e o sub lastro) na falta de especificação própria (ABNT, 1991).

Tabela 2: Comparação das propriedades físicas entre o agregado siderúrgico da Belgo Mineira-João Monlevade e a NBR 5564:1991

Propriedades	Agregado siderúrgico da Belgo-Mineira João Monlevade	NBR 5564: 1991
Massa específica (g/cm ³)	3,08	≥ 2,4
Massa unitária (g/cm ³)	1,814	---
Abrasão Los Angeles (%)	24,5	≤ 40
Absorção de água (%)	1,74	≤ 1
Índice de forma	cúbica	cúbica
Resistência ao choque "TRETON" (%)	6,43	≤ 20
Porosidade aparente (%)	3,01	≤ 1
Teor de partículas macias e friáveis (%)	isento	≤ 5
Impurezas orgânicas (%)	isento	---
Resistência ao esmagamento (%)	19	---
Teor de argila (%)	isento	≤ 0,5
Teor de material pulverulento (%)	isento	≤ 1

Fonte: Adaptado de ABNT, 1991; PACHECO, 2006.

Vale ressaltar que a determinação da resistência ao choque "Tetron" segue o procedimento do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER - Método de Ensaio 399: 1999 - Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton (BARBOSA, 2013).

Nota-se na Tabela 2 que o agregado siderúrgico da Belgo Mineira-João Monlevade possui apenas as propriedades de absorção de água e porosidade aparente superiores àquela observada para a NBR 5564, sendo que todas as outras propriedades se enquadram nesta norma, demonstrando o potencial da utilização do agregado siderúrgico como lastro em via férrea.

Neste sentido, Klinevicius (2011) destaca que o nível de saturação no qual se apresenta o material de lastro varia segundo a sua localização e o clima da região, logo independe das características do material, porém, agregados com maiores vazios internos estão mais susceptíveis a deterioração, através da ação da água, por absorvê-la em maior quantidade.

Assim, a degradação dos fragmentos de lastro na presença de água acontece devido às propriedades individuais dos fragmentos, mas ainda pela presença de

materiais externos que são lançados na ferrovia, sendo que elementos como o enxofre podem aumentar a acidez do meio, provocando uma deterioração mais rápida de agregados de calcário (RAYMOND, 1995 *apud* KLINCEVICIUS, 2011). Já, a presença de água nos poros pode modificar o volume, a porosidade, e a resistência dos elementos constituintes, alterando o comportamento mecânico das camadas de rochas ou de solos (BELL; CRIPPS; CULSHAW, 1986 *apud* KLINCEVICIUS, 2011).

4.3. Caracterização química da escória da aciaria

Ao longo do processo de produção do aço são retirados o carbono, a cal (CaO), e os íons de alumínio, silício e fósforo, os quais correspondem aos elementos e compostos que determinam a composição da escória de aciaria. Assim, entre os compostos que constituem essa escória estão o dióxido de silício (SiO₂), o silicato de cálcio (CaSiO₃), o óxido de magnésio (MgO), a ferrita cálcica (CaFe₂O₄), além de altos teores de óxido de cálcio ou cal e MgO livres. Vale ressaltar que a composição da escória da aciaria é resultante de diferentes fatores como o processo ou modelo de forno empregado no beneficiamento do aço, a matéria-prima utilizada, as particularidades do aço fabricado e o resfriamento do rejeito (BRANCO, 2004).

Na Tabela 3 tem-se a comparação entre as faixas de composição das escórias das aciarias LD brasileiras e da ArcelorMittal Monlevade S.A., podendo-se notar que os valores desta última estão na faixa de teores verificada para as escórias de outras siderurgias brasileiras, exceto os componentes pentóxido de fósforo (P₂O₅) e CaO/SiO₂.

Tabela 3: Comparação entre as faixas de composição química das escórias de aciarias LD brasileiras e da ArcelorMittal Monlevade S.A.

Componentes	Composição das escórias das aciarias LD brasileiras (%)	Composição da escória da aciaria da ArcelorMittal Monlevade S.A. (%)
CaO	6-45	42
SiO ₂	7-16	14
MgO	1-9	6
Al ₂ O ₃	1-4	3
FeO	8-30	---
MnO	3-7	6
CaO livre	0-8	---
P ₂ O ₅	1,6	2
S	0,13	---
Cr ₂ O ₃	0,35	---
i=CaO/SiO ₂	0,86-2,8	3

Fonte: Adaptado de GUMIERE, 2000 *apud* GEYER, 2001; ARCELOR BRASIL, 2006.

De acordo com a Arcelor Brasil (2006), além da cal, da sílica, do óxido de magnésio, do óxido de alumínio ou alumina (Al₂O₃), do óxido de manganês (MnO) e do pentóxido de fósforo, a escória da aciaria da ArcelorMittal Monlevade S.A. é composta por 19% de ferro total e 6% de trióxido de dimanganês (Mn₂O₃), sendo que todos estes valores são parâmetros de controle da aciaria, e que podem variar dependendo do produto final.

De acordo com Branco (2004), a utilização da escória da aciaria LD na pavimentação possui algumas desvantagens, dentre elas a expansibilidade acarretada pela cal e pelo óxido de manganês, que provoca menor duração do produto final. Além destes compostos, as impurezas orgânicas, as argilas, os finos, os sulfatos e os cloretos podem ocasionar a instabilidade volumétrica, o aumento do consumo de água e no tempo de pega (GEYER, 2001). Por outro lado, como benefícios, a escória promove o aumento na resistência à compressão (NASCIMENTO, 2003).

Além dos aspectos relacionados ao comportamento físico-químico da escória da aciaria, as análises de lixiviação e solubilização são importantes para a avaliação dos impactos que este material pode desencadear no meio ambiente.

4.4. Ensaio de lixiviação e solubilização da escória da aciaria

De acordo com a Universidade da Amazônia (2007), a escória da aciaria é avaliada com o intuito de verificar seu potencial de contaminação através dos ensaios de lixiviação e solubilização, conforme a NBR 10005 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e a NBR 10006 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Os valores obtidos com esses ensaios são ainda comparados aos limites fornecidos pela NBR 10004 – Classificação dos Resíduos Sólidos (ARCELORMITTAL MONLEVADE, 2015c, 2015d).

De acordo com ProjeControl (2009) a lixiviação é o processo que estabelece a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas existentes no resíduo, através de dissolução no meio extrator; já a solubilização é o processo de dissolução de um produto ou substância. Desse modo, o ensaio de lixiviação visa classificar o resíduo como perigoso (classe I) ou não perigoso (classe II); e o ensaio de solubilização tem como objetivo subdividir o resíduo da classe II em não inerte (classe II A) e inerte (classe II B).

As Tabelas 4 e 5, referem-se aos relatórios de ensaio de lixiviação e solubilização da amostra de escória da aciaria da ArcelorMittal Monlevade S.A., coletada no dia 05 de dezembro de 2014, após o beneficiamento realizado pela Harsco Metals Ltda. Faz-se importante destacar que o limite de quantificação refere-se à menor concentração que pode ser obtida dentro dos limites de precisão do método de análise empregado.

Tabela 4: Relatório de ensaio de lixiviação da escória da aciaria da ArcelorMittal Monlevade S.A.

Parâmetros	Unidade	Limite de Quantificação	Resultados analíticos	Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 - Anexo F
Arsênio	mg/l	0,01	< 0,01	1
Bário	mg/l	0,01	0,463	70
Cádmio	mg/l	0,001	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/l	0,01	< 0,01	1
Prata	mg/l	0,01	< 0,01	5
Selênio	mg/l	0,008	< 0,008	1
Mercúrio	mg/l	0,000075	< 0,00008	0,1
Fluoreto	mg/l	5	85,5	150
Solução de extração	---	---	1	---
pH Final do Lixiviado	---	---	7,2	---
Tempo de Lixiviação	horas	---	18	16-20
Cromo	mg/l	0,01	< 0,01	5

Fonte: ARCELORMITTAL MONLEVADE, 2015c, p. 1.

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 4, verifica-se que nenhum dos parâmetros excedeu os limites máximos estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a), demonstrando que a escória da aciaria em análise não é classificada como um resíduo perigoso.

Por sua vez, na Tabela 5, são apresentados os resultados obtidos através do ensaio de solubilização da escória da aciaria, a fim de se classificar este resíduo como não inerte ou inerte.

Tabela 5: Relatório de ensaio de solubilização da escória da aciaria da ArcelorMittal Monlevade S.A.

Parâmetros	Unidade	Limite de Quantificação	Resultados analíticos	Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 - Anexo G
Alumínio	mg/l	0,01	0,591	0,2
Arsênio	mg/l	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/l	0,01	0,104	0,7
Cádmio	mg/l	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/l	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/l	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/l	2,5	< 2,5	250
Cobre	mg/l	0,005	< 0,005	2
Cromo	mg/l	0,01	< 0,01	0,05
Ferro	mg/l	0,01	< 0,01	0,3
Fluoreto	mg/l	0,1	0,74	1,5
Manganês	mg/l	0,01	< 0,01	0,1
Mercúrio	mg/l	0,000075	< 0,00008	0,001
Nitrato	mg/l	0,5	< 0,5	10
Prata	mg/l	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/l	0,008	< 0,008	0,01
Sódio	mg/l	0,5	3,59	200
Sulfato	mg/l	2,5	< 2,5	250
Zinco	mg/l	0,01	< 0,01	5
pH Final do Solubilizado	---	0-14	10,7	---
Cromo Trivalente	mg/l	0,01	< 0,01	---
Cromo Hexavalente	mg/l	0,01	< 0,01	---
Cromo Total	µg/l	10	< 10	---

Legenda: Em negrito, o valor que ultrapassou os valores máximos permitidos pela NBR 10004: 2004.
 Fonte: ARCELORMITTAL MONLEVADE, 2015d, p. 1.

Quando considerados os resultados referentes ao ensaio de solubilização apresentados na Tabela 5, verifica-se que o parâmetro alumínio foi o único a exceder o limite máximo estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 2004a), levando à classificação da escória como um resíduo do tipo II A – não inerte.

Salienta-se que, nas situações nas quais os parâmetros dos testes de lixiviação e solubilização não excedem os limites máximos permitidos pela NBR

10004 (ABNT, 2004a), o resíduo é classificado como II B – inerte. Além disso, a classificação dos resíduos sólidos industriais é necessária para promover a correta destinação e/ou disposição destes resíduos, além de prevenir impactos negativos ao meio ambiente e à saúde pública.

4.5. Alternativas ambientalmente viáveis para reaproveitamento da escória de aciaria LD

Através dos ensaios de lixiviação e solubilização e da análise química da escória de aciaria LD percebeu-se que os metais presentes nesta escória podem se lixiviar e solubilizar em águas subterrâneas ou superficiais, visto que o parâmetro alumínio ultrapassou o valor máximo permitido pela NBR 10004 (ABNT, 2004a), evidenciando a importância do monitoramento deste resíduo.

Segundo Cantarino (2007), a não valorização das questões ambientais pelas indústrias tem se traduzido no aumento dos custos, perda de posição no mercado e suspensão das atividades, devido ao não cumprimento da legislação ambiental, cada vez mais restritiva. Ressalta-se ainda que a proteção ao meio ambiente tem se tornado uma oportunidade de abertura de novos mercados.

O beneficiamento da escória da aciaria realizado pela empresa de Beneficiamento e Reciclagem Collares Ltda. tem como objetivo o tratamento desta para ser reutilizada como base e sub-base de pavimentação de vias; confecção de células no Aterro Industrial; recobrimento do conversor LD; e principalmente, a reciclagem da sucata metálica, na qual o rejeito da indústria siderúrgica volta a ser inserido no processo produtivo como um agregado siderúrgico. Faz-se importante destacar as aplicações da escória de aciaria no nivelamento terrestre, para uso agrônômico, cimento e lastro rodoviário.

Ademais, a reutilização da escória de aciaria mostra-se benéfica ao meio ambiente por promover a substituição de substâncias não metálicas, como basalto e granito, minimizando o consumo destes recursos naturais primários e não renováveis e a quantidade de material a ser disposto em aterros ou estocado em pilhas de rejeito. Contudo, salienta-se que, apesar de todas essas vantagens, deve-se ter um controle contínuo deste resíduo, através de ensaios de lixiviação e solubilização, de modo a evitar possíveis contaminações do solo e da água.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos atuais de produção das siderúrgicas geram grande quantidade de resíduos sólidos, fazendo-se necessário o reaproveitamento destes resíduos no próprio processo produtivo, para que haja menor extração de recursos naturais não renováveis.

De maneira geral, o agregado siderúrgico, advindo da escória da aciaria, possui várias aplicações como bases de estradas, nivelamento terrestre, uso agrônômico, cimento e lastro ferroviário e rodoviário, sendo necessário que as siderúrgicas invistam na eficiência do beneficiamento desta escória, visando primeiramente o aproveitamento da sucata metálica no próprio processo produtivo e posteriormente, em uma logística de repasse do agregado siderúrgico, com intuito de minimizar a disposição final deste e promover concorrências de licitações de venda do agregado siderúrgico pelas indústrias siderúrgicas.

A partir da análise dos resultados apresentados no ensaio de lixiviação verificou-se que a escória da aciaria em análise não é classificada como um resíduo perigoso. Quando considerados os resultados referentes ao ensaio de solubilização verificou-se que o parâmetro alumínio excedeu o limite máximo estabelecido pela NBR 10004, levando à classificação da escória da aciaria como um resíduo do tipo II A – não inerte.

Ademais, a reutilização da escória de aciaria mostra-se benéfica ao meio ambiente por promover a substituição de substâncias não metálicas, diminuindo o consumo de recursos naturais primários e não renováveis e a quantidade de material a ser disposto em aterros. Destaca-se que, apesar dessas vantagens, deve-se ter um monitoramento contínuo deste resíduo, para que não desencadeie impactos ambientais quando presentes substâncias solúveis e tóxicas.

EVALUATION THE POTENTIAL OF THE LD STEEL SLAG RECYCLING AS STEEL AGGREGATE

ABSTRACT

The large amount of industrial solid wastes, caused by industrial development, has become a worldwide problem, awakening an interest in promoting technologies for the increase of efficiency of production processes with respect to minimizing the generation and reuse of this waste. In this context, this study aimed to evaluate the potential of the LD steel slag recycling as steel aggregate through the analysis of internal documents of ArcelorMittal Monlevade S.A. Thus, the chemical characterization of the steel slag produced at ArcelorMittal Monlevade S.A. revealed the presence of 42% lime, 19% total iron, 14% silica, 6% magnesium oxide, 6% manganese oxide, 6% trioxide dimanganês, 3% alumina and 2% of phosphorus pentoxide. The analysis of results obtained in leaching and solubilization tests showed that the steel slag was classified as a waste type II A - not inert. Moreover, it is noted that the reuse of steel slag shows beneficial to the environment to promote the substitution of non-metallic substances.

Keywords: Steel slag beneficiation. Environmental impacts. Solid waste in steel industry.

REFERÊNCIAS

ARCELOR BRASIL. 2006. Documento interno: Utilização da escória de aciaria LD da Belgo - Usina de Monlevade.

ARCELORMITTAL BRASIL. ArcelorMittal Monlevade. 2015a. Disponível em: <https://www.belgo.com.br/setores/siderurgia/unidades_industriais/usina_monlevade/usina_monlevade.asp>. Acesso em: 24 out. 2015.

ARCELORMITTAL BRASIL. Escória de aciaria LD. 2015b. Disponível em: <http://tubarao.arcelormittal.com/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_aciaria_ld/introducao.asp>. Acesso em: 28 mai. 2015.

ARCELORMITTAL MONLEVADE. 2015a. Documento interno: Coprodutos recebem certificação da ABNT para pavimentação de vias.

ARCELORMITTAL MONLEVADE. 2015b. Documento interno: Lista consolidada do repasse semestral de escória de aciaria a terceiros.

ARCELORMITTAL MONLEVADE. 2015c. Documento interno: Relatório de Ensaio - Escória da Aciaria - Extrato Lixiviado.

ARCELORMITTAL MONLEVADE. 2015d. Documento interno: Relatório de Ensaio - Escória da Aciaria - Extrato Solubilizado.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 5564: 1991 - Via férrea - Lastro-padrão. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 10004: 2004 – Resíduos Sólidos (Classificação). Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 10006: 2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 10007: 2004 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 16364: 2015 – Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

BARBOSA, M. R. Caracterização geoambiental da escória de aciaria de cinco estados brasileiros. Ouro Preto, MG. 2013. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica), Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <http://200.131.208.43/bitstream/123456789/3317/1/DISSERTAÇÃO_CaracterizaçãoGeoambientalEscórias.pdf>. Acesso: 08 mai. 2015.

BRANCO, V.T.F. C. Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso: 16 mar. 2015.

CANTARINO, M. V. Estudo sobre o uso de escória de aciarias elétrica e LD para aplicações como base e sub-base asfálticas. Belo Horizonte, MG. 2007. Monografia (Pós- Graduação em Tecnologia Ambiental), Universidade Federal de Minas Gerais.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. BNDES Setorial, n. 41, p. 181-236, 2015. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4287/1/BS%2041%20Sustentabilidade%20da%20siderurgia%20brasileira_.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2015.

COSTA, J. G. S. Aspectos técnicos da utilização da lama de aciaria em processo siderúrgico, tratada por processo de sinterização. Coronel Fabriciano, MG. 2010. 48 f. Monografia (Pós-graduação em Gestão Ambiental), Centro Universitário do Leste de Minas.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – Método de Ensaio 035: 1998 – Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

GEYER, R. M. T. Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto. Porto Alegre, RS. 2001. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1508/000300433.pdf?sequence=1&locale=pt_BR>. Acesso em: 25 ago. 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Números de mercado. 2014a. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/numeros--mercado.asp>>. Acesso em: 26 abr. 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade 2014. 2014b. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Relatorio%20de%20Sustentabilidade_de_2014_web.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL. A marca Instituto Aço Brasil. 2015. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/instituto/marca.asp>>. Acesso em: 29 mar. 2015.

KLINCEVICIUS, M. G. Y. Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários. São Paulo, SP. 2011. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-27032012-121114/pt-br.php>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

MANCIO, M. Contribuição ao Estudo do Fenômeno da Instabilidade Volumétrica das Escórias de Aciaria Elétrica. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 2001.

NASCIMENTO, José Flávio do. Estudo da expansibilidade em escória de aciaria para uso em pavimentação rodoviária. 2003. 177f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte.

NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F., LEITE, F. P., TEIXEIRA, J. L., LEAL, P. G. L. Eficiência agrônômica de escórias da Siderúrgica Pains. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1993.

PACHECO, L. C. D. O estudo da escória de aciaria como agregado siderúrgico para uso em lastro ferroviário. Niterói, RJ. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <http://www.poscivil.uff.br/sites/default/files/dissertacao_tese/dissertadef.pdf>. Acesso: 03 nov. 2015.

PIAU, W. C. Viabilidade do uso de escórias como corretivo e fertilizantes. 1991. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 1991.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F.M.; NATALE, W. Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil: estudo na cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal: Funep, 2001. 67p.

PROJECNTROL. 2009. Relatório técnico de Caracterização de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/18018FE8/Relat_LixiviacaoAmiantoFibroci_mento_Rel031E09.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2015.

UNIVERSIDADE DA AMAZÔNIA. 2007. Estudo Pavimentação Asfáltica. Disponível em: <http://www.unama.br/graduacao/engenharia-civil/tccs/2007/estudo_pavimentacao_asfaltica.pdf>. Acesso em: 08 set. 2015.