

CARACTERIZAÇÃO E RECICLAGEM DE ESCÓRIA DE ACIARIA¹

Carlos Alberto Mendes Moraes²
Feliciane Andrade Brehm³

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar o estado da arte da caracterização e da reciclagem de escória de aciaria, seus sucessos e suas limitações ambientais e tecnológicas. Muitos trabalhos publicados mundialmente têm mostrado as diferentes áreas onde este resíduo sólido, considerado em algumas situações como perigoso por lixiviar metais pesados acima dos limites exigidos pela norma brasileira NBR 10004, mas geralmente como não-inerte, vem sendo estudado, com resultados positivos e negativos, desde aplicações simples a usos mais especiais. Os principais estudos de reciclagem das escórias de aciaria passam especialmente por dois setores construção civil (adição ou substituição de cimento – com limitação técnica em função de sua expansibilidade) e agricultura (fornecedor de compostos a base de silício) em termos de números de trabalhos publicados. Atualmente, o principal uso comercial para este tipo de escória siderúrgica é na fabricação de estrada seja como base e sub-base de pavimento asfáltico e também como adição à massa asfáltica.

Palavras-chaves: Escória de aciaria; Caracterização; Reciclagem.

CHARACTERIZATION AND RECYCLING OF STEELMAKING SLAG

Abstract

This work has the aim to analyze the state of art of the steelmaking slag characterization and recycling, its successes and its environmental and technological limitations. Several works published around the world have shown the different areas where this solid waste, considered in some situations as dangerous because of leaching heavy metals above the limit of the Brazilian Norm NBR 10004. However, generally, it is classified as non-inert, and has been studied with positive and negative results, since simple applications to complex ones. The main external recycling studies of steelmaking slags are in two sector, civil construction and agriculture in terms of published work numbers. Nowadays, the main commercial use of steelmaking slag is in the road construction, as base or sub-base of pavement, or addition as aggregate in asphalt.

Key words: Steelmaking slag; Characterization; Recycling.

¹ Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Membro da ABM, Prof. Dr. - Engenharia Mecânica - Núcleo de Caracterização de Materiais - Universidade do Vale do Rio dos Sinos/UNISINOS. Av. Unisinos, 950 São Leopoldo – RS, Brasil, CEP 93022-000; e-mail: cmoraes@unisinos.br

³ Profa. Dra. - Engenharia Mecânica - Núcleo de Caracterização de Materiais - Universidade do Vale do Rio dos Sinos/UNISINOS. Av. Unisinos, 950 São Leopoldo – RS, Brasil, CEP 93022-000, e-mail: felicianeb@unisinos.br

INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente onde vivemos vem tomando, nos últimos anos, uma importância crescente, mesmo que venha sendo, principalmente, por demanda de mercado sobre as indústrias exigindo delas melhor qualidade de produto, com menor custo e menor impacto ambiental. As interações entre estes 3 fatores tem sido bastante complexa, no sentido de alcançar os objetivos desejados. Vem se passando ao longo de décadas do total descaso e formação de lixões, para o controle de poluição e disposição em aterros controlados, seguindo pelo conceito de prevenção da poluição na fonte geradora, e que culmina nas técnicas de produção mais limpa como foco especial naqueles processos de fabricação cujo produto só tem qualidade se tem por trás um suposto resíduo de “qualidade”. Nestes casos os conceitos de minimização e reciclagem interna, como forma de solucionar na fonte o problema, consolidam-se. Mas ainda há casos, e muitos, de resíduos descartados que podem ser reciclados em outras aplicações antes da última e derradeira alternativa que é a disposição final. A partir deste conceito de produção mais limpa entra a abordagem da caracterização de resíduos industriais não somente para definir em termos de impacto ambiental se o mesmo será Classe I, IIA ou IIB (NBR 10004 – ABNT),⁽¹⁾ para certificar qual custo de aterro terá, mas avaliar possibilidades de minimização, otimização e até mudanças no processo gerador do mesmo. A caracterização química, estrutural, física e térmica, por exemplo, podem definir que áreas um resíduo pode ser utilizado em termos de reciclagem interna e externa valorizando este ambiental e economicamente transformando-o em sub-produto da empresa geradora.

No caso da indústria siderúrgica mundial, ao mesmo tempo em que recicla quase toda sucata de aço gerada, gera uma série de outros resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas durante o processo de fabricação do aço. Quanto aos resíduos sólidos, as siderúrgicas geram escória, pó, carepa e lama em várias etapas do processo, desde a redução do minério de ferro até a conformação mecânica do aço. Dentre estes resíduos sólidos, a escória e o pó são os mais gerados e, por conseguinte, os mais estudados em âmbito mundial. Como a escória de alto forno, possivelmente, outrora resíduo mais estudado é hoje um subproduto consagrado para as siderúrgicas integradas. Portanto, o presente trabalho analisa o estado da arte recente dos estudos envolvendo escórias de aciaria que ainda não têm soluções definitivas considerando características específicas de países, processos, exigências ambientais, usuários e obviamente fatores técnicos e econômicos para tornar estes resíduos como fontes de lucro de forma ambientalmente aceitável.

Escórias de aço já eram usadas em construção de estradas desde os tempos dos romanos. Todavia, o marketing e a manufatura comercial de produtos de escória são desenvolvimentos recentes. Os primeiros usos de escória relatados na Inglaterra datam do século XVIII e início do século XX.^(2,3) A razão principal para esta longa demora é que, no início, o fabricante de aço estava preocupado com o produto final, prestando muito pouca atenção à escória. A situação mudou drasticamente em tempos recentes, e escórias são, atualmente, subprodutos em potencial do processo, aceitos por muitos países industrializados como excelentes fontes de matérias-primas para a indústria de construção.⁽²⁾

Atualmente, devido às suas características físicas, as escórias têm apresentado especial valor para a indústria de construção civil. Porém, a escolha do

produto não depende somente das suas qualidades de engenharia; há também a preocupação com custo e segurança. Escórias satisfazem esses critérios, e têm uma característica adicional: sendo subprodutos do processo, elas são recursos renováveis, e, portanto, ambientalmente amigáveis na grande maioria dos casos.

Com o uso da escória se tornando cada vez mais corriqueiro, muitos pesquisadores têm concentrado seus estudos na tentativa de encontrar novos empregos para as escórias oriundas dos mais diversos tipos de processos de fabricação de aço, como será visto adiante.

No entanto, antes da utilização de um material, é necessário estudá-lo a fim de se determinar seus constituintes, sua estrutura e suas propriedades, para que possa ser possível definir em que campo de aplicação poderá ser empregado. Nesta etapa concentra-se a maior parte do trabalho dos pesquisadores das escórias, devido à complexidade do material e à sua heterogeneidade.

No caso da escória de alto-forno, esta já foi minuciosamente estudada, e o seu emprego se tornou consagrado (cimento de escória de alto forno – utilizado comercialmente na região sudeste – Tabela 1). Porém, das escórias geradas na produção de aço, tanto inoxidáveis como ao carbono ou baixa liga, via aciaria elétrica e a oxigênio, por outro lado, há muitos estudos, mas poucos usos comerciais. Isto tende a ocorrer devido a problemas de expansibilidade em função da presença de óxidos a base de cálcio, magnésio e ferro, e à limitação que a presença de óxido de cromo, no caso da produção de aço inoxidável, impõem ao seu emprego.

Tabela 1: Utilização de escória de alto forno no cimento.

Denominação	Sigla	Classe de Resistência (Mpa)	Componentes (% em massa)				Norma
			Clinker + Sulfato de Cálcio	Escória Granulada de Alto Forno	Material Pozolânico	Material Carbonático	
Cimento Portland Comum	CP I	25	100	0	0	0	NBR 5732/91
		32					
		40					
Cimento Portland Comum com Adição	CP I - S	25	99 - 95		De 1 a 5		NBR 5732/91
		32					
		40					
Cimento Portland Composto	com Escória	25	94 - 56	6 - 34	-	0 - 10	NBR 11578/91
		32					
		40					
	com Pozolana	25	94 - 76	-	6 - 14	6 - 10	
		32					
		40					
com Filler	25	94 - 90	-	-	6 - 10		
	32						
	40						
Cimento Portland de Alto Forno	CP III	25	65 - 25	35 - 70	-	0 - 5	NBR 5735/91
		32					
		40					
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	25	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736/91
		32					
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	34 / 7 dias	100 - 95	-	-	0 - 5	NBR 5733/91

CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA

Fujita⁽⁴⁾ e Fregeau-Wu⁽⁵⁾ caracterizaram escória como contendo três fases principais: ferrita dicálcica ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e wustita (FeO) ou magnésio-wustita [(Fe,Mg,Mn)O]. Soluções sólidas de wustita são as fases minerais predominantes nas escórias de aço.⁽⁴⁾ Silicato dicálcico forma a matriz. Os tamanhos de grão destas fases são variáveis. Em algumas regiões, os cristais são grandes e bem definidos. Na maior parte das áreas, entretanto, eles são finos e os contornos de grão são freqüentemente indistintos.⁽⁵⁾ No Slag Atlas⁽⁶⁾ é também afirmado que a composição mineral da escória do forno elétrico a arco é particularmente caracterizada por precipitados de silicato-dicálcico. Para basicidades mais baixas, precipitados de melilita (solução sólida de gehlenita - $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ - e akermanita - $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$) e merwinita ($3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$) ocorrem.

A cal apresenta uma alta solubilidade sólida na wustita, de cerca de 27% de CaO ⁽⁷⁾ o que, segundo Murphy,⁽⁸⁾ provoca a formação de silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).

De acordo com Zettermann,⁽⁹⁾ ao caracterizar escória gerada na produção de aço inoxidável via FEA, utilizando técnicas como microscopia ótica e eletrônica de varredura, análise química via ICP, e difração de raios-x; obteve-se os seguintes resultados:

- A escória, normalmente, apresenta estrutura majoritariamente cristalina, com poucas indicações de amorfismo.
- A fração metálica retida, observada visualmente, mas não detectada por difração, também atinge níveis microscópicos, o que pode vir a dificultar sua efetiva separação durante o processamento da escória. Também a níveis microscópicos pode ser constatada a porosidade da escória.
- Foi constatada a presença de quatro regiões distintas na escória de aço inoxidável:
 - A matriz é formada principalmente por cálcio e silício;
 - Fases poligonais, constituídas por óxido de cromo e magnésio (magnesiocromita);
 - Fases formadas por óxido de magnésio, que aparecem sempre envolvidas pela fase poligonal (comentário: o que pode gerar expansibilidade em função da fase rica em Mg em tempos longos);
 - Fase metálica retida;
- A fase poligonal, que normalmente apresenta uma textura uniforme, e por vezes demonstra uma aparência estriada, aparece até mesmo na amostra amorfa (comentário: parte da escória superficial que resfria mais rapidamente após vazamento das panelas nas baias), porém em dimensões reduzidas.
- A composição química parece exercer pouca influência sobre a estrutura da escória. Até mesmo grandes variações nos teores dos principais componentes da escória não provocam alterações significativas em suas características estruturais.
- Com exceção do cromo e magnésio, que formam fases separadas, os demais elementos ficam distribuídos uniformemente na matriz. Algumas fases foram identificadas por meio de análises de difração de raios-x, entretanto não foram detectadas por meio de MEV.
- O ferro se encontra praticamente todo na fase metálica. Pequenas concentrações ficam aleatoriamente distribuídas no restante da amostra.

De acordo com Polese et al.,⁽¹⁰⁾ a indústria da construção civil pode consumir este resíduo, mas, para que ele seja aplicado convenientemente, é necessário que suas características sejam conhecidas e, eventualmente, modificadas. Os autores, caracterizando escórias de aciaria elétrica e a oxigênio, usaram as seguintes técnicas: análise química, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura completada pela análise por EDS. Pela análise química, foi determinada a composição centesimal do material, em termos de óxidos; a difração de raios-X permitiu a identificação das fases cristalizadas presentes; as observações pelo MEV mostraram a textura, a profundidade de campo, as morfologias dos compostos e, com o auxílio da EDS, foram analisadas as fases presentes. Os resultados obtidos foram comparados entre si, de modo a caracterizar a microestrutura das escórias de aciaria. O estudo da microestrutura da escória de aciaria é fundamental, pois permite a identificação dos compostos susceptíveis à hidratação, à carbonatação e à oxidação, entre outros, que têm como resultado a expansão.

Graffitti et al.⁽¹¹⁾ caracterizando escória de aciaria elétrica da produção de aço ao carbono, estabilizadas em pilha ao longo do tempo, via análise química elementar, difração de raios-x, e análise térmica DTA/TG, mostraram que:

- ◆ As análises via DRX confirmaram a presença de compostos considerados expansivos.
- ◆ Dentre os métodos utilizados para a determinação de cálcio ligado ao CaO e Ca(OH)₂ livres, o mais eficaz foi o método de Franke.
- ◆ Os teores de cal livre foram inferiores a 1% em todas as amostras, confirmando o que normalmente é encontrado em escórias de aciaria elétrica.
- ◆ A combinação da análise térmica (DTA/TG/DTG) com a titulométrica mostrou-se fundamental para uma avaliação adequada do teor de cal livre em escórias de aciaria elétrica, embora não tenha permitido a determinação do teor deste composto em uma das amostras.

Osório et al.⁽¹²⁾ mostraram em outro trabalho com o mesmo resíduo, pelas análises químicas em ICP confirmaram as tendências de maior concentração de Fe na escória da pilha grossa (granulometria maior que 10" - inclusive ferro metálico) e Ca na pilha fina (granulometria menor que 10"). Com relação ao ferro, ficou confirmada, através da análise granulométrica (nos três primeiros meses de estabilização em pilhas) e das análises em lupa e em MEV (a partir deste período), a sua participação como importante agente expansivo na escória da pilha grossa, formando fissuras e desagregando a escória grossa.

Rojas e Rojas⁽¹³⁾ realizando uma avaliação química com relação a presença de compostos expansivos em escoria de forno elétrico a arco obtiveram as seguintes conclusões:

- Os principais óxidos presentes na escória de FEA são Fe₂O₃, CaO e SiO₂, representando 73% em massa, não houve mudança quando modificaram a granulometria das amostras.
- Do ponto de vista mineralógico, as escórias são compostas por constituintes altamente cristalinos, como wustita, manesioferrita, hematita, larnita, mervinita, guelenita e óxidos de manganês.

- Devido a sua alta cristalinidade, este resíduo nas condições de descarte não mostram atividade pozolânica, portanto a escória de aciaria resfriada ao ar não pode ser utilizada como adição ativa na fabricação de cimento e concreto.
- Ao mesmo tempo, seu uso como agregado é limitado em função da possibilidade de conter compostos expansivos (cal livre, sulfatos e cloretos). Neste trabalho os autores determinaram que estes compostos estão presentes em pequena quantidade ou nulos. Com relação ao MgO livre este foi menor que 1%.

Luxaân et al.⁽¹⁴⁾ caracterizaram escória de forno elétrico a arco utilizando microscopia ótica, ICP, difração de raios-x, microscopia eletrônica de varredura, e não encontraram fatores adversos para uso de escória em construção civil. Determinaram valores de MgO e CaO livres, sulfatos e sulfetos muito baixos apontando para uma estabilidade volumétrica.

Como os trabalhos anteriores mostram, a expansibilidade das escórias de aciaria (tanto elétrica como a oxigênio) está associada à presença de compostos de cálcio, magnésio e ferro presentes na escória descartada ou formados durante sua estabilização em pilhas em função de sua interação com sol, ventos e, principalmente, a chuva. Este fenômeno tem trazido problemas durante a reciclagem deste resíduo na construção civil, gerando trincas e rachaduras em pavimentos, calçadas e paredes. Neste sentido vários outros autores têm estudado este fenômeno no Brasil. Ao mesmo tempo, no exterior ele vem sendo utilizado a muitos anos em várias aplicações na construção civil sem mostrar problemas com o fenômeno da expansibilidade.

RECICLAGEM DE ESCÓRIA DE ACIARIA

Diferentemente do que ocorre com o pó de aciaria elétrica,⁽¹⁵⁾ em que majoritariamente os trabalhos desenvolvidos são relacionados a recuperação de metais deste, no caso da escória de aciaria tanto de aciaria elétrica como a oxigênio, a maioria dos trabalhos desenvolvidos nos últimos 10 anos estão relacionados à sua reciclagem junto a engenharia civil, a seguir na agricultura. Mais recentemente as escórias de aciaria têm sido estudadas para recuperação de metais, reuso nas siderúrgicas tanto como insumo na própria aciaria como na fabricação de sinter, até como insumo para despoluição de águas contaminadas. As Tabelas 2, 3, e 4 mostram alguns dos muitos estudos realizados, respectivamente, nas formas de reciclagem acima.

Na Tabela 2, pode-se observar que a maioria dos trabalhos exemplificados tratam da avaliação do fenômeno da expansibilidade sujeitas das escórias de aciaria (com maiores problemas relatados para o caso da escória de aciaria a oxigênio). Na maioria dos casos, pelo menos no Brasil, o fenômeno da expansibilidade tem sido responsável por várias pesquisas financiadas pelas siderúrgicas no estudo da estabilização das escórias, em pilhas, com processos acelerados, refusão e granulação (como no caso da escória de alto forno). Pelo menos um caso tem sido divulgado como produto, a ACERITA,⁽¹⁶⁾ escória estabilizada sendo comercializada para construção de estradas.

Tabela 2: Estudos sobre a aplicação de escória de aciaria na construção civil.

TRABALHO	ANO	PAÍS	TIPO DE ESCÓRIA	RECICLAGEM	PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO	OBSERVAÇÃO
Mikhail, e Turcotte ^{(17)*}	1995	Canadá	Aciaria	Construção de estrada	Térmica	Análise térmica e, ar seco e úmido e atmosfera CO/CO ₂ .
Tiifekqi et al. ⁽¹⁸⁾	1997	Turquia	Aciaria	Substituição ao cimento	Granulação	Área específica e necessidade de água nas misturas cimentícias são diferentes entre escória e cimento.
Iguchi ⁽¹⁹⁾	2001	Japão	AO, AE, AF	Material para construção de Estradas	-----	Estudo calorimétrico sobre hidratação de compostos de Cão - avaliar expansibilidade de escórias – influência do CaO.
Masiero ⁽²⁰⁾	2002	Brasil	AE	Substituição ao cimento	Granulação	escória estabilizada pela granulação (parcial), com efeito cimentante Resistência menor mas acima do mínimo.
Gumieri ⁽²¹⁾	2004	Brasil	AO	Substituição de clínquer de cimento	Granulação	escória estabilizada pela granulação, com efeito cimentante
Li et al. ⁽²²⁾	2004	China	Aciaria, AF	Adição ao cimento de aditivos minerais	-----	Relação entre resistência e porosidade em pasta de cimento
Xue et al. ⁽²³⁾	2006	China	AO	Adição ao asfalto	-----	Uso como agregado
Wu et al. ⁽²⁴⁾	2006	China	Aciaria	Adição a massa asfáltica	-----	Uso como agregado
Chaurand et al. ⁽²⁵⁾	2006	França	AO	Adição a massa asfáltica		Avaliação do impacto ambiental

Nota: AE: aciaria elétrica; AO: aciaria a oxigênio; AF: alto forno; Aciaria: não identificado pelo autor qual o processo.

*: estudou somente processo de estabilização para aplicação de escória na construção civil.

Tabela 3: Estudos de aplicação de escórias de aciaria na agricultura.

TRABALHO	ANO DE PUBLICAÇÃO	PAÍS	TIPO DE ESCÓRIA	APLICAÇÃO	OBSERVAÇÃO
Lopez et al. ⁽²⁶⁾	1995	Espanha	AO	Agente básico em solos para pasto	Fornecer compostos de cálcio
Prado et al. ⁽²⁷⁾	2002	Brasil	Aciaria	LIBERAÇÃO DE MICRONUTRIENTES DE UMA ESCÓRIA	APLICADA EM UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO CULTIVADO COM MUDAS DE GOIABEIRA
Prado et al. ⁽²⁸⁾	2003	Brasil	Aciaria	CORRETIVO DE ACIDEZ DO SOLO	RESPOSTA DE MUDAS DE GOIABEIRA
Pereira et al. ⁽²⁹⁾	2004	Brasil	AO, AE, AF	Fonte de silício	plantação de arroz

Tabela 4: outras aplicações.

AUTORES	ANO DE PUBLICAÇÃO	PAÍS	TIPO DE ESCÓRIA	RECICLAGEM	OBSERVAÇÃO
Li ⁽³⁰⁾	1999	Taiwan	AO	Degradação de 4-clorofenol	Mistura em meio ácido com peróxido de hidrogênio
Topkaya ⁽³¹⁾	2003	Turquia	AO	Separação magnética para uso no BOF, e sinter para AF.	Dimensão 10–50 mm → matéria-prima no AF. Pedacos magnéticos de 50–500 mm → conversor. Granulometria menor que 10 mm → fonte de ferro e fluxantes no sinter.
Jha et al. ⁽³²⁾	2004	Japão	Aciaria	Redução de poluentes em água contaminada	Escória ativada termicamente para Absorção de íons Ni ²⁺ , NH ₄ ⁺ and PO ₄ ³⁻
Chjou et al. ⁽³³⁾	2006	Taiwan	AO	Mineralização de orgânicos em solução aquosa na presença também de peróxido de hidrogênio.	Fonte de Ferro na decomposição de orgânicos em efluente líquido de indústria têxtil.
Kang ⁽³⁴⁾	2006	Coreia	AO	Decloração de tricloroeteno	Fonte de Fe ⁺²
Alanyali ⁽³⁵⁾	2006	Turquia	AO	Separação magnética para reciclagem de compostos em escórias	Recuperação de ferro para fusão em aciaria.
Teir et al. ⁽³⁶⁾	2007	Finlândia	AF, AE, AO	Produção de Carbonato de cálcio para uso industrial. (diminuição da geração de CO ₂)	Dissolução da escória em ácido acético.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No caso da escória de aciaria, os trabalhos mostrados denotam um caminho similar dado à escória de alto-forno, ou seja, a reciclagem externa na construção civil. Porém, observa-se que recentemente um leque maior de possibilidades de aplicação surgiram, em especial para a escória de aciaria a oxigênio.

Por outro lado, no Brasil estes estudos comparados com o desenvolvimento já alcançado, em especial, nos Estados Unidos, Canadá, Europa e Japão, mostram que o Brasil ainda tem muito a desenvolver em pesquisa para determinar qual ou quais aplicações são mais adequadas para cada resíduo. Neste sentido, o estudo de viabilidade de reciclagem de escória passa quase que necessariamente por uma análise de várias possibilidades de aplicação dos mesmos. Este desenvolvimento de viabilidades deve seguir diretriz específica envolvendo obrigatoriamente o gerador, o órgão ambiental regulador, o possível usuário do subproduto, e um ou mais grupos de pesquisa (interdisciplinar) responsáveis em fundamentar e avaliar as alternativas mais viáveis, técnica, econômica e ambientalmente.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos sólidos – Classificação: NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.
- 2 GUDENAU, H.W.; EL GAMMAL, A. Slag Recycling. In: TIMS/IEHK METALLURGICAL SYMPOSIUM, 1., 1997, Cairo. Proceedings... pp 17-28.
- 3 HOLLIDAY, K.A. Steel Slag: the high performance industrial aggregate. Steel World, v.2, n.1, p.11-14, 1997.
- 4 FUJITA, T., IWASAKI, I. Phosphorus removal from steelmaking slags slow-cooled in a non-oxidizing atmosphere by magnetic separation/flotation. I&SM, p.47-55, janeiro, 1989.
- 5 FREGEAU-WU, E.; PIGNOLET-BRANDOM, S.; IWASAKI, I. Liberation analysis of slow-cooled steelmaking slags: implicatrions for phosphorus removal. First International Conference on Processing Materials for Properties. The Minerals, Metals & Materials Society, p.153-156,1993.
- 6 Slag Atlas. Verlag Stahleisen GmbH. 2ed. Düsseldorf: VDEh, 1995. 616p.
- 7 NELSON, L. Determination of the possible causes of a foaming slag by its mineralogical and textural characterization. Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes. The Minerals, Metals & Materials Society, p.1041-1062, 1993 .
- 8 MURPHY, J. N.; MEADOWCROFT, T. R.; BARR, P. V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. Canadian Metallurgical Quarterly, v.36, n.5, p.315-331, 1997.
- 9 ZETTERMANN, L. F. Caracterização da Escória de Aço Inoxidável com vistas a seu Reaproveitamento no Processo de FABricação do Aço. 2001. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- 10 POLESE, M. O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G.; SILVA, M. R. Caracterização Microestrutural da Escória de Aciaria. Revista Matéria, v. 11, n. 4, pp. 442 – 452, 2006.
- 11 GRAFFITTI, D.; MORAES, C. A. M.; ALVES, C. R. R.; VILELA, A. C. F.. Determinação de cal livre em escória de aciaria elétrica como contribuição para avaliação de sua expansibilidade. Tecnologia Em Metalurgia e Materiais, ABM - São Paulo, v. 2, n. 2, p. 24-28, 2005.
- 12 OSÓRIO, E.; MORAES, C.A. M.; GRAFFITTI, D.; NUNEZ, W. P.; VILELA, A. C. F.; MASUERO, A. B.; CERATTI, J. A P; PAGNASSUT, D.; RHODE, L.. Evaluación de escorias de acería eléctrica para uso en usos viales. In: 14ª CONFERENCIA DA ACERIA, 2003, San Nicola. 2003.
- 13 ROJAS, M. F.; ROJAS, M.I. S. de. Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds. Cement and Concrete Research 34 (2004), p. 1881–1888.
- 14 LUXÁN, M.P.; SOTOLONGOS, R.; DORREGO, F.; HERRERO, E. Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. Cement and Concrete Research 30 (2000) 517±519
- 15 MORAES, C. A. M. e BREHM, F. A. Caracterização e Reciclagem de Pó de Aciaria Elétrica. XXXVI Seminário de Aciaria, Belo Horizonte, ABM, 2007.

- 16 SILVEIRA, N. O. ACERITA – Escória de Aciaria LD com redução de expansão. Revista ABM, SP, vol. 1. no. 1, 2004, p. 1 – 5.
- 17 MIKHAIL, S.A.; TURCOTTE, A.M. Thermal behaviour of basic oxygen furnace waste slag. *Thermochimica Acta* 263 (1995) 87-94.
- 18 TIJFEKGI, M.; DEMIRBA, F. E GENGT, H. Evaluation of steel furnace slags as cement additives. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 11, pp. 1713-1717, 1997
- 19 IGUCHI, Y.; NARUSHIMA, T.; IZUMIC, C. Calorimetric study on hydration of CaO-based oxides *Journal of Alloys and Compounds* 321 (2001) 276–281
- 20 MASUERO, A. B. ESTABILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA ELÉTRICA COM VISTAS A SUA UTILIZAÇÃO COMO SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 21 GUMIERI, A. UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA LD NA CONSTRUÇÃO CIVIL. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil (Estruturas)) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 22 LI, Y-X; CHEN, Y-M; WEI, J-X; HE, X-Y; ZHANG, H-T; ZHANG, W-S. A study on the relationship between porosity of the cement paste with mineral additives and compressive strength of mortar based on this paste. *Cement and Concrete Research* 36 (2006). p. 1740– 1743.
- 23 XUE, Y; WU, S.; HOUA, H; ZHA, J. Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture. *Journal of Hazardous Materials* B138 (2006) 261–268
- 24 WU, S.; XUE, Y.; YE Q.; CHEN, Y. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, 2006, artigo in press, 6p.
- 25 CHAURAND, P.; ROSE, J.; BRIOIS, V.; OLIVI, L.; HAZEMANND, J.L.; PROUX, O.; DOMASF., J. BOTTERO, J-Y. Environmental impacts of steel slag reused in road construction: A crystallographic and molecular (XANES) approach *Journal of Hazardous Materials* (2006), artigo in press, 6p.
- 26 LÓPEZ, F. A.; BALCAZAR, N.; FORMOSO, A.; PINTO, M.; RODRIGUEZ, M. The recycling of LINZ–DONAWITZ (LD) converter slag by use as a liming agent on pasture land. *Waste Management & Research* (1995) 13, 555–568.
- 27 PRADO, R.M.; CORREA, M.C.M.; CINTRA, A.C.O.; NATALE, W.; SILVA, M.A.C. Liberação de micronutrientes de uma escória aplicada em um argissolo vermelho-amarelo cultivado com mudas de goabeira (*Psidium guajava* L.) *Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP*, v. 24, n. 2, p. 536-542, agosto 2002.
- 28 PRADO, R.M.; CORREA, M.C.M.; CINTRA, A.C.O.; NATALE, W. Resposta de mudas de goiabeira à aplicação de escória de siderurgia como corretivo de acidez de solo. *Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP*, v. 25, n. 1, p. 160-163, Abril 2003
- 29 PEREIRA, H. S.; KORNDORFER, G. H.; VIDAL, A.A.; CAMARGO, M. S. Silicon sources for rice crop. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.61, n.5, p.522-528, Sept./Oct. 2004.
- 30 LI, Y-S. The use of waste basic oxygen furnace slag and hydrogen peroxide to degrade 4-chlorophenol. *Waste Management* 19 (1999), p. 495 – 502.
- 31 TOPKAYA, Y.; SEVINC, N. GUNAYDIN, A. Slag treatment at Kardemir integrated iron and steel works. *Int. J. Miner. Process.* 74 (2004) 31– 39

- 32 JHA, V.K.; KAMESHIMA, Y.; NAKAJIMA, A.; OKADA, K. Hazardous ions uptake behavior of thermally activated steel-making slag. *Journal of Hazardous Materials B114* (2004) 139–144.
- 33 CHIOU, C-S.; CHANG, C-F. ; CHANG, C-T; SHIE, J-L.; CHEN, Y-H. Mineralization of Reactive Black 5 in aqueous solution by basic oxygen furnace slag in the presence of hydrogen peroxide. *Chemosphere* 62 (2006) 788–795.
- 34 KANG, W.-H.; HWANG, I.; PARK, J-Y. Dechlorination of trichloroethylene by a steel converter. slag amended with Fe(II). *Chemosphere* 62 (2006) 285–293.
- 35 ALANYALI, H.C.; YILMAZ, I.M.; KARAGO, S. Application of magnetic separation to steelmaking slags for reclamation. *Waste Management* 26 (2006) 1133–1139.
- 36 TEIR, S.; ELONEVA, S.; FOGELHOLM, C-J; ZEVENHOVEN, R. Dissolution of steelmaking slags in acetic acid for precipitated calcium carbonate production. *Energy Journal* 32 (2007). p. 528–539.
- 37 DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, P.S.R.; MISRA, V.N. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries *Resources, Conservation and Recycling* (2006), ARTIGO IN PRESS.
- 38 H. Motz *, J. Geiseler. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management* 21 (2001). p. 285 - 293.