

REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO DO TRITURADOR DE SUCATA EM UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA¹

Viviana Nedel Reckziegel²
Lucas Lemos³
Eduardo Osório⁴
Ivo André Homrich Schneider⁵

Resumo

As usinas semi-integradas de produção de aço têm como matérias-primas básicas a sucata no processo de fusão. Os trituradores de sucata proporcionam a entrega de sucata ferrosa fragmentada com elevada limpeza. Entretanto, no processo de separação, são gerados resíduos não aproveitados pela indústria siderúrgica. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização tecnológica do resíduo gerado em um triturador de sucata no Estado do Rio Grande do Sul e avaliar as possibilidades de aproveitamento do material. Através de peneiramento foi possível separar o material em uma fração fina (< 2 mm) e uma fração grossa (> 2 mm). A fração fina foi analisada em relação a granulometria, massa específica, composição elementar, composição mineralógica e periculosidade. Pode se concluir que a fração fina, rica em óxidos de ferro e sílica, possui potencial de aproveitamento em processos de redução de ferro na siderurgia e na indústria cimenteira.

Palavras-chave: Reaproveitamento; Resíduos; Triturador de sucata; Meio ambiente.

REUSE OF SHREDDER WASTE IN A STEEL INDUSTRY

Abstract

The semi-integrated mills that produce steel have scrap as the basic raw material in the melting process. The scrap shredders provide the fragmented delivery of steel scrap with high cleanliness. However, the separation process generated wastes that are not used by the steel industry. The objective of this study was to characterize the waste generated in a scrap shredder in the State of Rio Grande do Sul and evaluate the potential use of the material. Through screening it was possible to separate the material into a fine fraction (< 2 mm) and a coarse fraction (> 2 mm). The fine fraction was characterized in terms of its particle size, specific weight, elemental composition, mineralogical composition, and environmental harm. It was possible to conclude that the fine fraction, rich in iron oxides and silica, can be potentially used as a raw material for iron reduction in steel plants or for cement production.

Key words: Recycling; Wastes; Shredder; Environment.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engº Amb., Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGEM; Leamet; UFRGS, Porto Alegre, RS.

³ Iniciação Científica, Estudante de Engenharia Metalúrgica; UFRGS, Porto Alegre, RS.

⁴ Dr.-Ing., professor, Laboratório de Siderurgia, Lasid; Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS.

⁵ Dr. Professor, Laboratório de Tecnologia Mineral, LTM; Laboratório de Estudos Ambiental para Metalurgia, Leamet; Depto. de Engº de Minas, UFRGS, Porto Alegre, RS.

1 INTRODUÇÃO

Em anos recentes, o crescente consumo mundial de metais, motivado pelo crescimento da atividade econômica em países emergentes, conduziu a um incremento da produção siderúrgica causando um aumento proporcional na geração dos resíduos decorrentes desta atividade, tais como escórias, carepas, pós de aciaria além de lodos de estações de tratamento de efluentes e resíduos dos trituradores de sucata.

As usinas semi-integradas têm como matérias-primas básicas a sucata, utilizando energia elétrica no processo de fusão. As siderúrgicas semi-integradas que utilizam aciaria elétrica precisam de 1.130 kg de sucata para produzir 1.000 kg de aço bruto.⁽¹⁾ Em 2009, o setor siderúrgico brasileiro gerou cerca de 25 milhões de toneladas de resíduos e co-produtos, o que representa 640 kg/t de aço produzido.⁽²⁾

Anualmente, a indústria de reciclagem de metais reaproveita aproximadamente 60.000 toneladas de sucata para a produção de produtos de aço. A maior fonte desta sucata é o automóvel obsoleto. O triturador de sucata (equipamento também denominado no setor metalúrgico como *shredder*) tem a função de triturar sucata e separar a fração metálica ferrosa. Porém, o processo recebe também outros itens como geladeiras, aparelhos de ar condicionado, lavadoras etc. Para cada tonelada de material metálico separado pelos *shredders*, aproximadamente 227 kg de resíduos são produzidos.⁽³⁾ O equipamento triturador de sucata garante: (a) entrega da sucata fragmentada com elevada pureza; (b) minimização na geração de resíduos em etapas posteriores do processo; e (c) a possibilidade de obter subprodutos passíveis de venda, como o cobre e alumínio.⁽¹⁾

Através dos trituradores de sucata, milhões de toneladas de aço e metais não-ferrosos são recuperados. Porém, o processo gera resíduos não aproveitados, principalmente de vidros, plásticos, tecidos, madeiras, borrachas e óxidos metálicos. O destino de grande parte desses resíduos ainda é o aterro industrial e a reciclagem e/ou reuso do resíduo do *shredder* (também denominado *fluff*) é um dos grandes desafios do setor. Essa abordagem é importante tanto por questões ambientais como econômicas.^(4,5)

O custo da destinação adequada, aliado à questão do valor agregado do resíduo, considerando o seu conteúdo metálico e aproveitamento energético, está induzindo a pesquisa para implementação de novas formas de recuperação ou aproveitamento deste resíduo. No atual momento a indústria siderúrgica já considera o foco ambiental como parte de sua estratégia competitiva, valorizando economicamente seus resíduos, diversificando o seu mercado consumidor. Por isso a necessidade do desenvolvimento de tecnologias para resíduos até então sem alternativas de reciclagem.

Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma caracterização tecnológica do resíduo do triturador de sucata fração “fina” (< 2 mm), no Estado do Rio Grande do Sul e avaliar as possibilidades de aproveitamento do material. Em última instância, visa à conservação de recursos naturais e redução dos impactos ambientais gerados pela indústria siderúrgica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada no presente trabalho foi dividida nas seguintes etapas: balanço de massa, amostragem, separação granulométrica do material, seleção da fração a ser estudada e caracterização e avaliação desta fração.

2.1 Balanço de Massa e Seleção da Fração Estudada

O resíduo estudado foi proveniente de uma empresa siderúrgica da região do Vale dos Sinos, RS, e é oriundo do triturador de sucata. No equipamento, os resíduos são separados nas seguintes frações: finos de *fluff* (< 1 mm), grossos de *fluff* (> 15 mm), *fluff* (0,1 mm até 200 mm) e sucata metálica não ferrosa. Com exceção da sucata metálica não ferrosa que é vendida para recicladores, todos os resíduos são encaminhados para aterro industrial.

O balanço de massa e a amostragem foram realizados acompanhando uma corrida de operação do equipamento. Durante a operação, todos os fluxos de materiais de entrada e saída foram quantificados. A fração selecionada *fluff* foi coletada de forma representativa em três lotes, no início, meio e fim da operação. Cada amostra foi quarteada e homogeneizada, conforme a NBR 10.007,⁽⁶⁾ embalada em tambores de polietileno.

2.2 Separação Granulométrica e Preparação das Amostras para Análise

As amostras do *fluff* (0,1 mm até 200 mm) foram por sua vez peneiradas na peneira de 9 # (2 mm) para obter duas frações, uma “fração fina” (< 2 mm) e uma “fração grossa” (> 2 mm). Neste trabalho serão apresentados os resultados de caracterização da fração < 2 mm. A fração > 2 mm foi armazenada para estudos posteriores e não será detalhada nesse estudo.

As amostras com granulometria < 2 mm foi usada tal qual para a análise granulométrica, densimétrica e periculosidade. Porém, foi submetida à moagem para granulometria inferior a 60 # (0,250 mm) para análise elementar, mineralógica e imediata (umidade, perda ao fogo).

2.3 Caracterização do Material - < 2 mm

A fração selecionada foi caracterizada em relação à composição granulométrica, análise densimétrica, análise elementar, perda ao fogo, análise mineralógica e análise de periculosidade. Os procedimentos de análise estão descritos abaixo:

- análise granulométrica: indica a distribuição por tamanho de partículas de uma determinada quantidade de material. Para isso utilizou-se a técnica de peneiramento com a seguinte distribuição de malhas: 2 mm; 1,4 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,250 mm; 0,150 mm e 0,125 mm;
- análise densimétrica: foram realizados os cálculos de massa específica real (razão entre a massa e o volume ocupado pelas partículas sólidas) e massa específica aparente (razão entre a massa e o volume ocupado pelas partículas sólidas e poros internos das partículas sólidas);
- análise elementar: os metais foram analisados por espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES) com abertura de amostra por digestão ácida assistida por radiação de microondas. Os elementos Cl e F foram determinados por cromatografia iônica com abertura de amostra por pirolise. A metodologia se encontra melhor detalhada em Dressler et al.⁽⁷⁾ Os elementos C, H, N e S foram analisados via instrumental por combustão da amostra e detecção por infravermelho. Os resultados são expressos em base seca, corrigidos através de análise de umidade. Os valores de oxigênio foram calculados por diferença;

- perda ao fogo: determinada pela calcinação de 1 g de amostra por 1 hora a 800°C em mufla;
- análise mineralógica: realizada por difração de raios x; e
- análise de periculosidade: realizada via ensaios de lixiviação e solubilização conforme as NBR 10.004,⁽⁸⁾ NBR 10.005⁽⁹⁾ e NBR 10.006.⁽¹⁰⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A quantificação da massa de entrada de sucata e dos fluxos de materiais nas diferentes baias do equipamento triturador de sucata é apresentada na Tabela 1. Pode-se observar que a maior quantidade de material é composto pelo *fluff* (87,1%). O *fluff* fino (< 1 mm) apresenta uma composição muito parecida com o *fluff* (0,1 mm até 200 mm), e representa 9,8% da massa de resíduo gerado. O *fluff* grosso (> 15 mm) é composto por materiais mais grosseiros e representa somente 1% da massa de resíduos. A sucata metálica não ferrosa, única parte atualmente enviada para reciclagem, compõem apenas 2,1% do material.

Tabela 1. Balanço de massa no dia de estudo no equipamento triturador de sucata

Material	Massa (toneladas)	Percentual (%)
Entrada de sucata	824	100
Saída – sucata ferrosa	623	75,6
Saída – resíduos	201	24,4
Saídas		
<i>Fluff</i> fino (< 1 mm)	19,7	9,8
<i>Fluff</i> (0,1 mm até 200 mm)	175,0	87,1
<i>Fluff</i> grosso (> 15 mm)	2,1	1,0
Sucata metálica não ferrosa	4,2	2,1
Total de Resíduos	201,0	100,0

A Tabela 2 apresenta a distribuição em massa de cada amostra do *fluff* após a separação granulométrica. O aspecto visual do material antes e após a separação granulométrica é apresentado na Figura 1.

Tabela 2. Porcentual em massa de material, abaixo de 2 mm e acima de 2 mm, em três amostras de *fluff* recolhidas no triturador de sucata

Amostra	Massa de material < 2 mm (%)	Massa de material > 2 mm (%)
Amostra 1 (início da operação)	46,6	53,4
Amostra 2 (meio da operação)	38,9	61,1
Amostra 3 (final da operação)	40,6	59,4
Valores médios	42,0	58,0



Figura 1. Fotografias mostrando o aspecto geral do *fluff* antes e após a separação granulométrica. (a) Resíduo do triturador de sucata – *fluff*; (b) fração abaixo de 2 mm; e (c) fração acima de 2 mm.

A fração fina, < 2 mm, alvo do trabalho, foi caracterizada através de diversos ensaios. A Figura 2 apresenta os resultados da análise granulométrica onde a faixa granulométrica das três amostras ficou entre 2 mm e 0,1 mm.

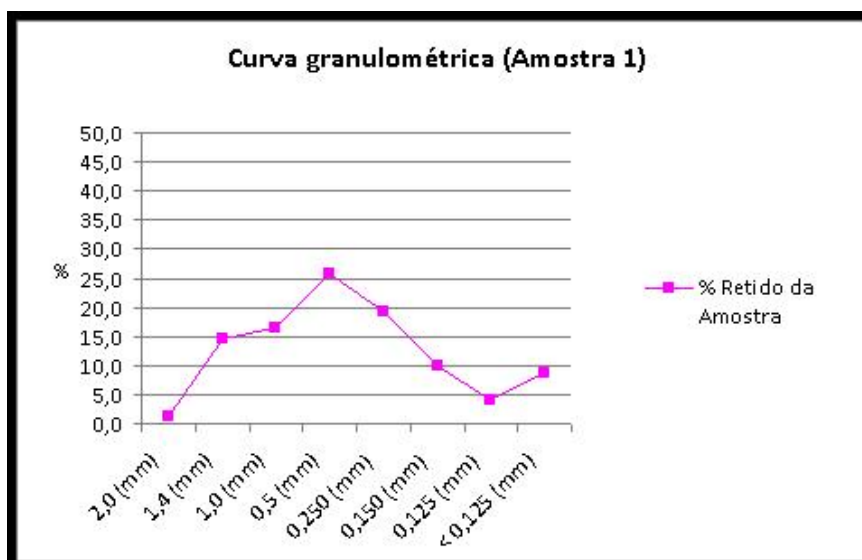


Figura 2. Distribuição granulométrica da fração com granulometria < 2 mm.

Ensaio densimétricos verificaram que a média da massa específica real do resíduo do shredder com granulometria < 2 mm ficou em 2,7 t/m³ e da massa específica aparente em aproximadamente 1 t/m³. Sattler e Laage⁽¹¹⁾ relacionam as massas

específicas aparentes de distintas frações presentes em resíduos de trituradores de sucata (Tabela 3). Como pode ser observado, a fração < 2 mm apresenta resultados de massa específica semelhantes a de um solo (2,4 t/m³). A identificação dos materiais não é possível de ser realizada visualmente.

Tabela 3. Densidade das diferentes frações de um resíduo de triturador de sucata⁽⁸⁾

g/cm ³	Cu	FeO	Al	Vidro	Solo	PVC	PA	Borracha	PP	Madeira	Papel
Densidade	8,8	5,17	2,7	2,5	2,4	1,4	1,1	1,1	0,9	0,8	0,7

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise elementar e de perda ao fogo da fração abaixo de 2 mm. A perda ao fogo, com um valor médio de 13,7% indica que o material é predominantemente inorgânico. Pode-se observar que os elementos mais abundantes são o Fe, Si e o O, com valores médios de aproximadamente 25%, 15% e 42%, respectivamente.

Tabela 4. Análise elementar das três amostras de *fluff* do triturador de sucata em granulometria < 2 a mm

Elemento	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio padrão
C (%)	4,64	7,62	7,72	6,67	1,75
H (%)	1,02	1,44	1,75	1,45	0,35
N (%)	0,16	0,26	0,38	0,21	0,06
S (%)	0,17	0,28	0,25	0,22	0,03
O e EM (%)	42,08	45,49	41,43	42,90	2,16
Al (%)	2,66	2,486	3,42	2,82	0,53
Ca (%)	1,09	1,15	1,00	1,05	0,06
Cl (%)	0,15	0,10	0,13	0,09	0,03
Cu (%)	0,23	0,10	0,21	0,20	0,05
Fe (%)	28,35	19,93	25,73	24,67	4,29
Si (%)	15,57	16,93	13,64	15,30	1,65
Zn (%)	0,88	1,62	1,65	1,30	0,46
As (%)	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Cd (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Co (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr (%)	0,30	0,10	0,15	0,20	0,09
F (%)	0,12	0,10	0,10	0,10	0,01
K (%)	0,44	0,68	0,52	0,50	0,10
Mg (%)	1,14	0,89	0,74	0,91	0,21
Mn (%)	1,11	0,23	0,36	0,52	0,47
Na (%)	0,56	0,95	1,01	0,83	0,27
Ni (%)	0,01	0,00	0,19	0,02	0,02
Pb (%)	0,10	0,20	0,43	0,22	0,13
P (%)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,03
Hg (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	100,00	100,00	100,00	100,00	
Perda ao fogo (%)	9,36	16,53	15,22	13,75	3,80

EM – elementos minoritários

Em um estudo semelhante, Zevenhoven e Saeed⁽¹²⁾ mostram que o resíduo do shredder (trituração) é composto em torno de 50% por uma fração > 7 mm e de 50% por uma fração < 7 mm, esta última composta por óxidos metálicos, vidros e rochas. Comparando com os resultados de Zevenhoven, verifica-se a semelhança do material que é rico em óxidos, principalmente de ferro e silício. Estas observações

são confirmadas pelas análises de difração de raios x, resumidos na Tabela 5, que mostram que os componentes cristalinos identificados são óxidos de ferro (como magnetita, hematita e wustita) bem como outros minerais presentes no solo como quartzo, plagioclásios, calcita e dolomita. A Figura 3 mostra o difratograma de uma amostra analisada.

Tabela 5. Compostos cristalinos identificados por DRX nas três amostras de amostras de *fluff* do triturador de sucata em granulometria inferior a 2 mm

Amostra	Compostos cristalinos presentes
Amostra 1	quartzo, plagioclásio, calcita, dolomita, hematita e magnetita
Amostra 2	quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, calcita, dolomita e hematita
Amostra 3	quartzo, plagioclásio, calcita, dolomita, magnetita e goetita

Amostra 1

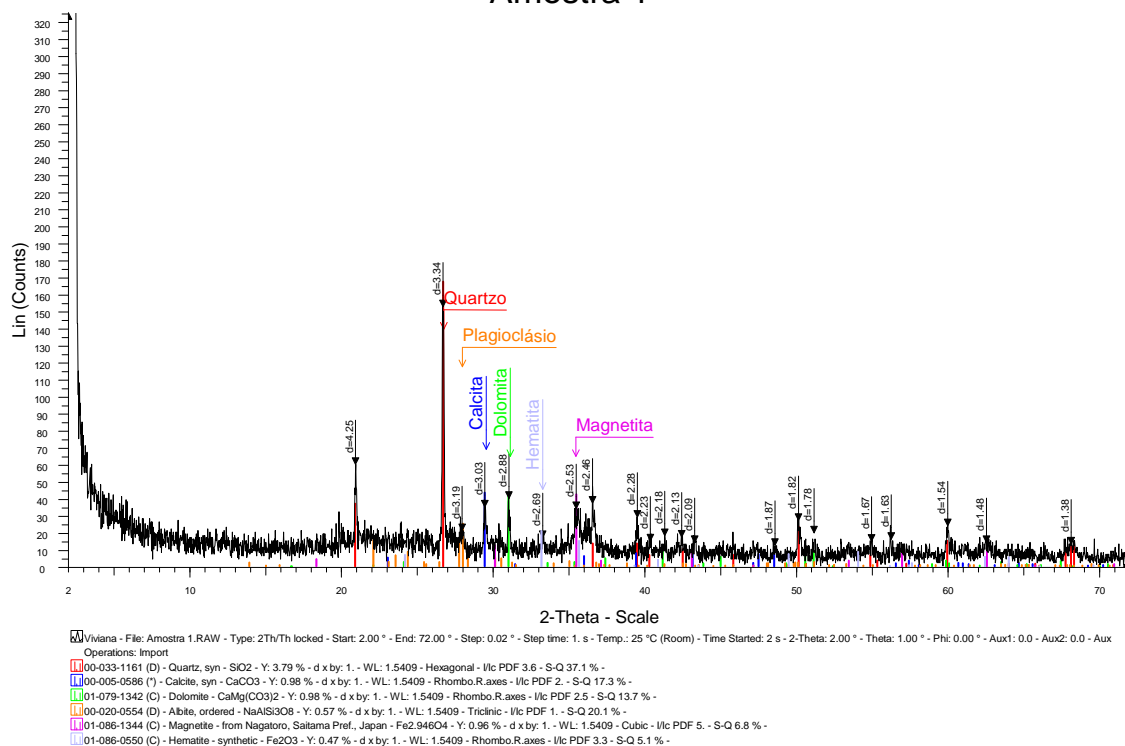


Figura 3. Resultados da análise de DRX (amostra 1).

Os ensaios de lixiviação e solubilização de acordo com as prescrições da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004,⁽⁸⁾ classificaram as amostras com granulometria < 2 mm como Resíduo Não perigoso - Classe II. O material só não foi considerado inerte por exceder no ensaio de solubilização as concentrações de Fe e Mn, elementos com menor preocupação ambiental.

A utilização de óxidos de metais em aglomerados autorredutores,⁽¹³⁾ em fornos de fusão é uma possível perspectiva de aplicação do resíduo de trituração. O emprego da tecnologia da autorredução na recuperação de resíduos metálicos ainda está em desenvolvimento e possui excelentes perspectivas futuras. Esse tipo de recuperação utilizando óxidos de shredder ainda não foi devidamente explorada, existindo poucos trabalhos nesta linha.

Ambrose, Singh e Harder⁽¹⁴⁾ apresentam um estudo com diferentes técnicas de processamento mecânico, onde a fração, do resíduo de trituração, que contém vidros, terras, rochas, mistura de metais residuais e óxidos metálicos, podem ser reaproveitadas através da separação e recuperação dos metais.

Verifica-se que, após separação, o resíduo de trituração possui potencial de aplicação em uma gama de processos industriais como cimenteiras, siderúrgicas, abrindo possibilidades de pesquisa neste setor, principalmente em estudos relacionados com a reciclagem ou reaproveitamento de óxidos metálicos e outros materiais. Como a legislação ambiental do Estado do Rio Grande do Sul impede a disposição de resíduos industriais em aterros sanitários, por essa razão, é de extrema importância a busca por outras alternativas de disposição.

4 CONCLUSÃO

Com base nesses resultados, pode-se concluir que é possível fazer a separação de materiais no resíduo de trituração de sucata por simples peneiramento, obtendo-se frações distintas. Conclui-se também que para a recuperação ou reciclagem do resíduo é necessário o processamento mecânico de separação do material em frações que podem ser reaproveitadas, ou ainda, para melhorar a qualidade dos resíduos de trituração. A fração fina (< 2 mm), rica em óxidos de ferro e sílica possui potencial de aproveitamento em processos de redução de ferro na siderurgia e na indústria cimenteira. Existem amplas oportunidades de aproveitamento do material, mas uma série de estudos ainda são necessários para avaliar as possíveis vantagens e desvantagens econômicas e ambientais envolvidas.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo Capes e a Fundação Luiz Englert pela concessão das respectivas bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 Ciuccio, M.T.P. Estudo de tendências e oportunidades no desenvolvimento sustentável para a reciclagem de veículos e seus materiais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2004.
- 2 IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia – Siderurgia Brasileira: Relatório de Sustentabilidade 2010, disponível em <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio08_2010.pdf>, Acesso em 15 maio de 2011.
- 3 Hoffman, D.C., Hains, N.L. Methods and compositions for use in recycling metal containing furnace dust. United State Patent 5,186,742. February 16, 1993.
- 4 Boughton B, Horvath A. Environmental assessment of shredder residue management. Resource Conserve Recycling;47(1), p.3–25. 2006.
- 5 Morioka T, et al. Eco-efficiency of advanced loop-closing systems for vehicles and household appliances in hyogo eco-town. Journal of Industrial Ecology, 9(4), p.205–215, 2005.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007: Amostragem de Resíduos Sólidos – Rio de Janeiro, 2004. 27p.
- 7 DRESSLER, Valderi Luiz, PEREIRA, Juliana Severo Fagundes ; ENDERS, M. S. P. ; Santos, C. M. M. ; MÜLLER, E. I. ; FLORES, Érico Marlon de Moraes ; . Pyrohydrolysis of carbon nanotubes for Br and I determination by ICP-MS. Microchemical Journal (Print), v. 101, p. 54-58, 2012.

- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71p.
- 9 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004. 16p.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 3p.
- 11 Sattler, H.P. Laage, B. “ASR – From waste to products” Proceedings of R'2000 Recovery Recycling Re-integration, Toronto (Canada), June 2000 (CD-ROM) A. Barrage, X. Edelmann (Eds.), EMPA, St. Gallen (Switzerland)
- 12 Zevenhoven, R, Saeed, L. Automotive shredder residue (ASR) and compact disk (CD)waste: options for recovery of materials and energy, Report TKK-ENY-14, Helsinki University of Technology. Energy Engineering and Environmental Protection: Finland, <http://eny.hut.fi/library/publications/tkk-eny/tkk-eny-14.pdf>; 2003 [accessed January 2005].
- 13 Jody, B.J., E.J. Daniels, “End-of-Life Vehicle Recycling: The State of the Art of Resource Recovery from Shredder Residue”, Argonne, U.S. Department of Energy Laboratory managed by Chicago Argonne, LLC Energy Systems Division, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, p: 146, September 25, 2006
- 14 Ambrose, C., Singh, M., Harder, M.. The material composition of shredder waste in the UK, IWM Scientific & Technical Review, November, p 27-35,(2000).