

### III-043 – CARACTERIZAÇÃO PARA APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DO TRITURADOR DE SUCATA EM UMA USINA SIDERÚRGICA

**Viviana Nedel Reckziegel<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental pela Universidade Luterana do Brasil (ULBRA). Mestranda do Programa de Pós Graduação em Eng. de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M/UFRGS).

**Henrique José Bortolotti Martins**

Engenheiro Metalúrgico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Eng. de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M/UFRGS). Engenheiro do Pátio de Sucata da Gerdau Riograndense.

**Rejane Maria Candiota Tubino**

Engenheira Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). Mestre e Doutor em Metalurgia Extrativa pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGE3M/UFRGS). Professora Associada do Departamento de Metalurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Eduardo Osório**

Engenheiro Metalúrgico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre e Doutor em Metalurgia Extrativa pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGE3M/UFRGS). Professor Adjunto Departamento de Metalurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Ivo André Homrich Schneider**

Engenheiro de Minas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre e Doutor em Metalurgia Extrativa pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGE3M/UFRGS). Professor Associado do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pesquisador 2 do CNPq.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** UFRGS, Campus do Vale, PPGE3M. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, RS, Brasil. CEP: 91501-970. Tel: (51) 3308-7104. E-mail: [viviana@sinos.net](mailto:viviana@sinos.net)

#### RESUMO

A indústria siderúrgica é grande consumidora de energia e de materiais e é responsável pela geração de um significativo volume de efluentes gasosos e líquidos bem como resíduos sólidos. As usinas semi-integradas de produção de aço têm como matéria-prima básica a sucata ferrosa. A partir dessa demanda surgiu a necessidade de investimentos em trituradores de sucata. Estes equipamentos proporcionam a entrega da sucata ferrosa fragmentada com elevada pureza para o processo de fusão e refino do aço. 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, na granulometria de 2,0 mm, foi possível separar o material em duas frações com características distintas. A fração com granulometria inferior a 2,0 mm apresenta um aspecto terroso e é rica em óxidos de ferro. O material com granulometria superior a 2,0 mm é rico em materiais poliméricos e apresenta potencial para uso energético.

**PALAVRAS-CHAVE:** Siderurgia, resíduo sólido, triturador de sucata, meio ambiente.

#### 1. INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica é grande consumidora de energia e de materiais. Também é responsável por significativo volume de efluentes gasosos e líquidos bem como resíduos sólidos. As usinas semi-integradas têm como matéria-prima básica a sucata ferrosa e utiliza a energia elétrica no processo de fusão. De modo geral, as siderúrgicas semi-integradas com aciaria elétrica precisam de 1.130 kg de sucata para produzir 1.000 kg de aço bruto (Ciuccio, 2004).



Nas usinas semi-integradas são gerados diversos resíduos sólidos, e os principais são: escória, pó de aciaria elétrica, carepa, lodo de estação de tratamento de efluentes e o resíduo do triturador de sucata. Em 2009, o setor siderúrgico brasileiro gerou cerca de 25 milhões de toneladas de resíduos e co-produtos, o que representa 640 kg por tonelada de aço produzido (IBS, 2010).

O triturador de sucata (equipamento também denominado no setor metalúrgico como “shredder”) tem a função de triturar sucata e separar a fração metálica ferrosa. A maior fonte de sucata é o automóvel obsoleto. 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 (Hoffman, 1993). 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 (Ciuccio, 2004).

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 vidro, plásticos, tecidos, madeira, borracha 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” é um dos grandes desafios do setor. Essa abordagem é importante tanto por questões ambientais como econômicas (Morioka et al, 2005; Boughton e Horvath, 2006).

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. Em última instância, visa à conservação de recursos naturais e a 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 e caracterização das frações do resíduo.

### **2.1. Balanço de Massa e Amostragem**

O resíduo estudado foi proveniente de uma empresa siderúrgica da região do Vale dos Sinos, RS, e é oriundo do triturador de sucata. Atualmente são processados 18.128 t/mês de sucata, gerando uma quantidade de 4.422 t/mês de resíduos. No equipamento, os resíduos são separados nas seguintes frações: finos de “fluff”, “fluff” (maior parte do material), grossos de “fluff” 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. Amostras do “fluff” (principal resíduo estudado neste trabalho) foram coletadas de forma representativa em três lotes, no início, meio e fim da operação. Cada amostra foi quarteada e homogeneizada, conforme a NBR 10.007/2004, embalada em tambores de polietileno e transportadas para a universidade.

### **2.2. Separação Granulométrica e Preparação das Amostras para Análise**

As três amostras do “fluff” foram por sua vez peneiradas para obter duas frações, uma “fração fina” (< 2,0 mm) e uma “fração grossa” (> 2,0 mm).

As amostras, em ambas as granulometrias, foram submetidas à moagem para granulometria inferior a 60# (0,250 mm) para análise elementar, mineralógica e imediata (umidade, perda ao fogo e poder calorífico). As amostras do “fluff” com granulometria superior a 2,0 mm, rica em materiais poliméricos, foram submetidas à moagem criogênica para atingir granulometria inferior a 60# (0,250mm).

## 2.3 Caracterização do Material

A fração com granulometria inferior a 2,0 mm foi caracterizada em relação à composição elementar, perda ao fogo, análise mineralógica e análise de periculosidade. A fração com granulometria superior a 2,0 mm foi caracterizada em relação à composição de materiais, composição elementar, perda ao fogo e poder calorífico. Os procedimentos de análise estão descritos abaixo.

**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 pirohidrólise. 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.

**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.

**Análise de periculosidade:** Realizada via ensaios de lixiviação e solubilização conforme as NBR 10.004, NBR 10.005 e NBR 10.006 (ABNT, 2004).

**Composição de materiais:** Conduzida por cata manual e quantificação das massas dos distintos materiais presentes.

**Poder calorífico:** Realizado em bomba calorimétrica.

## 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 apresenta uma composição muito parecida com o “fluff” normal, e representa 9,8% da massa de resíduo gerado. O “fluff” grosso é composto por materiais mais grosseiros e representa somente 1,0% 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		
“Fluff” fino	19,7	9,8
“Fluff”	175,0	87,1
“Fluff” grosso	2,1	1,0
Sucata metálica não ferrosa	4,2	2,1
Total de Resíduos	201,0	100,0

Em virtude da quantidade de material gerado, este trabalho limitou-se a caracterizar três amostras do resíduo, obtido na baía que recolhe o material conhecido como “fluff” e que corresponde a 87,1% da massa de resíduos gerada. Cada amostra foi peneirada em uma granulometria de 2,0 mm, de forma a obter uma fração terrosa e uma fração de materiais particulados grosseiros. 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 apresentada na Figura 1.

**Tabela 2. Porcentual em massa de material, abaixo de 2,0 mm e acima de 2,0 mm, em três amostras de “fluff” recolhidas no triturador de sucata.**

Amostra	Massa de material < 2,0 mm (%)	Massa de material > 2,0 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



Resíduo do triturador de sucata – “fluff”.



Fração abaixo de 2,0 mm.



Fração acima de 2,0 mm.

**Figura 1. Fotografias mostrando o aspecto geral do “fluff” antes e após a separação granulométrica.**

Como pode ser observado, a fração com granulometria inferior a 2,0 mm apresenta um aspecto terroso, parecido com um solo. A identificação dos materiais não é possível de ser realizada visualmente. A Tabela 3 apresenta os resultados da análise elementar e de perda ao fogo da fração abaixo de 2,0 mm obtida nas três amostras coletadas de “fluff”. 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. Estes resultados mostram que o material é rico em óxidos, principalmente de ferro e silício. Estas observações são confirmadas pelas análises de difração de raios x, resumidos na Tabela 4, 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.

Os ensaios de lixiviação e solubilização de acordo com as prescrições da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004 classificaram as três amostras com granulometria < 2,0 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.

**Tabela 3. Análise elementar das três amostras de “fluff” do triturador de sucata em granulometria < 2,0 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

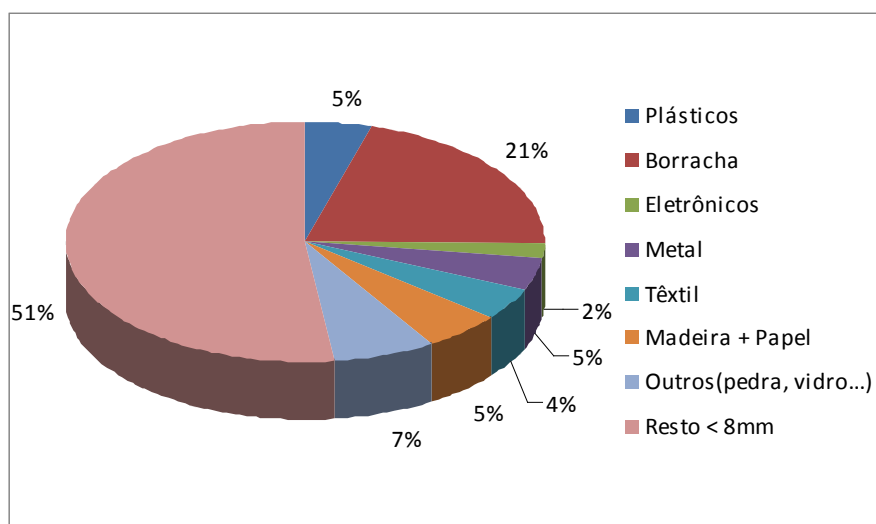
**Tabela 4. Compostos cristalinos identificados por DRX nas três amostras de amostras de “fluff” do triturador de sucata em granulometria inferior a 2,0 mm.**

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

A fração com granulometria superior a 2,0 mm já se apresenta em condições de, pelo menos parcialmente, ser caracterizada visualmente em relação aos diferentes tipos de materiais presentes. A Figura 2 mostra a distribuição dos materiais presentes, onde se pode observar que o resíduo é rico em compostos poliméricos, como borracha, papel, tecidos e plásticos. Apresenta ainda componentes metálicos, eletrônicos, vidro e

pedregulhos (rocha e concreto). Entretanto, 51% do material não pode ser identificado, por apresentar granulometria muito baixa.

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise elementar, de perda ao fogo e de poder calorífico da fração com granulometria acima de 2,0 mm, obtida nas três amostras, coletadas de “fluff”. A perda ao fogo, com um valor médio de 37,0 % indica que o material possui uma fração orgânica significativa e que possui potencial para uso na co-geração de energia. O valor do poder calorífico médio foi determinado em 3.781 cal/g, de acordo com o esperado em resíduos de trituradores de sucata (Reckziegel, 2011).



**Figura 2. Distribuição de materiais presentes no “fluff” do triturador de sucata em granulometria superior a 2,0 mm.**

**Tabela 6. Análise elementar das três amostras de “fluff” do triturador de sucata em granulometria > 2 mm.**

Elemento	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio padrão
C (%)	39,26	39,25	39,99	39,48	0,43
H (%)	4,49	4,56	4,54	4,53	0,03
N (%)	0,74	0,74	0,77	0,75	0,02
S (%)	0,55	0,44	0,43	0,47	0,06
O e EM (%)	10,00	10,00	8,00	10,00	0,00
Al (%)	2,55	2,23	2,28	2,35	0,17
Ca (%)	2,44	2,55	2,55	2,51	0,06
Cl (%)	1,99	2,62	3,08	2,56	0,54
Cu (%)	4,48	4,29	4,87	4,54	0,29
Fe (%)	5,45	5,61	5,6	5,55	0,09
Si (%)	5,1	5,25	5,61	5,32	0,26
Zn (%)	2,68	1,31	1,36	1,78	0,77
As (%)	0,01	0,02	0,02	0,02	0,00
Cd (%)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00
Co (%)	0,02	0,02	0,04	0,03	0,00
Cr (%)	0,62	0,41	0,47	0,49	0,10
F (%)	0,49	0,55	0,48	0,51	0,03
K (%)	3,23	3,37	3,57	3,39	0,17
Mg (%)	5,86	6,08	6,33	6,08	0,23
Mn (%)	0,65	0,65	0,74	0,68	0,05
Na (%)	5,38	5,65	5,96	5,66	0,29
Ni (%)	0,29	0,21	0,31	0,27	0,05
Pb (%)	3,23	3,54	3,70	3,48	0,24
P (%)	0,37	0,45	0,50	0,44	0,06
Hg (%)	0	0	0		
Perda ao fogo (%)	36,5	35,3	39,2	37,00	1,99
Poder calorífico (cal/g)	3.682	3.787	3.873	3.781	0,95

EM – elementos minoritários

#### 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. A fração fina, com aparência terrosa (< 2,0 mm), possui potencial de aproveitamento em processos de redução de ferro na siderurgia e na indústria cimenteira. Poderia também ser empregado na cobertura diária de aterros sanitários, porém a legislação ambiental do Estado do Rio Grande do Sul impede a disposição de resíduos industriais em aterros sanitários. A fração grossa (> 2,0 mm), rica em materiais poliméricos, pode ter aproveitamento energético. Entretanto testes de combustão e avaliação dos gases são ainda necessários para avaliar as possíveis vantagens e desvantagens econômicas e ambientais envolvidas.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Gerdau pelo auxílio financeiro e os alunos Viviana Reckziegel e Lucas Lemos agradem a CAPES e a Fundação Luiz Englert pela concessão das respectivas bolsas de estudo.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ambrose, C., Singh, M., Harder, M.. The material composition of shredder waste in the UK, IWM Scientific & Technical Review, November, p 27-35,(2000).
2. Boughton B, Horvath A. Environmental assessment of shredder residue management. Resource Conserve Recycling;47(1), p.3–25. 2006.
3. 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.
4. Fisher M. The role of plastics in automotive shredder residue. SAE Technical Study Series 1999-01-0664. Detroit, MI: Society of Automotive Engineers; 1999.
5. 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.
6. 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](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio08_2010.pdf)>, Acesso em 15 maio de 2011.
7. 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.
8. Reckziegel, V., Tem Caten, C., Schneider, I.A.H., Canabarro, J. Aplicação do planejamento experimental na viabilidade técnica do reaproveitamento do resíduo do triturador de sucata na co-geração de energia, em uma indústria siderúrgica. III Encontro Fluminense de Energia de Produção. Anais..., CEFET, RJ, 2011.