



SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA ELETROELETRÔNICA: RECUPERAÇÃO DE METAIS A PARTIR DE APARELHOS CELULARES OBSOLETOS¹

*Viviane Tavares de Moraes²
Denise Croce Romano Espinosa³
Jorge Alberto Soares Tenório³*

Resumo

As placas de circuito impresso são elementos essenciais para o funcionamento de equipamentos eletroeletrônicos, que podem estar presentes em computadores, vídeo games, aparelhos de DVD, geladeiras, calculadoras e aparelhos de telefonia móvel. Com o avanço da tecnologia o descarte de aparelhos celulares se torna cada vez maior e a disposição destes equipamentos se torna um problema ambiental que pode ser minimizado através de processos de reciclagem e recuperação de materiais. Por esta razão este trabalho tem o objetivo de processar as placas de circuito impresso a fim de segregar materiais para viabilizar a recuperação principalmente de metais, como o ferro e o cobre. O processamento das placas envolve a moagem em moinhos de facas e martelos, seguidos de separação magnética, eletrostática e granulométrica. A recuperação dos metais ocorre durante as etapas de separação que concentram ferro na fração magnética e cobre na fração condutora, que pode ser comprovada pelos ensaios de caracterização com água régia e ICP-OES.

Palavras-chave: Placas de circuito impresso; Reciclagem; Cobre; Eletro-eletrônico.

ELECTRO-ELECTRONIC INDUSTRY SUSTAINABILITY: METALS RECOVERY FROM OBSOLETE MOBILE

Abstract

The printed circuit boards are key elements to the proper functioning of electro-electronic equipments, and can be present in computers, video games, DVD players, refrigerators, calculators and mobile phones. With the advance of technology the disposal of mobile phones becomes greater and the discard of this kind of equipment represents an environmental issue that can be minimized through the recycling process and recuperation of materials. Because of that, this paper has the purpose to process the printed circuit boards in order to segregate materials to viabilize the recuperation mainly of metals, such as iron and copper. The processing of the circuit boards involves the grinding (in knives and hammers mills), followed by magnetic, electrostatic and size separation. The recovery of metals occurs during the separation steps that concentrates iron in the magnetic fraction and copper in the conductive fraction wich can be proven by characterization tests with acqua regia and ICP-OES.

Key words: Printed circuit board; Eecycling; Copper; Electro-electronic.

¹ *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Doutoranda – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*

³ *Doutor – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*



1 INTRODUÇÃO

Atualmente os produtos eletroeletrônicos são comuns no uso doméstico e industrial a fim de atender as necessidades do homem moderno. Hoje em dia é difícil se imaginar sem um aparelho de telefonia celular, televisão, aparelhos de DVD e som, computadores pessoais e laptops, calculadoras, videogames, impressoras, câmeras fotográficas e tantos outros utensílios.

Cada avanço que surge a favor do desenvolvimento tecnológico de produtos eletrônicos é um incentivo para a troca de equipamentos que muitas vezes não se esgotaram, mas sim estão ultrapassados. Um exemplo claro deste avanço tecnológico são os equipamentos de som que até a década de 80 era comum os encontrar na forma de discos de vinil, enquanto que atualmente se passa pela transição de mídias de CD e aparelhos de MP3, outro exemplo é o aparelho de vídeo cassete que foi substituído por equipamentos de DVD; televisores de tubo de raio catódico por telas de cristal líquido e plasma.⁽¹⁾

Todos os equipamentos eletroeletrônicos têm como característica geral a presença de materiais plásticos, cerâmicos e metálicos, que por sua vez estão acondicionados em pilhas, baterias, carcaças plásticas e placas de circuito impresso.⁽²⁾

Os equipamentos eletroeletrônicos são segregados em dois grandes grupos: a chamada linha branca composto de geladeiras, fogões, microondas e lavadoras e a linha marrom conhecida pelos televisores, aparelhos de DVD e som. Porém dentro desta classificação não se encontra equipamentos como pilhas, baterias, lâmpadas e aparelhos de telefonia celular que são produtos eletrônicos de fácil acesso a população e conseqüentemente maior descarte quando comparado as linhas branca e marrom.⁽³⁾

Estes aparelhos não classificados costumam ser descartados em aterros sanitários junto com os resíduos domésticos não tendo a atenção necessária aos componentes tóxicos que os compõem.⁽⁴⁾

As baterias, por exemplo, possuem cádmio, zinco, lítio, manganês e outros metais pesados (dependendo do tipo) que ao serem descartadas em aterros sofrem processo de lixiviação através dos ácidos húmicos formados no processo de degradação da matéria orgânica por processo anaeróbio.⁽⁴⁾ Os metais em forma dissociada podem ser adsorvidos pelo solo e plantas, podem percolar no solo e atingir os aquíferos subterrâneos, e serem consumidos por organismos aquáticos que fazem parte da cadeia alimentar humana, causando problemas de saúde pública. Um caso de bastante impacto foi o caso de Minamata, Japão, na década de 50, que matou cerca de 900 pessoas e pode ter causado efeitos tóxicos em mais de dois milhões de pessoas, devido o consumo de peixe contaminado com mercúrio.⁽⁵⁾

Com o histórico de problemas causados por metais pesados estudos recentes têm demonstrado que resíduos com grandes quantidades de metais podem ser reciclados.⁽⁶⁻¹¹⁾

Considerando que a maioria dos produtos eletroeletrônicos possui placas de circuito impresso com metais pesados este trabalho visa estudar métodos de recuperação de materiais a fim de minimizar os impactos ambientais negativos e os problemas relacionados à saúde pública provocados pelo contato humano com substâncias tóxicas.⁽¹²⁻¹⁵⁾

A vida útil de um aparelho de celular é de aproximadamente um ano e estima-se que cerca de 100 milhões de aparelhos de telefonia celular são descartados anualmente no mundo devido ao não funcionamento ou porque aparelhos com novos recursos foram lançados no mercado.^(16,17)



Para os computadores a vida útil pode variar de 2 a 5 anos, com a estimativa de descarte de 17 milhões de aparelhos por ano somente nos Estados Unidos.⁽¹⁸⁾

Se adotar que a massa de um aparelho celular está em torno de 100 g pode-se concluir que cerca de 10 milhões de quilos destes aparelhos são descartados em aterros. Em contrapartida somente a CPU dos computadores pesa em torno de 3 kg pode-se concluir que 51 milhões de quilos de computadores são descartados sem tratamento, sem considerar os monitores de tubo de raio catódico e as telas de cristal líquido.⁽¹⁹⁾

Estudos mostram que cerca de 83% em massa dos aparelhos de telefonia celular são compostos de metais e fibras de vidro e 17% em material plástico, contra cerca de 32% em massa de metais e fibra de vidro para computadores e televisores e 68% em massa de material plástico.^(13,15)

Dos metais que compõem as placas de circuito impresso pode-se destacar a presença de cobre, estanho, ferro, níquel, chumbo, titânio e alumínio; além dos metais preciosos como o ouro, a prata e o paládio.⁽²⁰⁻²⁵⁾

Antigamente as minas de cobre economicamente interessantes para exploração tinham cerca de 4% de cobre, atualmente tem somente 1%, isto é a cada tonelada de minério somente 10 kg são de cobre.^(26,27)

Nas placas de circuito impresso de aparelhos de telefonia celular o metal em maior concentração é o cobre, que pode chegar em torno de 33% em massa, isto é, em 1 t de resíduos de PCI de celular tem-se cerca de 330 kg de cobre.⁽¹⁸⁾

Em contrapartida uma tonelada de sucata de computadores tem mais ouro que é possível beneficiar em 17 t de minério.⁽²²⁾

A maioria dos produtos eletroeletrônicos possui placas de circuito impresso em seu interior que podem chegar a representar até 30% em massa do peso do produto e a presença de metais é essencial para o funcionamento desta tecnologia. Por esta razão cada vez mais estudos visando a recuperação de metais das placas de circuito impresso estão sendo pesquisados.^(20,22,24,25)

As pesquisas relacionadas a recuperação de materiais de produtos eletroeletrônicos envolvem em geral a recuperação deste materiais através de processamento mecânicos, pirometalúrgico, eletrometalúrgico e hidrometalúrgicos.^(13,15) **Erro! Indicador não definido. Erro! Indicador não definido..**

No caso de pilhas e baterias já existem alguns processos de reciclagem consagrados e outros em desenvolvimento.⁽²⁸⁻³¹⁾ Estas pilhas e baterias podem conter metais pesados como cádmio, chumbo e mercúrio, que são tóxicos e necessitam de tratamento antes da disposição final, principalmente porque a Resolução 257 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) regula que estes produtos devem ser recolhidos pelos fabricantes e distribuidores para destinação correta.⁽²²⁻²⁴⁾

O mesmo procedimento se espera com a regulamentação da Política Nacional de Resíduos Sólidos que deve englobar as placas de circuito impresso, assim como outros resíduos oriundos de produtos eletroeletrônicos.

Sendo assim processos de recuperação de metais e reciclagem de materiais contidos nas placas de circuito impresso estimulam a minimização de recursos naturais e o desenvolvimento sustentável.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As placas de circuito impresso (PCI) de aparelhos celulares obsoletos foram inicialmente separadas manualmente dos outros componentes, como baterias, telas de cristal líquido e carcaça plástica.

A fim de se recuperar metais, como o cobre, as placas de circuito impresso foram submetidas a processos de moagem em um moinho de facas (modelo FA 2305 da marca Rone) com grelha 3 mm e em um moinho de martelos (modelo MDM 18/18 – série 2004/07 da marca Astecma) com grelha 4mm utilizando-se cerca de 10kg de placas em cada moinho. Com o material cominuído proveniente de cada processo de moagem realizou-se uma separação magnética de tambor por via seca (HFP-RE 15x12 série 10756B da marca Inbrás), classificação do material pelo método de análise granulométrica; o material não magnético foi submetido à separação eletrostática (ES-14/01S da marca Inbrás), finalizando a segregação geral do resíduo em: condutor, misto, não condutor e magnético.

Com o material não condutor, misto, condutor e magnético foi realizado o quarteamento com quarteador modelo OTR nº 10 da marca Máquinas Renard. Durante o quarteamento foi coletada uma amostra de resíduo de aproximadamente 100g para ensaio granulométrico com faixa granulométrica: +2,00mm; +1,00mm -2,00mm; +0,50mm – 1,00mm; +0,25mm;-0,50mm; +0,106mm – 0,25mm e -0,106mm.

Cada fração granulométrica proveniente dos resíduos não condutor, misto, condutor e magnético foi submetido ao processo de digestão em água régia seguido de análise de caracterização por espectrometria de plasma (ICP *Inducted Coupled Plasma* – Espectrometro de emissão óptica modelo 710-ES da marca Varian).

Com a identificação e balanço de massa dos resíduos foi possível a comparação entre os processos a fim de selecionar as melhores frações para recuperação de metais

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes ao balanço de massa durante o processamento das placas de circuito impresso estão expressos em porcentagem mássica na Figura 1.

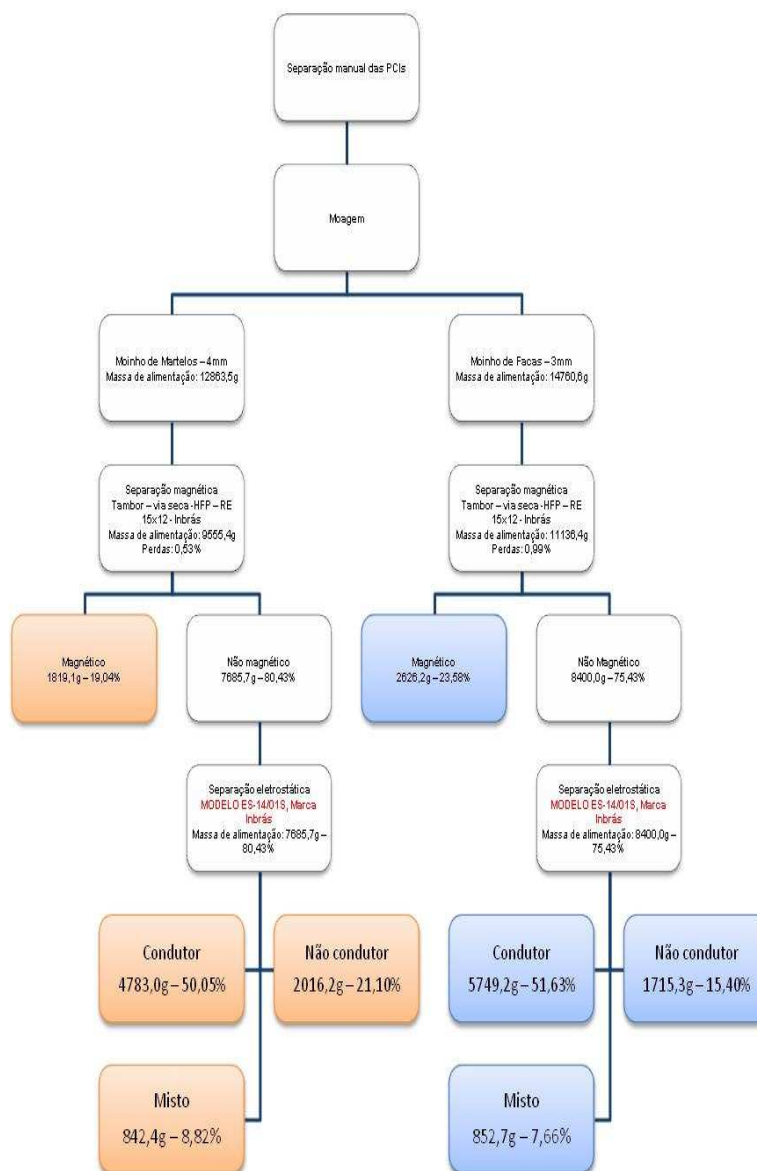


Figura 1 – Fluxograma simplificado do processamento das placas de circuito impresso visando a recuperação de metais.

De acordo com a Figura 1 após a separação magnética é possível recuperar material magnético que constitui cerca de 20% em massa dos resíduos de placas de circuito impresso de aparelhos celulares, isto pode ser observado para os resíduos processados em moinho de martelos e facas. Ainda na figura 1 pode-se observar que após a separação eletrostática é possível recuperar cerca de 50% em massa do resíduos de PCI de aparelhos celulares que constitui a fração de metais condutores. Com a identificação dos resíduos que podem passar pelo processo de recuperação de metais foi realizado o ensaio de digestão em água régia para identificação dos metais, assim como a separação granulométrica seguida de digestão. Os resultados da separação granulométrica podem ser observados nas Figuras 2 e 3.

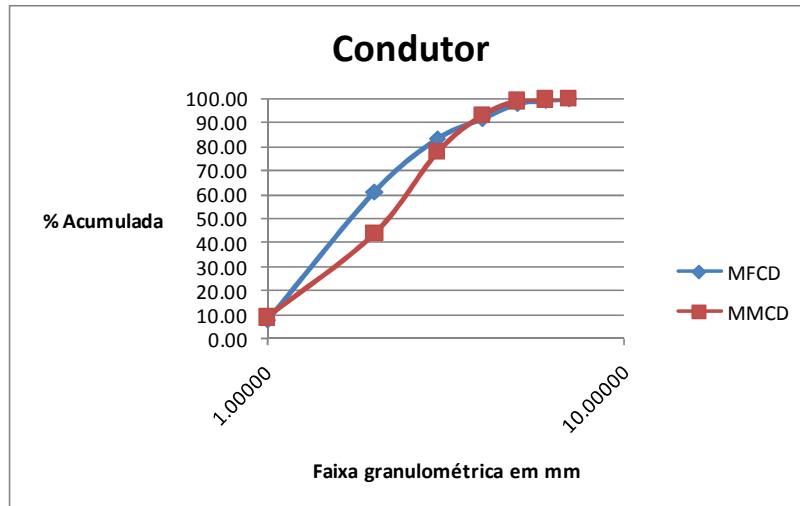


Figura 2 – Separação granulométrica do resíduo condutor de moinho de facas e martelos

A Figura 2 representa a separação granulométrica realizada com os resíduos da moagem em moinho de martelos e facas identificados respectivamente como “MM” e “MF”, a representação “CD” indica que se trata do resíduo condutor.

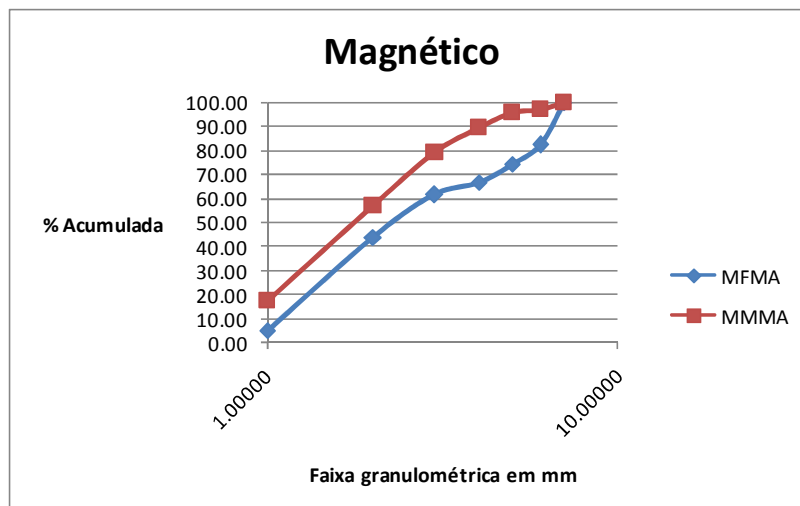


Figura 3 – Separação granulométrica do resíduo magnético de moinho de facas e martelos

As mesma considerações feitas para a Figura 2 devem ser realizadas para a Figura 3, porém a representação “CD” é alterada pela sigla “MA” que indica que se trata de um resíduo magnético.

Cada resíduo coletado em cada faixa granulométrica foi digerido em água régia a fim de solubilizar os metais e por conseqüência foi possível identificá-los e quantificá-los através da análise de ICP descrito na etapa de materiais e métodos, esta etapa é considerada como caracterização dos resíduos.

Os resultados desta caracterização podem ser observados nas Figuras 4 e 5.

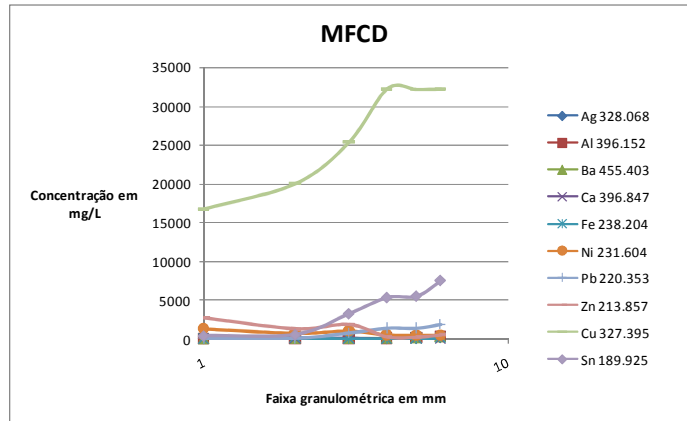


Figura 4 – Concentração de metais em cada faixa granulométrica para moinho de facas.

Pode-se observar na Figura 4 que o cobre é o metal em maior quantidade no resíduo condutor e que ele se concentra nas faixas granulométricas inferior a 0,50 mm para os resíduos oriundos do moinho de facas.

Para o moinho de martelos é possível verificar a concentração de cobre na faixa granulométrica -1,0 mm a +0,075 mm.

Este comportamento do cobre para as faixas granulométricas do moinho de martelos e facas pode estar associado ao processamento de cada moinho e na propriedade do metal em ser dúctil, pois quando o metal está em contato com as facas do moinho ele sofre cisalhamento enquanto que no moinho de martelos o cobre tende a se deformar, portanto formando menos finos com alta concentração de cobre quando comparado ao moinho de martelos.

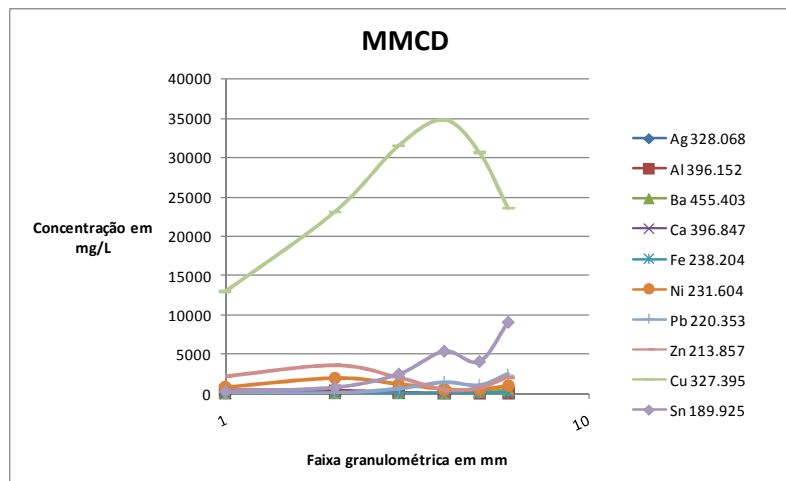


Figura 5 – Concentração de metais em cada faixa granulométrica para moinho de martelos.

Para os resíduos magnéticos após o processamento em moinho de facas e martelos, pode-se observar nas Figuras 6 e 7, respectivamente, que em ambos a concentração de ferro se dá na faixa granulométrica de +2,0 mm a -1,0 mm e este resíduo pode ser reutilizado em indústrias siderúrgicas para fabricação de aço.

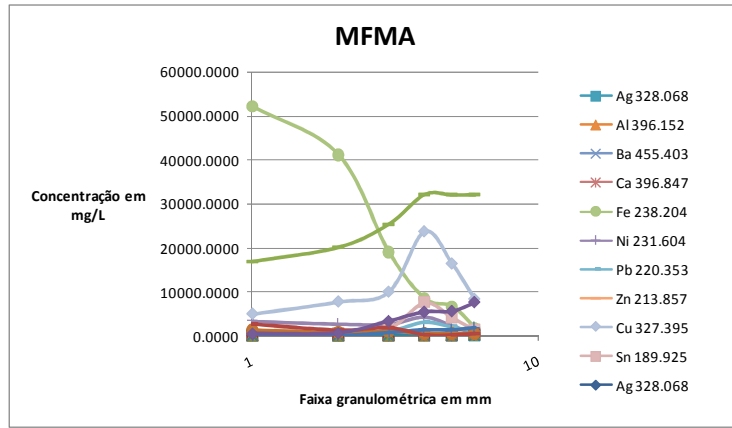


Figura 6 – Concentração de material magnético em cada faixa granulométrica para moinho de facas.

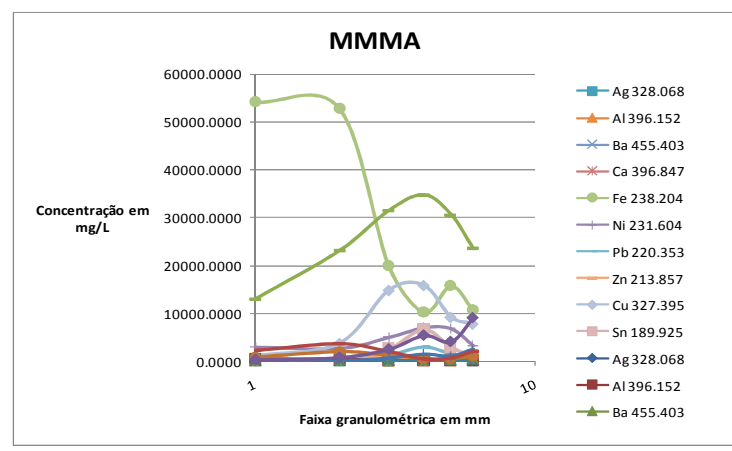


Figura 7 – Concentração de material magnético em cada faixa granulométrica para moinho de martelos.

5 CONCLUSÃO

Com os dados apresentados pode-se concluir que após a separação magnética e separação granulométrica foi possível concentrar o ferro nas faixas entre +2,0mm e -1,0 mm tanto para os resíduos processados em moinho de facas como para moinho de martelos.

O ferro concentrado pode ser reutilizado por empresas siderúrgicas na fabricação do aço.

Para os resíduos após a separação magnética, eletrostática e granulométrica pode-se concluir que o cobre se concentra em frações mais finas, isto é, abaixo de 0,50 mm

Agradecimentos

À Capes – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, LTM – Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da USP.



REFERÊNCIAS

- 1 TAVARES, V. **Caracterização e processamento de telas de cristal líquido visando a reciclagem**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2006.
- 2 HOFFMANN, J. E. Recovering precious metals from electronic scrap. **JOM**, 44(7), p.43-48, jul. 1992.
- 3 Espinosa, D. C. R. **Reciclagem de baterias de níquel-cádmio**. 2002. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002.
- 4 TENORIO, J.A.S., ESPINOSA, D.C.R. **Capítulo 5: Controle Ambiental de Resíduos**. In: PHILIPPI Jr, A., ROMÉRO, M.A., BRUNA, G.C. Curso de Gestão Ambiental. 1ª ed. Editora Manole Ltda, 2004. p. 155-211.
- 5 HARADA, Masazumi et al. Minamata Disease: Methylmercury Poisoning in Japan Caused by Environmental Pollution. **Critical Reviews In Toxicology**, Nd, v. 25, n. , p.1-24, 1995.
- 6 SUM, E. Y. L. The recovery of metals from electronic scrap. **JOM**, p. 53-61, abr. 1991.
- 7 ARAUJO, M. C. P. B. ; CHAVES, A. P. ; ESPINOSA, D. C. R. ; TENÓRIO, J. A. S. . Reciclagem de fios e cabos elétricos cabo paralelo. Revista da Escola de Minas, v. 61, p. 391-396, 2008.
- 8 ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Recycling of nickel cadmium batteries using coal as recucing agent. **Journal Of Power Sources**, São Paulo, v. 157, p.600-604, 2006.
- 9 Tenório, J. A. (1997). Production of non ferrous metallic concentrates from electronic scrap. **Minerals, Metals and Materials Society/AIME (USA)** , p. 505-509.
- 10 VEIT, H. M. ; BERNARDES, A. M. ; Ferreira, J. Z. ; TENORIO, J. A. S. . Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. Journal of Hazardous Materials, v. B137, p. 1704-1709, 2006.
- 11 ESPINOSA, D. C. R. ; TENÓRIO, J. A. S. . Reciclagem de Baterias: Análise da Situação Atual no Brasil, v. 1, p. 14-20, 2004.
- 12 BERNARDES, A. M. ; ESPINOSA, D. C. R. ; TENÓRIO, J. A. S. . Collection and recycling of portable batteries: a worldwide overview compared to the Brazilian Situation. Journal of Power Sources, AMSTERDAM, v. 214, n. 2, p. 586-592, 2003.
- 13 Cui, J., & Forseberg, E. (2003). Mechanical recycling of waste eletric and electronic equipment: a review. **Journal of hazardous materials** , B99, p. 243-263.
- 14 VEIT, H. M.. **Reciclagem de cobre de sucata de placa de circuito impresso**. 2005. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- 15 WILLIAM, J. H., & WILLIAMS, P. T. (2007). Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards. **Resources Conservation e Recycling**. UK, v 51. p. 691-709.
- 16 G1 o portal de notícias da Globo. **Descarte de celulares joga US\$ 63 milhões por ano no lixo**. 11/01/2008. Disponível em: <http://g1.globo.com/Noticias/Economia_Negocios/0,,MUL256344-9356,00-DESCARTE%2BDE%2BCELULARES%2BJOGA%2BUS%2BMILHOES%2BPOR%2BANO%2BNO%2BLIXO.html> Acessado em 01/04/2009.
- 17 ABINEE. **Desempenho Setorial - Dados Atualizados em Fevereiro de 2009**. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm>> Acessado em: 01/04/2009.
- 18 United States Geological Survey (USGS), Obsolete Computers, “Gold Mine”, or High-Tech Trash? Resource Recovery from Recycling. Disponível na Internet : <http://pubs.usgs.gov/fs/fs060-01/fs060-01.pdf> (10/08/2004).

- 19 BERTUOL, D. A.; VEIT, H.; BERNARDES, A. M.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. **Resíduos Urbanos Tecnológicos – Desafios e Tendências**. Revista Metalurgia e Metais, volume 61, 554, abril (2005). Pg. 167-170.
- 20 TENORIO, J. A. S., MENETTI, R. P., CHAVES, A. P. Production of non-ferrous metallic concentrates from electronic scrap. In: Minerals, Metals and Materials Society/AIME (USA), pp. 505-509, 1997.
- 21 ZHANG, S; FORSSBERG, E; MENAD, N; BJORKMAN, B. Metals recycling from electronic scrap by air table separation--theory and application. In: EPD Congress 1998, San Antonio, TX, USA, 16-19 Feb. 1998. Minerals, Metals and Materials Society/AIME (USA), pp. 497-515, 1998
- 22 TOMASEK, K; VADASZ, P; RABATIN, L Gold extraction from the electronical scrap. **Acta Metallurgica Slovaca** (Slovak Republic), vol. 6, no. 2, p. 116-124, 2000.
- 23 WANG, H. P.; CHIEN, Y. Fate of bromine in pyrolysis of printed circuit board wastes. **Chemosphere**, 40, p. 383-387, 2000.
- 24 VEIT H.M., PEREIRA C.D., BERNARDES A.M. Using mechanical processing in recycling printed wiring boards. **JOM**, 54(6), p. 45-47, Jun. 2002.
- 25 KOZLOWSKI, J; MAZUREK, T; CZYZYK, H. The recovering metals and alloys from the electronic scrap. **Metall** (Germany), vol. 54, no. 11, pp. 645-649, 2000
- 26 VEIT, H. M. **Emprego do processamento mecânico na reciclagem de sucatas de Placas de Circuito Impresso**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. p. 1-9, 87.
- 27 KROWINKEL, J.M.; DALMIJN, W.L. Processing of televisions by mechanical separation techniques. Implications for future work in product design and recycling. In: Fourth International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials, Pittsburgh, PA, USA, 22-25 Oct. 2000, Minerals, Metals and Materials Society/AIME, pp. 47-59, 2000.
- 28 ESPINOSA, D.C.R., OLIVEIRA D.C., TENÓRIO, J.A.S. Introdução aos processos de reciclagem de pilhas e baterias. In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE METAIS NÃO-FERROSOS, 19 de outubro de 2000. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), São Paulo. 2000. p. 121-137.
- 29 ESPINOSA, D.C.R., TENÓRIO, J.A.S. Recovery of Ni-based alloys from NiMH batteries. **Journal of Power Sources**, v. 108, 2002. p. 70-73.
- 30 BERNARDES, A.M., ESPINOSA D.C.R., TENORIO J.A.S. Recycling of batteries: a review of current processes and technologies. **Journal of Power Sources** 130 (1-2), 2004. p. 291-298.
- 31 BERNARDES, A.M., ESPINOSA D.C.R., TENORIO J.A.S. Collection and recycling of portable batteries: a worldwide overview compared to the Brazilian situation. **Journal of Power Sources** 124 (2), 2003. p. 586-592.