

RECICLAGEM DE SUCATAS ELETRÔNICAS ATRAVÉS DA COMBINAÇÃO DE PROCESSOS MECÂNICOS E ELETROQUÍMICOS

H. M. Veit; A. M. Bernardes

Av. Bento Gonçalves 9500 – Setor 4, Prédio 74, sala 105

Campus do Vale - UFRGS – CEP: 91501-970

Porto Alegre – RS – Brasil

hugomv@pop.com.br

Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais
UFRGS

RESUMO

O crescimento constante na geração de resíduos sólidos em todo o mundo tem estimulado estudos para os mais variados tipos de resíduos. As sucatas eletrônicas fazem parte deste universo de materiais obsoletos e/ou defeituosos que necessitam ser dispostos ou então reciclados. Neste trabalho foram estudadas as Placas de Circuito Impresso que fazem parte das sucatas eletrônicas e que são encontradas nos equipamentos eletro-eletrônicos. Para realizar esse estudo foram coletadas placas de circuito impresso (PCI) obsoletas ou defeituosas de computadores pessoais. As PCI são compostas de polímeros, cerâmicos e metais, o que dificulta o seu processamento. Na primeira etapa deste trabalho foi utilizado processamento mecânico, como moagem, separação granulométrica, magnética e eletrostática para obter uma fração concentrada em metais (principalmente Cu) e uma outra fração contendo polímeros e cerâmicos. Na segunda etapa a fração concentrada em metais foi dissolvida e enviada para uma eletroobtenção a fim de recuperar o cobre.

Palavras-chave: Reciclagem, Cobre, Placas de Circuito Impresso.

INTRODUÇÃO

A quantidade de equipamentos eletro/eletrônicos produzidos atualmente é muito grande, e tem crescido constantemente devido ao aumento do consumo destes bens pela população e também devido à pequena vida útil desses equipamentos.

O número de computadores pessoais descartados globalmente está previsto para alcançar 150 milhões de unidades por ano a partir de 2005 (Leroy, 1998).

Conseqüentemente a quantidade de material obsoleto e defeituoso cresce na mesma proporção e seu descarte se torna necessário. A reciclagem deste tipo de

sucatas ainda é bastante limitada devido à heterogeneidade dos materiais presentes e a complexidade de produção destes equipamentos.

As PCI fazem parte destes equipamentos e sua composição é bastante variada, contendo polímeros, cerâmicos e metais. A quantidade de metais, em especial o cobre, torna essas sucatas uma matéria prima interessante do ponto de vista econômico. Também a presença de chumbo em sua composição estimula estudos para sua reciclagem do ponto de vista ambiental, já que o chumbo é um metal pesado que pode causar danos ao ambiente se disposto de maneira incorreta.

Os processos de reciclagem de PCI existentes utilizam métodos pirometalúrgicos (Bernardes et al., 1997; Felix & Riet, 1994) ou hidrometalúrgicos (Hoffmann, 1992), os quais geram respectivamente, poluição atmosférica através da liberação de dioxinas e furanos (Menad et al., 1998) ou grandes volumes de efluentes.

Neste trabalho pretende-se utilizar processamentos mecânicos (Veit et al., 2002; Noakes, 1999; Zhang & Forssberg, 1997; Tenório et al., 1997) como uma alternativa para concentrar os metais em uma fração e os polímeros e cerâmicos em outra e após utilizar processos eletroquímicos (Brown, 1992; Brandon et al., 2002; Veit et al., 2005) a fim de separar os metais entre si.

Na separação magnética e separação eletrostática foram utilizadas as sucatas de PCI previamente cominuídas abaixo de 1 mm (para garantir um ótimo grau de liberação dos metais) (Zhang & Forssberg, 1997) e separadas granulométricamente em 3 frações distintas: $F1 < 0,25\text{mm}$; $0,25 < F2 < 0,50\text{ mm}$ e $0,50 < F3 < 1,00\text{ mm}$.

Na etapa de eletroobtenção foram utilizadas as frações previamente concentradas através da separação eletrostática. Essas frações foram dissolvidas com água-régia ou ácido sulfúrico e então colocadas em uma célula eletroquímica a fim de recuperar os metais separadamente.

As frações concentradas em metais foram analisadas quimicamente para identificar seus teores e a eficiência destas separações. As frações não condutoras, ou seja, as contendo polímeros e cerâmicos, também foram analisadas a fim de verificar os teores remanescentes de chumbo.

EXPERIMENTAL

Preparação, Cominuição e Separação Granulométrica:

As sucatas de placas de circuito impresso utilizadas neste trabalho provém de equipamentos (microcomputadores, TVs, vídeo cassetes, etc.) danificados ou obsoletos. Foram utilizados cerca de 3 kg de placas de circuito impresso.

A amostra foi cominuída em moinhos de facas até atingir granulometrias inferiores a 1 mm. A amostra foi então separada granulométricamente em 3 frações diferentes: $F1 < 0,25$ mm; $0,25 < F2 < 0,50$ mm e $0,50 < F3 < 1,00$ mm.

A composição química deste tipo de sucata está apresentada na tabela I.

Tabela I – Composição química para PCI completas após cominuição e separação granulométrica (Veit et al., 2002).

PCI			
(%)	F1	F2	F3
Cobre	6,28	23,53	24,34
Ferro	0,13	0,13	0,18
Alumínio	3,01	1,55	1,56
Níquel	0,05	0,20	0,20
Chumbo	0,35	0,95	1,35
Estanho	2,51	2,50	2,51

Separação Magnética:

Cada fração da amostra foi então separada magneticamente em um separador magnético de esteira por via seca, utilizando, em média, um campo magnético de 6000 a 6500 Gauss.

Desta etapa obtivemos uma fração magnética e uma fração não magnética. A fração não magnética foi encaminhada para um separador eletrostático, que vai separar materiais condutores de não condutores.

Separação Eletrostática:

O separador eletrostático utilizado foi o modelo ES1010 da marca Equimag. A figura 1 mostra esquematicamente o funcionamento do separador eletrostático.

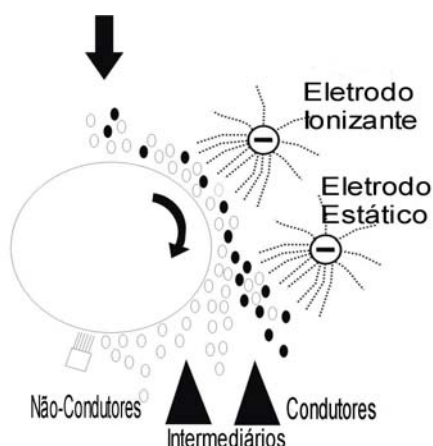


Figura 1 – Funcionamento de um Separador Eletrostático.

Neste trabalho o separador eletrostático foi regulado da seguinte maneira:

- ❖ Eletrodo Ionizante: distância do rotor = 25 cm
Ângulo = 80°
- ❖ Eletrodo Estático: distância do rotor = 25 cm
Ângulo = 52,5°
- ❖ Rotação do Rotor: 85 rpm
- ❖ Fonte de Alta Tensão: 45 – 46 kV

Da separação eletrostática retirou-se uma fração condutora e uma fração não condutora. As amostras magnéticas, condutoras e não condutoras foram analisadas quimicamente.

Eletroobtenção:

Após obter-se frações concentradas em metais através de processamentos mecânicos (cominuição, classificação granulométrica, separação gravimétrica, magnética, eletrostática, etc.) é necessário algum outro processo a fim de obter os metais separadamente. Neste trabalho optou-se por técnicas eletrometalúrgicas que também são utilizadas na metalurgia primária do cobre, como a eletroobtenção e o eletrorefino. O cobre é encontrado na natureza na forma de sulfetos (90% dos minérios) ou óxidos. Em ambos os casos, processos de eletroobtenção ou eletrorefino são utilizados na metalurgia extrativa do cobre.

Os ensaios de eletroobtenção foram realizados com um potenciostato da marca EG&G modelo 362. Foram feitas eletroobtenções com as duas soluções reais da F3 de PCI (dissolvida com Ácido Sulfúrico e com Água-Régia).

Para realizar as eletroobtenções utilizou-se duas soluções diferentes:

- Com água régia: usualmente empregado em laboratório, mas de difícil utilização industrial.
- Com ácido sulfúrico: usualmente empregado na indústria, mas de dissolução mais lenta.

A célula foi montada usando uma placa de cobre como cátodo e uma placa de platina como ânodo. As eletroobtenções foram realizadas aplicando 40 mA/cm^2 como densidade de corrente, valor obtido através de ensaios de voltametrias cíclicas.

RESULTADOS

Separação Magnética

Os resultados estão apresentados na figura 2, que mostra a percentagem de material magnético para cada fração granulométrica, e na figura 3, onde estão mostrados os teores de Fe, Ni, Cu e Pb após análise química. Os metais analisados foram escolhidos da seguinte maneira: por serem ferromagnéticos, ou seja, deveriam estar presentes após uma separação magnética, casos do Fe e do Ni; por ser o metal mais encontrado nas placas de circuito impresso e o principal metal estudado neste trabalho, caso do Cu e por ser o metal que torna as placas de circuito impresso resíduos perigosos, caso do Pb.

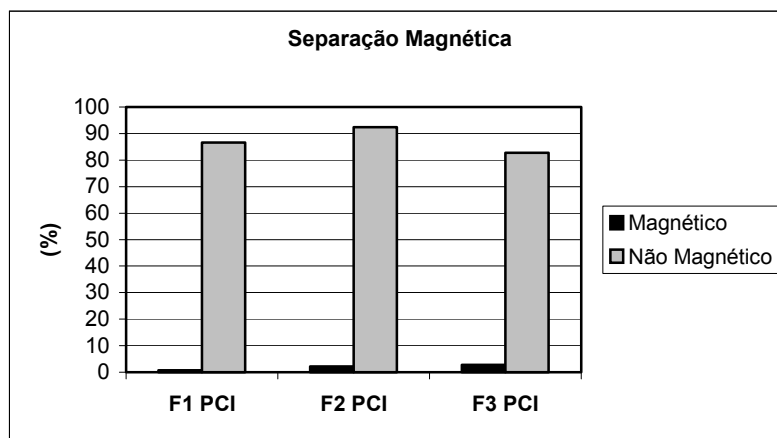


Figura 2 – Percentagem de material magnético e não magnético após separação magnética.

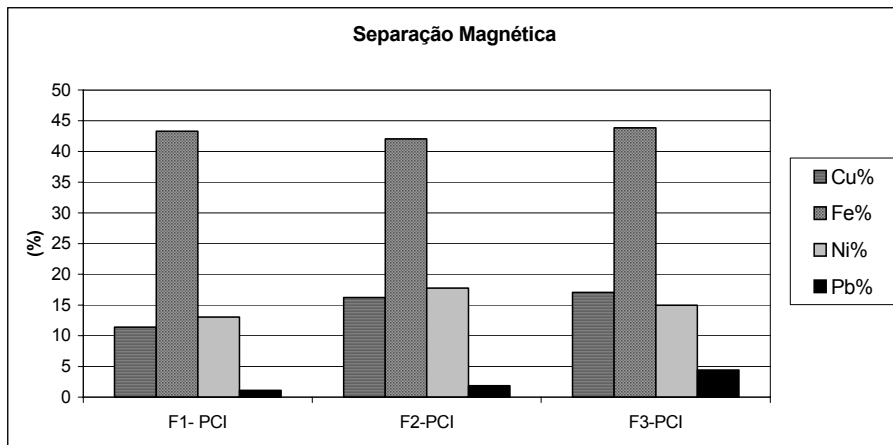


Figura 3 – Análise química das frações magnéticas após separação magnética.

Separação Eletrostática

Os gráficos a seguir apresentam as porcentagens de materiais condutores em cada fração granulométrica (figura 4) e os teores de metais obtidos após a separação eletrostática (figura 5). Os metais analisados foram escolhidos por serem bons condutores e também por serem os metais com os maiores teores encontrados nas placas de circuito impresso.

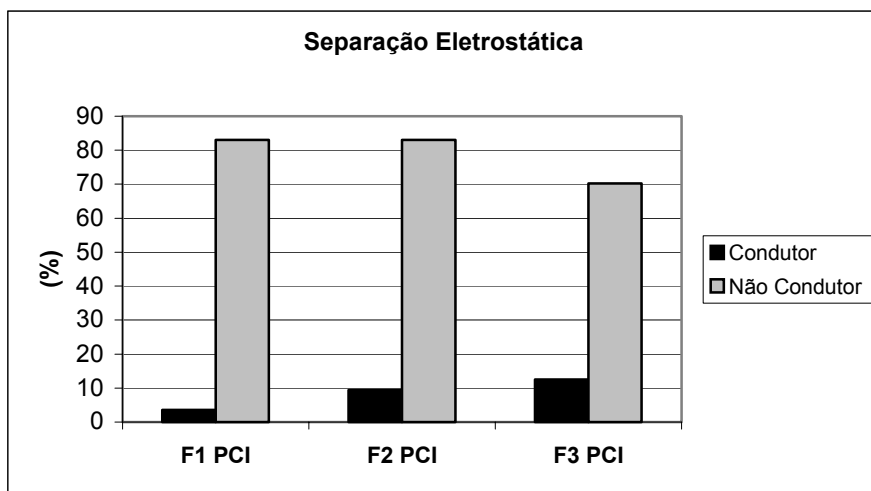


Figura 4 – Percentagem de material condutor e não condutor após separação eletrostática.

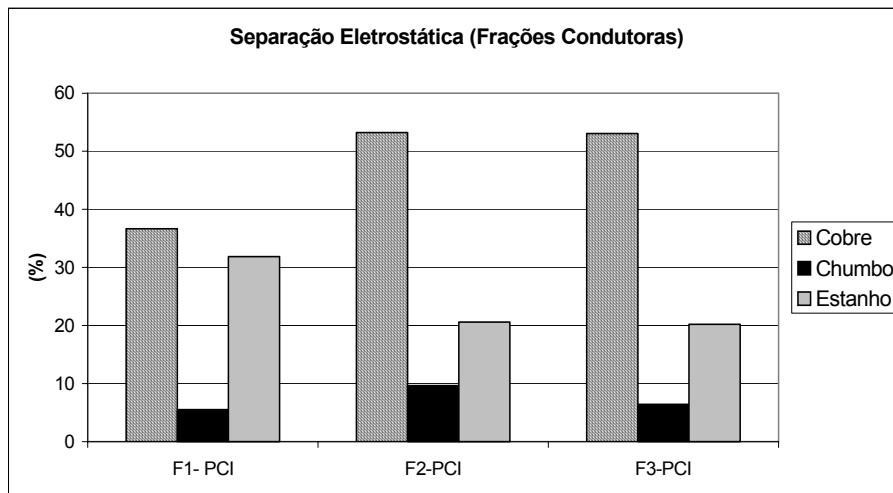


Figura 5 – Análise química para as frações condutoras após separação eletrostática.

Eletroobtenção:

Os resultados para os testes de eletroobtenção estão apresentados a seguir. Para a amostra de PCI dissolvida com ácido sulfúrico os resultados estão apresentados na figura 6 e para a solução com água régia na figura 7.

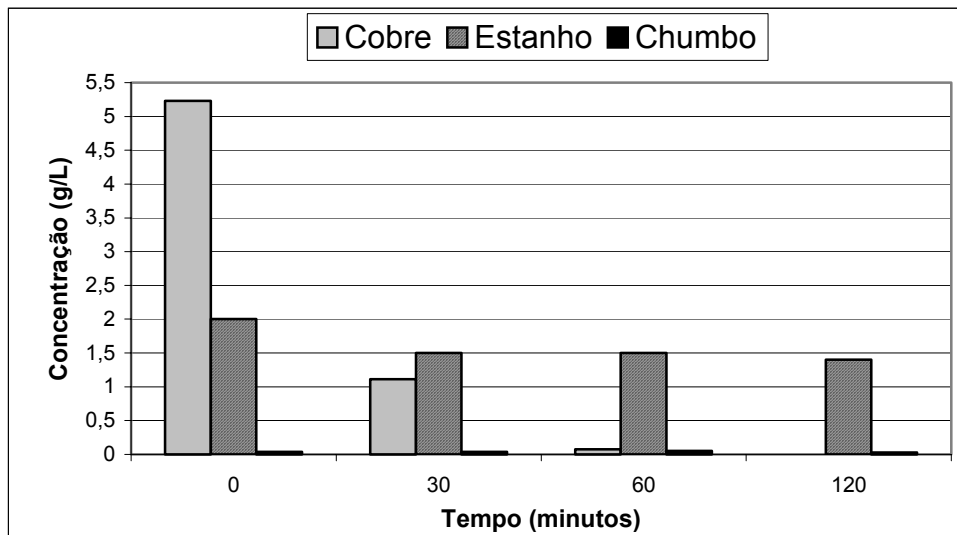


Figura 6 – Variação da concentração de cobre, estanho e chumbo em relação ao tempo em uma solução real de PCI dissolvida com ácido sulfúrico no ensaio de eletroobtenção.

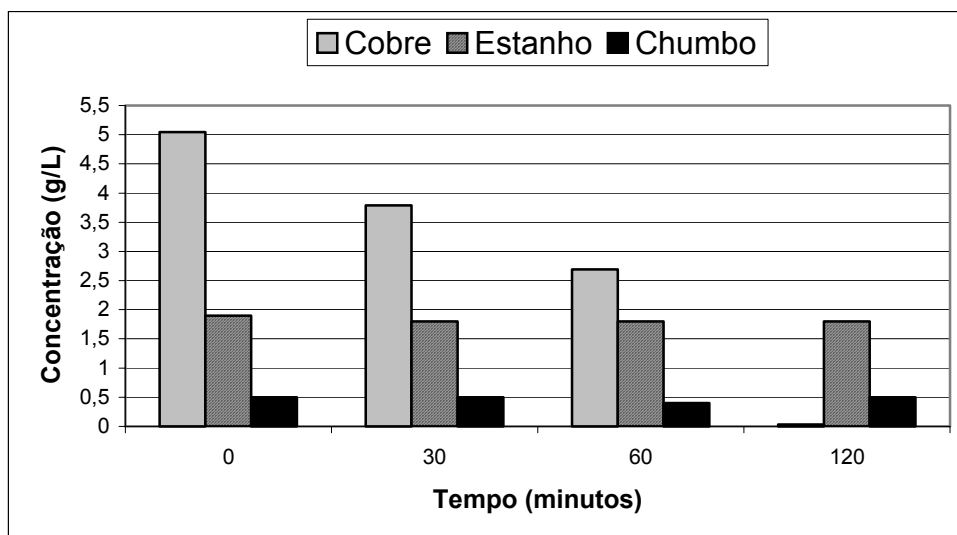


Figura 7 - Variação da concentração de cobre em relação ao tempo em uma solução real de PCI dissolvida com água régia no ensaio de eletroobtenção.

Nas tabelas II e III estão apresentados os resultados das análises químicas nas camadas eletrodepositadas para diferentes tempos de ensaio.

Tabela II - Análise Química por Fluorescência de Raio X do depósito obtido por eletroobtenção para a solução de PCI dissolvida com ácido sulfúrico nos tempos de 30, 60 e 120 minutos de deposição.

(%)	30	60	120
Cobre	98.9	99.5	97.3
Estanho	0.6	0.1	0.7
Chumbo	n.d.	0.1	0.4
Ferro	0.04	0.04	0.06
Bromo	0.07	0.08	0.1
Zinco	0.3	n.d.	1.2
Níquel	0.02	n.d.	0.05

n.d. = não determinado

Tabela III - Análise Química por Fluorescência de Raio X do depósito obtido por eletroobtenção para a solução de PCI dissolvida com água-régia nos tempos de 30, 60 e 120 minutos de deposição.

(%)	30	60	120
Cobre	97.6	99.3	95.9
Estanho	1.4	0.4	2.2
Chumbo	0.8	0.1	0.9
Ferro	0.07	0.04	0.07
Bromo	0.04	n.d.	0.04
Zinco	n.d.	n.d.	0.6
Níquel	n.d.	n.d.	0.03

n.d. = não determinado

DISCUSSÃO

Como já era esperado, as frações separadas magneticamente apresentaram altos teores de Fe, comprovando a eficiência deste tipo de separação.

Embora a quantidade de material magnético presente em placas de circuito impresso seja pequena, é interessante separá-lo antecipadamente, pois assim as frações condutoras estarão ainda mais concentradas em cobre.

Já na separação eletrostática também obtivemos ótimos resultados: a percentagem de material condutor é bastante significativa, principalmente na fração F3 com 13% de material condutor (figura 4). Também pode-se ver que os teores de cobre alcançaram mais de 50% em massa nas frações F2 e F3 condutoras e significativos teores de Pb e Sn. A presença majoritária destes três elementos era esperada, pois o cobre é ótimo condutor e é o elemento metálico mais presente nas PCI. Já o Pb e o Sn são usados nas soldas dos componentes eletrônicos ao substrato, ou seja, também são ótimos condutores e também estão presentes em significativas quantidades.

Nos ensaios de eletroobtenção pode-se ver que o teor de cobre em solução decaiu rapidamente em todos os casos. Para a amostra dissolvida com ácido sulfúrico (figura 6) este decaimento ocorreu em um intervalo de tempo menor do que na amostra dissolvida com água-régia (figura 7).

Na solução de PCI com ácido sulfúrico, figura 6, em 60 minutos o teor de cobre já está próximo de zero, enquanto na solução com água régia, no tempo de 60 minutos ainda existe cerca de 50 % do teor de cobre original.

Além disso podemos ver também que o teor de estanho e chumbo na amostras dissolvidas com ácido sulfúrico ou água régia não diminuíram significativamente, comprovando que somente os íons cobre, que estavam em solução, estão sendo depositados no cátodo.

Com relação ao cátodo, podemos ver nas tabelas II e III que o cobre é o principal elemento depositado e apresenta teores acima de 95%, comprovando o que as figuras 6 e 7 mostravam, ou seja, que os íons cobre estavam saindo da solução e depositando-se no cátodo.

Também é importante salientar que o cobre depositado no cátodo forma uma camada aderente, o que é muito útil, pois mesmo após cessar o processo de eletroobtenção o cobre não retornará a solução.

CONCLUSÃO

A utilização de separação magnética e separação eletrostática mostrou-se muito eficiente para obter-se frações concentradas em metais a partir de sucatas de placas de circuito impresso.

Com os ensaios de eletroobtenção podemos ver que é possível recuperar os metais separadamente, em especial o cobre, possibilitando que estes metais sejam agora empregados em indústrias secundárias.

As frações não condutoras (que contém polímeros e cerâmicos) necessitam de mais estudos para serem dispostas adequadamente ou enviadas a processos de reciclagem de polímeros e cerâmicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES (PROCAD), FAPERGS e CNPq.

BIBLIOGRAFIA

1. BERNARDES, A.; BOHLINGER, I.; MILBRANDT, H.; RODRIGUEZ, D.; WUTH, W.: Recycling of printed circuit boards by melting with oxidising/reducing top blowing process. In: TMS ANNUAL MEETING, Orlando, Flórida, EUA, 1997.
2. BRANDON, N. P.; KELSALL, G. H.; SCHMIDT, M. J.; YIN, Q.: Metal recovery from electronic scrap by leaching and electrowinning. In: RECYCLING AND WASTE TREATMENT IN MINERAL AND METAL PROCESSING: TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS, Luleá, Sweden, 2002.
3. BROWN, C. J.: Metal recovery by ion exchange and electrowinning. **Electrochemistry for a Cleaner Environment**. The Electrosynthesis Company Inc. New York. 1992. p. 183 – 205.
4. FELIX, N.; RIET, C.: Recycling of electronic scrap. In: PRECIOUS METALS CONFERENCE, Vancouver, Canada, p. 159 -169, 1994.
5. HOFFMANN, J.E.: Recovery of precious metals from electronic scrap. **JOM**. v. 6, p. 43 – 48, 1992.
6. LEROY, W. E.; Scrap from electronic seen 'skyrocketing'. **American Metal Market**. Oct 14, p. 1 – 2, 1998.

7. MENAD, N.; BJÖRKMAN, BO.; ALLAIN, E. G.: Combustion of plastics contained in electric and electronic scrap. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 24, p. 65 – 85, 1998.
8. NOAKES, M.J.: Using mineral processing technologies for the treatment of hazardous substances. In: REWAS. v.1. TMS. p. 27 – 36, 1999.
9. TENÓRIO, J. A. S.; MENETTI, R. P.; CHAVES, A. P.: Production of non-ferrous metallic concentrates from electronic scrap. In: EPD Congress. TMS, p. 505-509, 1997.
10. VEIT, H. M.; PEREIRA, C. C.; BERNARDES, A. M.: Using mechanical processing in recycling printed wiring boards. **JOM**. June, p. 45 – 47, 2002.
11. VEIT, H. M.; PEREIRA, C. C.; HÖRLLE, L. F.; BERNARDES, A. M.: Recycling of metals from PCB by dense medium separation process. In: RECYCLING AND WASTE TREATMENT IN MINERAL AND METAL PROCESSING: TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS. Luleá, Sweden. 2002.
12. VEIT, H. M.; DIEHL, T. R.; SALAMI, A. P.; RODRIGUES, J.S.; BERNARDES, A. M.; TENÓRIO, J. A. S.: Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap. **Waste Management**. v. 25, p. 67 - 74, 2005.
13. ZHANG, S.; FORSSBERG, E.: Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 21, p. 247 – 269, 1997.

RECYCLING OF ELECTRONIC SCRAP BY COMBINATION OF MECHANICAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESS

The constant growth in generation of solid residues in the world stimulates studies for most types of residues recycling. The electronic scraps are part of this universe of obsolete and/or defective materials that need to be disposed or then recycled. In this work Printed Circuit Boards, that are part of electronic scraps and are found in electro-electronic equipments, were studied. Printed circuit boards were collected in obsolete or defective personal computers. PCB are composed of polymers, ceramics and metals, difficulting its processing. At the first stage of this work mechanical processing was used as comminution, size, magnetic and electrostatic separation to obtain a concentrated fraction in metals (mainly Cu) and another fraction containing polymers and ceramics. At the second stage, the fraction concentrated in metals was dissolved and send to an electrochemical process in order to recover the copper.

Key- words: Recycling, Copper, Printed Circuit Boards.