

# CONCENTRAÇÃO DE METAIS CONTIDOS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO<sup>1</sup>

Pedro Paulo Medeiros Ribeiro<sup>2</sup>  
Yuri Ferreira Guimarães<sup>2</sup>  
Iranildes Daniel dos Santos<sup>3</sup>  
Achilles Junqueira Bourdout Dutra<sup>4</sup>

## Resumo

Uma das questões importantes para a indústria hoje, é encontrar uma maneira eficiente para aproveitar ao máximo a matéria-prima empregada em seus processos e, ainda mais importante, saber o que fazer com os resíduos gerados. Neste trabalho, placas de circuito impresso (PCIs) de computadores obsoletos foram picotadas, cominuídas, classificadas por peneiramento e os metais metálicos foram processados em classificador Zig-Zag. Os resultados mostraram que, após classificação uma maior concentração de metais foi obtida nas frações de maior granulometria. Um teor de 55% de cobre, no concentrado, foi obtido após o processamento do material em classificador Zig-Zag. Após processamento manual, a concentração de ouro nas PCIs aumentou de cerca de 200 ppm para 8.000 ppm, levando a um processamento distinto dos outros metais. Os resultados mostraram ainda que a concentração de cobre contida nas PCIs por cominuição e peneiramento seguido de processamento em classificador Zig-Zag se mostrou eficiente.

**Palavras-chave:** Placas de circuito impresso; Reciclagem, Recuperação de cobre.

## METALS CONCENTRATION FROM PRINTED CIRCUIT BOARDS

### Abstract

One of the most important issues in the industry today, is finding out an efficient way to use most of the raw materials and recycling waste and residues. In this work, printed circuit boards (PCBs) of obsolete computers were comminuted, classified by screening and processed in a Zig-Zag classifier. Results shown that, after the classification by screening, metals were segregated in the larger particle size fractions. Results shown that, under favorable conditions, metallic concentrations up to 55% (wt) of copper were obtained with the Zig-Zag classifier. After manual processing, the gold concentration content in the PCBs was increased from 200 ppm to 8,000 ppm leading to a distinct processing. In this way, results shown that comminution and screening of followed by Zig-Zag classifier processing can be an efficient alternative to concentrated metals from PCBs.

**Key words:** Printed circuit boards; Recycling; Copper recovery.

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

<sup>2</sup> Graduandos, PEMM, COPPE, UFRJ, RJ, Brasil; pmedeirosribeiro@poli.ufrj.br; yfquimaraes@metalmat.ufrj.br.

<sup>3</sup> Química, D.Sc., PEMM, COPPE, UFRJ, RJ, Brasil; isantos@metalmat.ufrj.br;

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico. D.Sc., PEMM, COPPE, UFRJ, RJ, Brasil; isantos@metalmat.ufrj.br;

## 1 INTRODUÇÃO

Há 100 anos, os meios de comunicação eram baseados em cartas e conversas. Com o passar dos anos, entretanto, devido à necessidade de se transmitir informações cada vez mais rápidas e da necessidade de se estar presente em todas as partes do mundo, surgiu a globalização. Neste contexto, grandes investimentos foram e estão sendo continuamente realizados com o objetivo de desenvolver tecnologias que facilitem a comunicação. Surgiram, então, os telefones residenciais, celulares, *desktops*, *notebooks*, *paggers* etc. Estes produtos se tornaram ferramentas indispensáveis para a sociedade devido aos inúmeros benefícios proporcionados. Assim, novos produtos eletrônicos surgem com uma frequência cada vez maior, tornando obsoletos os produtos da geração anterior, formando o lixo eletrônico.<sup>(1)</sup>

As placas de circuito impresso (PCIs) são componentes essenciais da maioria dos equipamentos elétricos e eletrônicos. As PCIs são formadas basicamente por materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos.<sup>(2-4)</sup> Dentre os materiais metálicos, estão ouro, prata, platina, paládio, chumbo, níquel, estanho, alumínio, cobre (metal presente em maior quantidade) etc.<sup>(4,5)</sup>

A produção mundial de PCIs cresceu mais de 8,7% em 2005.<sup>(6)</sup> Estima-se que a geração de lixo de equipamentos elétricos e eletrônicos (LEEE)<sup>(6)</sup> em todo o planeta, esteja em torno de 20 milhões a 50 milhões de toneladas por ano. No Brasil, estima-se que a geração deste tipo de lixo seja aproximadamente 0,5 kg per capita por ano.<sup>(7)</sup> Dessa forma, a reciclagem das PCIs é extremamente importante, tanto do ponto de vista econômico, devido à presença de grande quantidade de metais valiosos, quanto do ponto de vista ambiental em função da toxicidade de alguns destes metais, além de outras substâncias tóxicas.

Vários métodos podem ser utilizados para recuperação de metais presentes em PCIs, tais como o processamento mecânico, pirometalúrgico e o hidrometalúrgico. O processamento mecânico envolve operações tais como desmontagens, (geralmente manual), cominuição, classificação granulométrica, concentração gravimétrica, magnética e eletrostática. As vantagens deste tipo de processamento consistem no fato de não gerar dioxinas e furanos e não usar soluções químicas de caráter corrosivo e de difícil descarte no meio ambiente. Outra vantagem é que as técnicas mecânicas envolvidas na classificação, geralmente são feitas a seco devido ao menor custo operacional.<sup>(8)</sup> Porém, a eficiência desses processos depende, não só do consumo energético, mas também da seletividade, uma vez que as PCIs são compostas por estruturas compactas, duras e dúcteis. Uma das formas de classificar o material é por meio de peneiramento. É possível se obter frações ricas em determinados materiais por meio do uso de classificadores pneumáticos para separar os diferentes materiais, baseando-se na diferença de densidade e formato das partículas.<sup>(9,10)</sup> Biddulph<sup>(11)</sup> utilizou classificador a ar vertical para separação de resíduos sólidos e observou que o tamanho de partículas apresenta influência na eficiência de separação. Eswaraiah et al.<sup>(12)</sup> também utilizaram um classificador vertical na separação plástico/metal. Estes autores mostraram que a variação da velocidade do ar também influencia significativamente a eficiência de separação. Eles observaram ainda que a discrepância entre os valores esperados e os encontrados foi maior para os metais que para os plásticos. Este comportamento foi atribuído à velocidade terminal das partículas, uma vez que uma pequena alteração no tamanho das partículas resulta em grande variação da velocidade terminal para os metais, que possuem elevada densidade, enquanto que para os plásticos essa variação não é tão acentuada.

O processo pirometalúrgico, via de regra, faz uso da concentração de metais em uma fase metálica líquida e a rejeição da maioria dos materiais contaminantes em uma fase escória, também líquida.<sup>(13)</sup> A desvantagem deste método é a contaminação ambiental devido à geração de dioxinas e furanos durante o aquecimento, além do custo do processo ser bastante elevado.<sup>(14,15)</sup> Quanto ao processamento hidrometalúrgico, este consiste em uma série de ataques com soluções ácidas ou cáusticas<sup>(16)</sup> para dissolver o material metálico de interesse.<sup>(17)</sup> Posteriormente, as soluções devem ser purificadas para a recuperação do metal,<sup>(17,18)</sup> geralmente por eletrólise. Ubalдини et al.<sup>(19)</sup> estudaram a recuperação de metais de resíduos da indústria eletrônica e galvânica. Após a lixiviação seguida de eletrorrecuperação, 95% do Cu lixiviado foi recuperado.

Como forma de reduzir a quantidade de PCIs descartadas no meio ambiente, muitos países têm modificado sua legislação com o objetivo de incentivar o reuso e a reciclagem destas PCIs evitando o descarte inadequado.<sup>(20)</sup> No Brasil, a Lei 12.305/2010<sup>(21)</sup> autoriza o poder público a estabelecer diretrizes sobre a responsabilidade das indústrias quanto ao descarte dos produtos após consumo.<sup>(22)</sup>

O objetivo deste trabalho foi concentrar os principais metais, principalmente o cobre, presentes em placas de circuito impresso (PCIs) usando cominuição e peneiramento seguido de processamento em classificador Zig-Zag.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

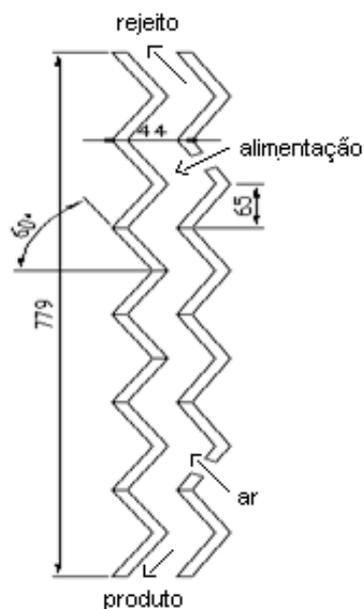
As placas de circuito impresso (PCIs) foram coletadas de computadores obsoletos dos laboratórios da Coppe, UFRJ. Inicialmente foi realizada uma desmontagem manual para remoção dos componentes eletrônicos, tais como capacitores, resistores e baterias. Após esta separação, as PCIs foram picotadas a um tamanho aproximado de 2 mm x 80 mm e em seguida foram cominuídas em moinho de facas tipo Wyllie a um tamanho inferior a 1,2 mm.

### 2.2 Classificação Granulométrica

A classificação granulométrica foi realizada em peneiras com as seguintes aberturas: 1 mm; 0,85 mm; 0,60 mm; 0,42 mm; 0,30 mm; 0,21 mm; 0,11 mm. Este procedimento foi realizado como uma primeira classificação do material. A partir dessa classificação, foram selecionadas amostras com tamanhos entre 0,85 mm – 0,60 mm; 0,42 mm – 0,21 mm e < 0,11 mm para análises químicas.

### 2.3 Classificação em Zig-Zag

A separação dos metais dos demais materiais (plásticos e cerâmicos) presentes nas PCIs foi realizada em classificador Zig-Zag usando 230 g de amostra com tamanho de partículas entre 0,42 mm e 0,21 mm com velocidade do ar variando de 5 m/s a 10 m/s. A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do classificador Zig-Zag (adaptado do modelo da USBM - United States Bureau of Mines)<sup>(23-25)</sup> construído no Laboratório de Eletroquímica Aplicada do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Coppe, UFRJ.



**Figura 1.** Esquema simplificado do Classificador Zig-Zag (adaptado do modelo da USBM - United States Bureau of mines),<sup>(24,25)</sup> utilizado para concentrar os metais presentes nas PCI's.

O classificador possui uma área de seção transversal de 44 mm x 95 mm que muda de direção a cada 65 mm de altura e com declividade de 60° com a horizontal. A alimentação é realizada na parte superior do equipamento, enquanto que a injeção de ar é realizada pela parte inferior. Neste tipo de classificador a vazão de ar e conseqüentemente a velocidade linear depende da densidade do material, assim como da área de seção transversal do equipamento. Dessa forma, para determinar a faixa de vazão de ar adequada para os ensaios foi construído o diagrama de Schtlyl utilizando as Equações de 1 a 4 e os dados da Tabela 1. Este diagrama delimita as fronteiras entre leito fixo-fluidizado (Equação 1) e leito fluidizado-transporte pneumático (Equação 2). As coordenadas são o número de Reynolds (Re) e o número de Froude (Fr) e as retas superpostas representam a velocidade linear do gás (Equação 3) e o diâmetro das partículas (Equação 4). A partir do diagrama, os parâmetros operacionais foram reduzidos a apenas dois: tamanho de partículas e velocidade linear do gás.<sup>(26)</sup>

$$Fr = \frac{\xi^3 (\rho_s - \rho_g)}{\rho_g \left[ \left| \frac{150(1-\xi)}{\xi} \right| + 1,75 \right]} \quad (1)$$

Onde  $\xi$  é a porosidade mínima de fluidização;  $\rho_s$  é a densidade do sólido; e  $\rho_g$  é a densidade do fluido (ar).

$$Fr = \frac{4}{3} \xi^{4,65} \left( \frac{\rho_s - \rho_g}{C_d \rho_s} \right) \quad (2)$$

Onde  $\xi$  tende a 1.  $C_d$  é o parâmetro usado para descrever o comportamento das partículas sólidas entre o leito fluidizado e o transporte pneumático<sup>(26)</sup> cujos valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Números de Reynolds para diferentes valores de  $C_d$ <sup>(26)</sup>

$Re$	0,1	10	10	100	1.000
$C_d$	245	28	4,4	1,1	0,46

$$\log Fr = 2 \log Re + \log \frac{\mu^2}{g \rho_p^2 d_p^3} \quad (3)$$

$$\log Fr = - \log Re + \log \left( \frac{\mu^3}{\mu g} \right) \quad (4)$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade mínima de fluidização,  $d_p$  é o diâmetro de partícula do material cominuído.

## 2.4 Análises Químicas

Para quantificar a concentração dos metais presentes nas frações selecionadas, no peneiramento e na concentração em classificador Zig-Zag, foram utilizadas amostras de 1 g dissolvidas em 400 mL de água-régia seguida de análise por absorção atômica, modelo AA 6800 da Shimadzu. Para se quantificar o ouro presente nas aparas das PCIs, obtido por processamento manual, foi utilizada solução de  $HNO_3$  7 mol.L<sup>-1</sup> seguido de filtragem e pesagem.

A caracterização qualitativa dos metais presentes nas amostras foi realizada em microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo JEOL – JSM 6460, acoplado a um sistema de espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

Todos os reagentes utilizados foram de grau analítico sem purificação suplementar e os ensaios foram realizados em duplicata.

## 3 RESULTADOS

As PCIs são compostas por materiais poliméricos (~30%), materiais cerâmicos (~30%) e materiais metálicos (~30%).<sup>(2-4)</sup> Com o objetivo de se liberar os materiais metálicos, as PCIs foram picotadas e cominuídas. A Figura 2a apresenta a imagem de uma PCI contendo os constituintes elétricos e eletrônicos e a Figura 2b PCIs após cominuição.

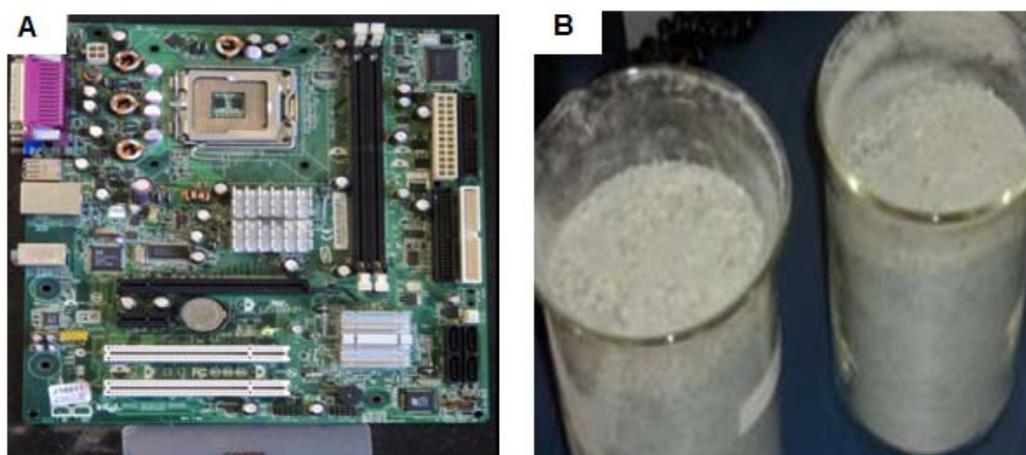
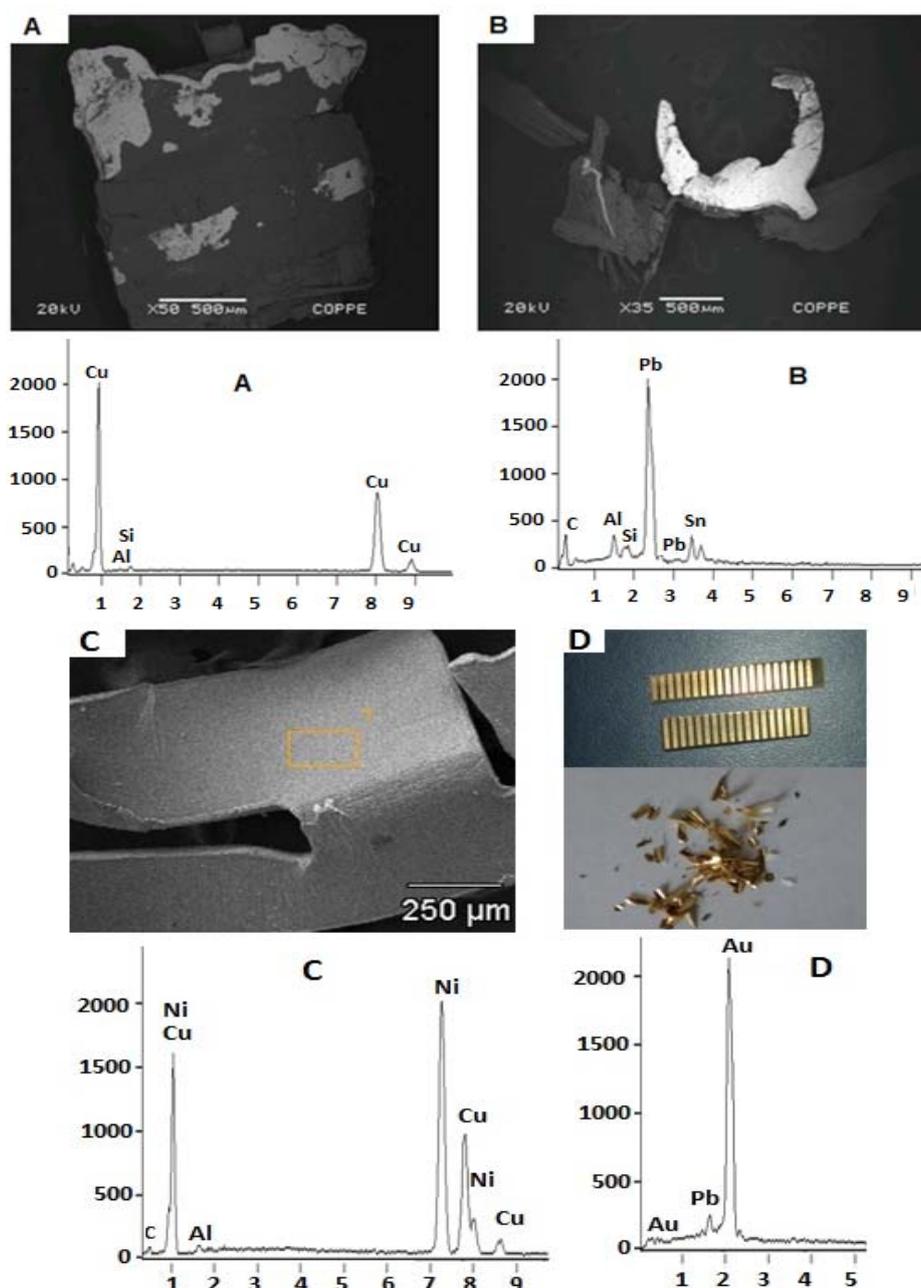


Figura 2. Imagens de uma PCI. (a) antes; e (b) após cominuição.

A presença dos elementos metálicos, na amostra, foi identificada por MEV e EDS (Figura 3). As micrografias das Figuras 3a, 3b e 3c foram obtidas após cominuição das PCs. Através dos espectros de EDS, destas imagens, foi possível identificar a presença dos metais cobre (Cu), alumínio (Al), chumbo (Pb), níquel (Ni) e estanho (Sn). A presença de silício e carbono se deve aos materiais cerâmicos e poliméricos presente nas PCs.

A micrografia e o espectro de EDS da Figura 3d foram obtidos das aparas (removidas por processamento manual) das PCs onde se identifica, visualmente, maior concentração de ouro e as partículas de ouro removidas do substrato após a dissolução parcial do mesmo com HNO<sub>3</sub>. A análise química indicou que a concentração de ouro contida, nestas aparas, foi de aproximadamente 8.000 ppm.



**Figura 3.** Micrografias obtidas por MEV e espectros de EDS. (a), (b), (c) obtidas das PCs após cominuição e (d) aparas das PCs onde se concentra, visualmente, a maior concentração de ouro e partículas de ouro liberadas.

A Figura 4 apresenta a distribuição granulométrica obtida por peneiramento das PCIs após cominuição em moinho de facas. Pode ser observado que, aproximadamente 50% da amostra é constituída por partículas de tamanho igual ou inferior a 0,8 mm.

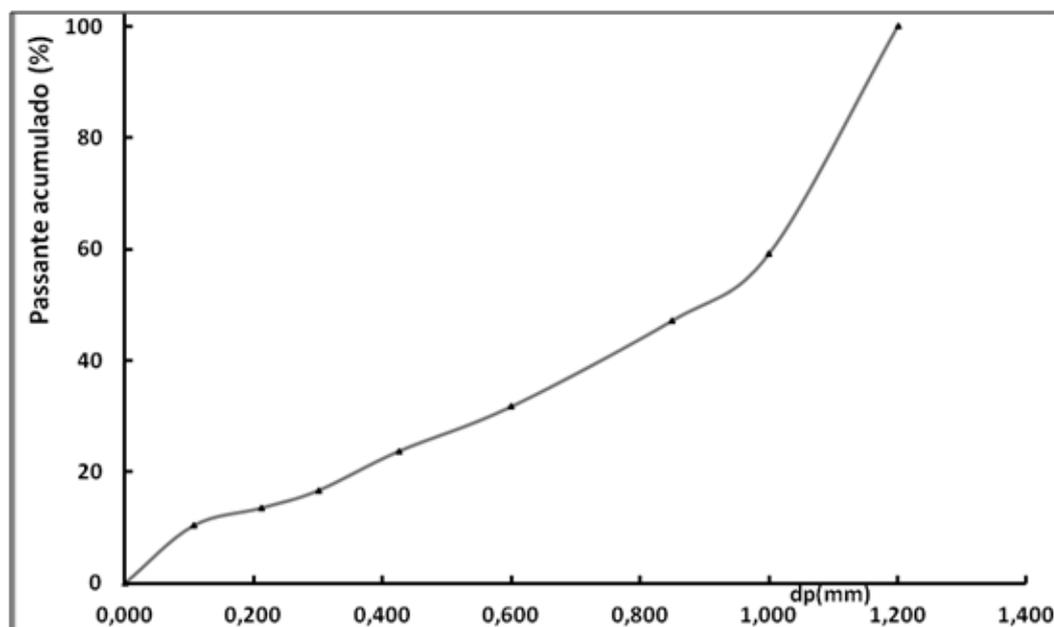


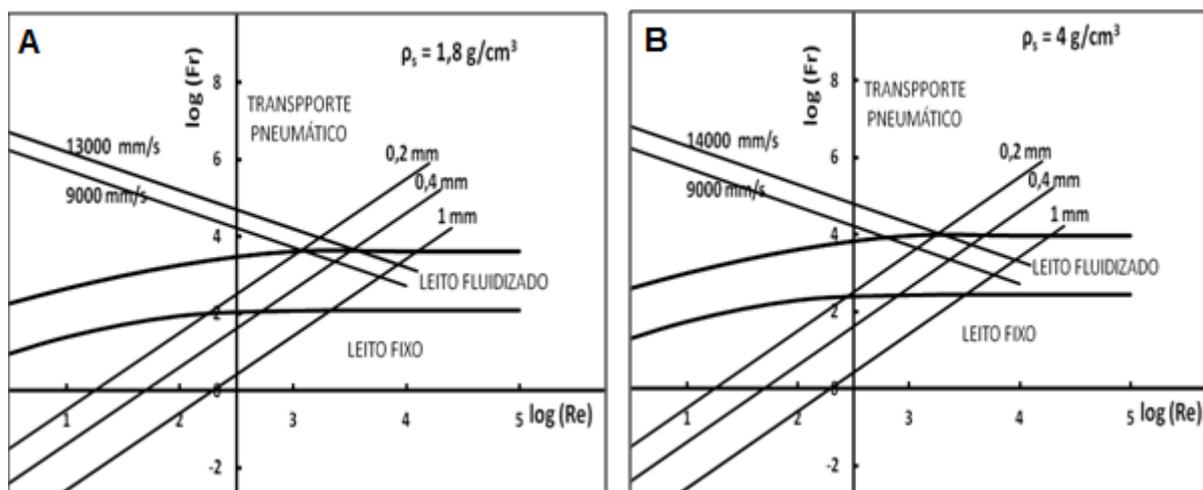
Figura 4. Passante acumulado em função do tamanho de partícula ( $D_p$ ) das PCIs cominuídas.

A Tabela 2 apresenta a percentagem de cobre, zinco, níquel, alumínio, chumbo e estanho, metais identificados por MEV/EDS, presente nas seguintes faixas granulométricas: 0,85 mm - 0,60 mm; 0,42 mm - 0,21 mm e abaixo de 0,11 mm. O objetivo da análise foi verificar se havia segregação de metais em alguma faixa de tamanho específico. Pode ser observado na Tabela 2 que, as faixas de tamanho mais grosseiro possuem maior densidade média e consequentemente maior teor de metais, onde se destaca o cobre com cerca de 26%.

Tabela 2. Percentagem de metais (m/m) presentes em PCIs após moagem e classificação em peneiras para diferentes faixas granulométricas

Tamanho de partículas (mm)	Cu	Zn	Ni	Al	Pb	Sn	Densidade média ( $\text{g/cm}^3$ )
$0,60 < d_p < 0,85$	26,41	2,25	0,47	0,95	4,38	10,10	2,59
$0,21 < d_p < 0,42$	23,32	1,46	0,65	0,90	5,65	10,73	2,20
$d_p < 0,11$	2,11	0,06	0,24	3,88	0,75	1,64	1,90

Com o objetivo de se aumentar a concentração de metais, em especial a do cobre, o material cominuído na faixa entre 0,42 mm e 0,21 mm foi concentrado em classificador Zig-Zag. As vazões de ar selecionadas para cada faixa granulométrica (tamanho de partículas) foram estimadas com base no Diagrama de Schytil para tamanhos de partículas e velocidades lineares de ar adequadamente selecionadas (Figura 5).



**Figura 5.** Diagrama de Schytil utilizado para o cálculo da vazão de ar adequada para separar os materiais poliméricos e cerâmicos dos metálicos. (a) para materiais com densidade igual ou inferior a  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ; (b) para materiais com densidade até  $4 \text{ g/cm}^3$ .

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos após a passagem de 230 g de material com tamanho de partículas entre 0,42 mm e 0,21 mm em classificador Zig-Zag. A velocidade do ar injetada no classificador variou entre 5 m/s a 10 m/s. Tais valores se encontram próximos aos utilizados por Eswaraih.<sup>(12)</sup> Maiores valores de vazão não foram utilizados devido à limitação do sistema classificador-compressor. Nesta etapa, apenas o teor de cobre foi quantificado. Pela Tabela 3 pode ser observado que foi obtido um concentrado metálico com teor de cobre de 55% e densidade média de  $5 \text{ g/cm}^3$ . Pode ser ainda observado que, a recuperação de cobre das PCIs cominuídas foi superior a 80% e a percentagem de metais aumentou de 43% na alimentação para 73% no concentrado.

**Tabela 3.** Resultados obtidos após a concentração do material cominuído na faixa granulométrica entre 0,42 mm e 0,21 mm em classificador Zig-Zag. A: massa da alimentação, C: massa do concentrado (rico em cobre), R: massa do rejeito, a: percentagem de cobre na alimentação, c: percentagem de cobre no concentrado, r: percentagem de cobre no rejeito

Parâmetros	Resultados
A (g)	230,00
C (g)	92,60
R (g)	134,10
a (%)	23,32
c (%)	55,00
r (%)	6,51
Recuperação (%)	81,76
Rendimento (%)	40,85
Razão de enriquecimento	2,36
Perdas (%)	1,43
Densidade média da alimentação ( $\text{g/cm}^3$ )	2,60
Densidade média do concentrado ( $\text{g/cm}^3$ )	5,00
Densidade média do rejeito ( $\text{g/cm}^3$ )	2,00
Percentagem de metais na alimentação	42,71
Percentagem de metais no concentrado	73,00

## 4 DISCUSSÃO

As PCIs contêm uma grande quantidade de metais e, a associação dos metais entre si ou com materiais não metálicos dificulta a separação dos mesmos.

A classificação por peneiramento (Tabela 2) mostrou que uma maior concentração de metais foi obtida nas frações mais grosseiras. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que os metais presentes nas PCIs, em geral, são dúcteis e maleáveis, sendo, portanto deformado, enquanto que os materiais cerâmicos são pulverizados e os poliméricos são picotados com facilidade pelas facas do moinho. Foi observado ainda na Tabela 2, que maior concentração de alumínio foi obtida na fração de menor granulometria. Este resultado, provavelmente, se deve ao fato de que o alumínio se encontra presente na forma de óxido (alumina,  $Al_2O_3$ ) composto duro e frágil.

Após a concentração do material em classificador Zig-Zag, observou-se que o teor de cobre aumentou de 23,3% para 55% no concentrado, tendo sido obtido concentrado com 2,4 vezes mais cobre que o obtido apenas com peneiramento. A recuperação de cobre foi superior a 80%. A percentagem de metais no concentrado, também aumentou, passando de 43% (na alimentação) para 73% no concentrado (valor obtido por dissolução em água régia).

A concentração de ouro contida nas aparas (Figura 3d) foi de 8.000 ppm, ou seja, 0,8% (m/m). Este valor é bastante significativo quando comparado com o teor de ouro em minério de ouro que varia de 0,0001% a 0,001%. De acordo com a literatura,<sup>(11-13)</sup> a concentração de ouro em PCIs varia conforme o equipamento, modelo etc. De qualquer forma o aumento do teor de ouro obtido por processamento manual – cerca de 40 vezes – pode justificar seu processamento em separado.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que após classificação granulométrica por peneiramento, aproximadamente 50% da amostra era composta por partículas com granulometria igual ou inferior a 0,8 mm. A análise química mostrou que uma maior concentração de metais foi obtida nas frações de maior granulometria. Com um simples peneiramento foi obtido aproximadamente 23% de cobre na fração granulométrica compreendida entre 0,42 mm e 0,21 mm. Após a concentração do material em classificador Zig-Zag o teor de cobre focou em torno de 55% no concentrado, tendo sido obtido um material com cerca de 2,4 vezes mais cobre que o obtido apenas com peneiramento. A recuperação de cobre das PCIs cominuída foi superior a 80%. Desta forma, os resultados mostraram que a concentração de cobre contido em PCIs por peneiramento e classificador Zig-Zag se mostrou eficiente. O classificador Zig-Zag pode ser aprimorado para melhorar a taxa de alimentação e permitir o uso de vazões mais elevadas. Assim, como é necessário testar novas faixas de tamanho para melhorar a eficiência do processo.

## Agradecimentos

A Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 ZHANG, S., FORSSBERG, E. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. *Powder Technology*, 105, 295-301, 1999.
- 2 He, W.; LI, G.; MA, X.; WANG, H.; HUANG, J. XU, M.; HUANG, C. WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, B136, 502-512, 2006.
- 3 XIU, F.; ZHANG, F. Material recovery from waste printed circuit boards by supercritical methanol. *Journal of Hazardous Materials*. 178, 628-634, 2010.
- 4 XIU, F.; ZHANG, F. Electrokinetic recovery of Cd, Cr, As, Ni, Zn and Mn from waste printed circuit boards: Effect of assisting agents. *Journal of Hazardous Materials*, 170, 191-196, 2009.
- 5 VEIT, H. M; PEREIRA, C, C; BERNARDES, A, M. Emprego do processamento mecânico na reciclagem de sucata de placas de circuito impresso. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS. Porto Alegre, 2001.
- 6 HUANG, K; GUO, J; XU, Z. Recycling of waste printed circuit board: A review of current technologies and treatment in China. *Journal of Hazardous Materials*, 164, 399-408, 2009.
- 7 FERREIRA, D, C., SILVA, J, B., GALDINO, J, C, S. Reciclagem de lixo eletrônico. Santa Cruz, Rio Grande do Norte, RN, v. 5, 2010.
- 8 RON, A., PENEV, K.; Disassembly and recycling of electronic consumer products: an overview. *Technovation*, 15(6), 363-374, 1995.
- 9 HAYES, P. C.; *Process Principles in minerals and materials production*. Hayes Publishing CO, 29. Brisbane, Australia, 1993.
- 10 SHAPIRO, M. GALPERIM, V. Air classification of solid particles: a review. *Chem. Eng. Process*, 44, 279-285, 2005.
- 11 BIDDULPH, M, W. Design of vertical air classifiers for municipal solid waste, *Can., J. Chem. Eng.*, 65, 571-580, 1987.
- 12 ESWARAIAH, C.; KAVITHA, T.; VIDYASAGAR, S.; NARAYANANN, S, S. Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier. *Chem. Eng. Proces.*, 47, 565-676, 2008.
- 13 HOFFMANN, J.E.; Recovery of precious metals from electronic scrap. *Journal of Metals*, 44, 43 – 48, 1992.
- 14 SUM, E. Y. L.; The recovery of metals from electronic scrap. *J. Miner. Met. Mater. Soc.*, 43 (4), 53-61, 1991.
- 15 XIE, F.; CAI, T.; MA, Y.; LI, H.; LI, C.; HUANG, Z.; YUAN, G. Recovery of Cu and Fe from printed circuit board waste sludge by ultrasound. *Journal of Cleaner Production*, 17, 1494-1498, 2009.
- 16 GLOE, K.; MÜHL, P.; KNOTHE, M.; Recovery of precious metals from electronic scrap, in particular from waste products of the thick-layer technique, *Hydrometallurgy*, 25, 99-110, 1990.
- 17 SUM, E. Y. L.; The recovery of metals from electronic scrap. *Journal of Metals*, 43, 53-61, 1991.
- 18 CUI, J. e ZHANG, L.; Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158, 228–256, 2008.
- 19 UBALDINI, S., VEGLIÒ, F., QUARESIMA, R., FORNARI, P.; Recovery of valuable metals from electronic and galvanic industrial wastes by leaching and electrowinning. *Waste Management*, 23, 245-252, 2003.

- 20 CUI, J; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, B99, 243-263, 2003.
- 21 LEGISLAÇÃO FEDERAL DO BRASIL, Lei 12.305/2010, Diário Oficial da União: Brasília, DF, 03/08/2010.
- 22 AMBIENTE BRASIL. Tratamento de lixo tecnológico no Brasil e União Européia. [www.ambientebrasil.com.br](http://www.ambientebrasil.com.br). Acessado em 14/10/2010.
- 23 BOETTCHER, R, A., 1972. Air classification of solid wastes, solid waste management series, U.S. Environmental Protection Agency, 50pp.
- 24 SAMPAIO, C, H.; TAVARES, L, M. (2005). Beneficiamento gravimétrico: uma introdução ao processo de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. 1<sup>a</sup> edição. Rio Grande do Sul: UFRGS, P. 503-507, 2005.
- 25 SULLIVAN, G, V., STANCZYK, M, H., 1982. Pneumatic beneficiation of mica, 14<sup>th</sup>, International Mineral Processing Congress, Toronto, C.I.M., paper v-6.
- 26 QUENEAU, P. Extractive metallurgy of copper, nickel and cobalt. Interscience Publishers, New York, 1960.