



# CARACTERIZAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE COMPUTADORES OBSOLETOS POR PROCESSAMENTO MECÂNICO<sup>1</sup>

Luciana Harue Yamane<sup>2</sup>  
Denise Croce Romano Espinosa<sup>3</sup>  
Jorge Alberto Soares Tenório<sup>4</sup>

## Resumo

As placas de circuito impresso, plataforma no quais componentes como chips semicondutores e capacitores são montados, fornece as interconexões elétricas entre os componentes e são encontradas em quase todos os equipamentos eletrônicos sendo compostas de uma maneira geral por polímeros, cerâmicos e metais, o que dificulta o seu processamento devido a sua heterogenicidade. A presença de metais base (como cobre) e metais preciosos estimulam estudos quanto a sua reciclagem. O objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização de placas de circuito impresso de computadores obsoletos por processamento mecânico utilizando operações unitárias de tratamento de minérios para separação das frações metálica, plástica e cerâmica. A caracterização do resíduo é uma etapa fundamental quando se visa realizar algum tipo de tratamento no resíduo, como a reciclagem. A parte experimental foi realizada através de moagem em moinho de martelos, seguida de separação magnética, de separação eletrostática e finalmente de separação por perda ao fogo. Os resultados obtidos foram de balanço de massa e demonstraram que as placas de circuito impresso de computadores apresentam 45,61% de metais; 26,40% de plásticos e 27,99% de material cerâmico, vidros e óxidos.

**Palavras-chave:** Resíduo eletrônico; Caracterização; Placas de circuito impresso.

## CHARACTERIZATION OF PRINTED CIRCUIT BOARD FROM SCRAP COMPUTER BY MECHANICAL PROCESSING

### Abstract

The printed circuit board, platform in which components such as semiconductor chips and capacitors are mounted, provides the electrical interconnections between components and are found in almost every electronic device being general composed for polymers, ceramic and metals, which complicates the processing due to its heterogeneity. The presence of base metals (ex. copper) and precious metals stimulate recycling studies. The aim of this work was the printed circuit board characterization from scrap computers by mechanical processing using unit operations of mineral processing to separate the metal, plastic and ceramics fractions. The electronic waste characterization is a crucial step if at achieving some kind of treatment in the waste and recycling. The experimental part was performed by comminution using a hammer mill, followed by magnetic separation, electrostatic separation and calcination. The results were mass balance and demonstrated that the printed circuit boards of computers have 45,61% of metals; 26,40% of plastics and 27,99% of ceramic, glass and oxides.

**Key words:** Electronic waste; Characterization; Printed circuit board.

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

<sup>2</sup> Doutoranda em Engenharia Metalúrgica e Materiais, Escola Politécnica da USP.

<sup>3</sup> Profa. Dra. Denise Croce Espinosa Romano

<sup>4</sup> Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório



## 1 INTRODUÇÃO

O resíduo de equipamento eletro-eletrônico (REEE), também definido como resíduo eletrônico, abrange várias formas de equipamentos elétricos e eletrônicos sendo gerado por fábricas de componentes e pelo descarte de equipamentos obsoletos, como computadores ultrapassados, placas de circuito impresso e contatos elétricos.<sup>(1)</sup>

O REEE contém diferentes níveis de concentração de plásticos, óxidos refratários e metais,<sup>(2)</sup> porém as diversas quantidades de materiais encontrados no REEE dificultam a generalização da sua composição.

Em geral, o resíduo eletrônico apresenta: 30% de plásticos; 30% de óxidos e 40% de metais.<sup>(1)</sup> A porção metálica pode ser dividida em dois grupos: metais base e metais preciosos.

Os metais base, que chegam a aproximadamente 35% dos resíduos, incluem cobre, ferro, estanho, níquel, alumínio, chumbo e zinco. Os metais preciosos são: a prata (0,2%), o ouro (0,1%) e o paládio (0,005%) e estão na forma de finos filmes sob outros metais base (Al, Cu, Fe) e cerâmicos.<sup>(1,3)</sup>

A placa de circuito impresso, plataforma no quais componentes como chips semicondutores e capacitores são montados, fornece as interconexões elétricas entre os componentes.<sup>(4)</sup>

Os dois tipos mais comuns de PCI são feitos de fibra de vidro reforçado com resina epóxi (referida comercialmente como FR-4) ou papel de celulose reforçado com uma resina fenólica (FR-2). O tipo FR-4 de PCI é utilizado em equipamentos elétricos e eletrônicos de alto valor e os tipos FR-2 são usados em televisões e eletrodomésticos.<sup>(5)</sup>

O processamento mecânico das placas de circuito impresso envolve separação granulométrica, separação densitária e separação eletrostática e têm sido utilizados na reciclagem industrial.<sup>(6)</sup> Separações físicas dos componentes também são feitas por redução de tamanho e separação magnética.<sup>(7)</sup>

A redução de tamanho é usada para liberar os metais de outros componentes, e assim expondo os metais preciosos para aumentar as taxas de recuperação dos processos de extração subsequentes.<sup>(7)</sup> A separação granulométrica é utilizada para melhorar o conteúdo metálico.<sup>(8)</sup>

Na separação densitária, diferentes métodos são empregados para separar materiais pesados de leves. A diferença na densidade dos componentes é a base da separação.<sup>(8)</sup>

A separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais e pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas às espécies individualmente. A separação magnética pode ser feita tanto a seco como a úmido. O método a seco é usado, em geral, para granulometria grossa e a úmido para aquelas mais finas<sup>(7)</sup>.

Separadores eletrostáticos são usados para separar metais não-ferrosos do resíduo, o processo geralmente segue após um processo de separação magnética primária.<sup>(7)</sup>

A separação eletrostática é um processo de concentração de minérios que se baseia nas diferenças de algumas de suas propriedades, tais como: condutibilidade elétrica, susceptibilidade em adquirir cargas elétricas superficiais, forma geométrica, densidade entre outras. Para promover a separação é necessário um campo elétrico de intensidade suficiente para desviar uma partícula eletricamente carregada e uma

carga elétrica superficial das partículas que lhes permitam sofrer a influência do campo elétrico.<sup>(9)</sup>

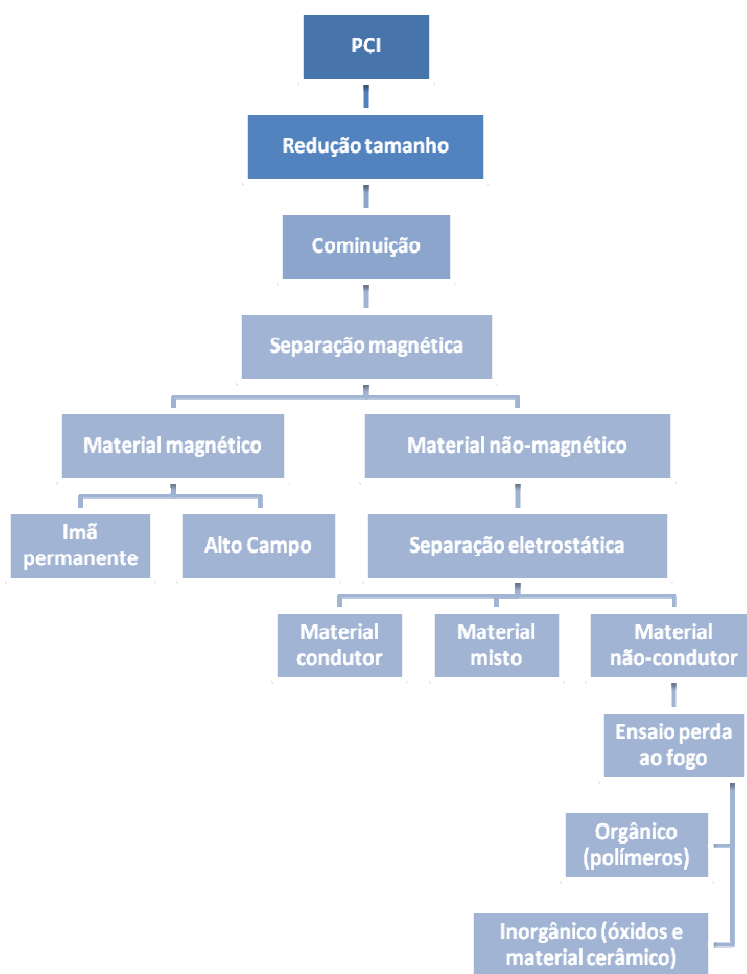
As frações materiais resultantes dos processos de separação sofrem um enriquecimento de certos metais. Esses metais poderão ser ainda mais concentrados e separados usando várias técnicas de pirometalurgia, hidrometalurgia, eletrólise e bio-hidrometalurgia.

O objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização de placas de circuito impresso de computadores obsoletos por processamento mecânico utilizando operações unitárias de tratamento de minérios para separação das frações metálica, plástica e cerâmica.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas aproximadamente 45kg de PCI provenientes de computadores dos mais variados tipos e idades. Peças como baterias e capacitores foram retiradas manualmente para o processamento mecânico.

Para a realização da caracterização física das PCI foram utilizados vários processos a fim de separar as frações metálica/plástica/cerâmica. A Figura 1 mostra o fluxograma dos processos utilizados.



**Figura 1.** Fluxograma do processamento das PCI.

## 2.1 Redução de Tamanho

As PCI foram cortadas numa guilhotina manual para reduzir seu tamanho, adequando ao tamanho da abertura do moinho de martelos de aproximadamente 18 x 28cm.

## 2.2 Cominuição

Através da cominuição é feita a liberação dos materiais constituintes da PCI. Um moinho de martelos modelo MDM 18/18 da marca Astecma foi utilizado para triturar as PCI. Inicialmente utilizando-se uma grelha de 6 mm e em seguida uma grelha de 2mm.

Ao final da etapa de moagem, obteve-se três amostras de 2 kg cada de PCI cominuída, que seguiu para o ensaio de separação magnética.

## 2.3 Separação Magnética

Um separador magnético de correias cruzadas a seco (eletroímã 6,5 A) foi utilizado para realizar a separação do material magnético do material não-magnético.

A propriedade de um material que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nesta propriedade os materiais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso têm-se os materiais ferromagnéticos, os quais são atraídos fortemente pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. Aqueles que são repelidos pelo campo denominam-se de diamagnéticos.<sup>(6)</sup>

O material submetido a separação magnética subdividiu-se, portanto em três frações: alto campo (fortemente magnético), imã permanente (fracamente magnético), formando a fração magnética, e, fração não-magnética.

A fração não-magnética resultante da separação magnética seguiu para o separador eletrostático.

## 2.4 Separação Eletrostática

A separação eletrostática visa separar o material condutor do material não-condutor, para tanto foi utilizado um separador eletrostático.

A regulagem utilizada no separador eletrostático foi a seguinte:

- Fonte de alta tensão: 30A;
- Rotação do motor: 115 rpm;
- *Splitter* do condutor: 45°; E
- *Splitter* do não-condutor/misto: 45°.

Ao final da separação, obtiveram-se três frações, sendo elas: material condutor, material misto e material não-condutor.

## 2.5 Separação por Líquido Denso

A separação por líquido denso é um experimento simples que se baseia na utilização de uma solução com densidade intermediária a dos materiais que se deseja separar. No caso, para fins de comparação, utilizaram-se duas soluções: NaCl<sub>(aq)</sub> de densidade igual a 1,19g/cm<sup>3</sup> e CaCl<sub>2(aq)</sub> de densidade igual a 1,37g/cm<sup>3</sup>.

Os polímeros presentes nas PCI têm densidades inferiores a das soluções utilizadas sendo, portanto o material flutuante, e os materiais como óxidos, metais remanescentes e materiais cerâmicos, densidades superiores, portanto permanecendo no fundo.

## 2.6 Ensaio de Perda ao Fogo

No ensaio de perda ao fogo, alíquotas de aproximadamente 1g da fração não-magnética/não-condutora oriunda da separação eletrostática de cada uma das três amostras foram colocadas em navículas cerâmicas. Estas navículas permaneceram durante uma hora numa mufla a 550°C.

Foi utilizada uma mufla para realização do ensaio que visa separar a fração orgânica (plásticos) que volatiliza, da fração inorgânica (óxidos e material cerâmico).

O objetivo do ensaio de perda ao fogo foi determinar a fração plástica e a fração cerâmica, pois após as separações magnética e eletrostática, a fração metálica ficou concentrada nas frações magnética e condutora.

Os resultados obtidos são apresentados através de balanço de massa e as frações obtidas foram representadas da seguinte forma:

M-AC: fração magnética retida no alto campo (fração fortemente magnética);

M-IP: fração magnética retida no ímã permanente (fração fracamente magnética);

E-C: fração condutora proveniente da separação eletrostática;

E-M: fração mista proveniente da separação eletrostática; E

E-NC: fração não-condutora proveniente da separação eletrostática.

## 2.7 Análises Químicas

Após o processamento, alíquotas de cada uma das frações obtidas com a separação magnética e separação eletrostática foram retiradas através da técnica de quarteamento.

Foram obtidas no total, 15 alíquotas referentes as cinco frações de cada uma das 3 amostras, com peso variando entre 1g a 5g. Estas alíquotas foram solubilizadas com água-régia na proporção 1:20<sup>(3)</sup> (1g de PCI para 20ml de solução de água-régia).

As soluções lixiviadas foram enviadas para análise química para determinação dos elementos químicos presentes em cada fração pela técnica de espectrometria por absorção atômica por plasma.

Os metais analisados foram: ouro, prata, paládio, ferro, chumbo, estanho, cobre, zinco, alumínio e níquel.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Redução de Tamanho e Cominuição

Basicamente os materiais são unidos por fixação, inserção, soldagem e empacotamento,<sup>(10)</sup>

Na etapa de cominuição das PCI observou-se que ocorre muita perda de material (29%), pois durante o processo as partículas mais finas e leves, provavelmente de fibra de vidro, são expelidas pelo moinho de martelos gerando muita poeira. Como está apresentado na Tabela 7, houve 29% de perdas.

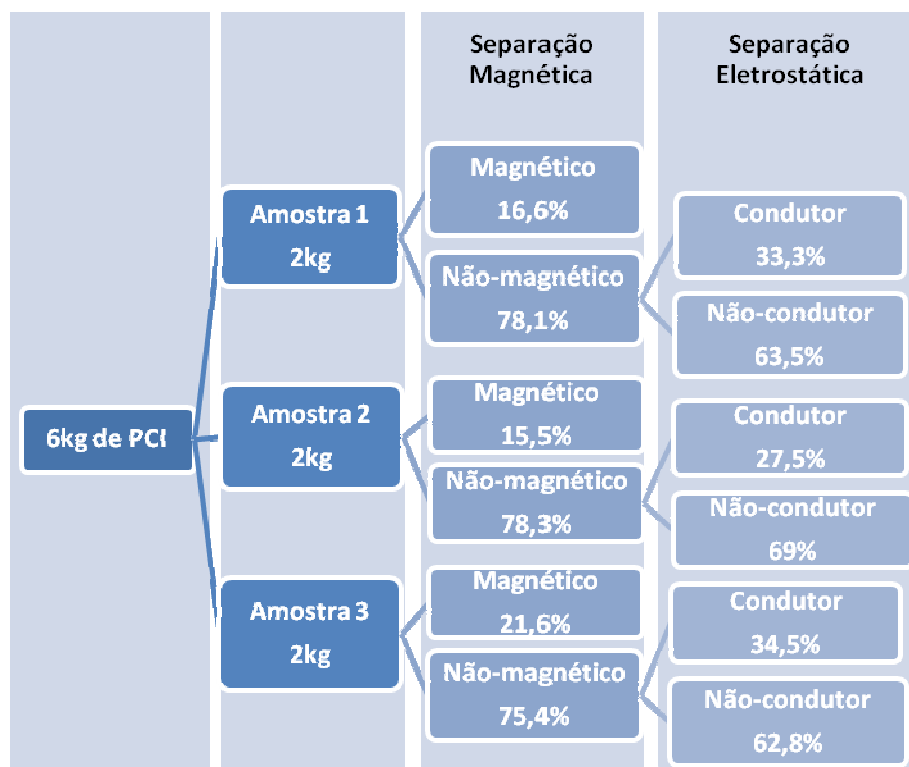
Menetti *et al.*<sup>(1)</sup> observaram que a alimentação direta de sucata no moinho de martelos trouxe alguns inconvenientes tanto na perda de material quanto à



integridade do equipamento. Na alimentação direta, as placas e/ou componentes adicionados em peças inteiras provocaram um desgaste muito grande na parte interna do moinho.

### 3.2 Separações Magnética e Eletrostática

Os resultados de balanço de massa para as separações magnética e eletrostática são apresentados no fluxograma da Figura 2.



**Figura 2.** Fluxograma das separações magnética e eletrostática e seu respectivo balanço de massa (porcentagens).

### 3.3 Separação por Líquido Denso

O ensaio de separação por líquido denso foi inicialmente aplicado às amostras 1 e 2. Os resultados obtidos na separação por líquido denso são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Resultado da separação por líquido denso**

		Flutuado		Afundado	
<b>NaCl<sub>(aq)</sub></b> <b>(d=1,19g/cm<sup>3</sup>)</b>	Amostra 1	46,70%	53,30%		
	Amostra 2	41,40%	56,78%		
<b>CaCl<sub>2(aq)</sub></b> <b>(d=1,37g/cm<sup>3</sup>)</b>	Amostra 1	80,38%	19,62%		
	Amostra 2	80,00%	20,00%		

Devido às diferenças no percentual dos tipos de materiais observadas entre as soluções testadas, realizou-se o ensaio de perda ao fogo no material que flutuou e afundou da Amostra 1 com o objetivo de verificar o percentual de material orgânico e inorgânico. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados do ensaio de perda ao fogo após separação por líquido denso

Separação por líquido denso (Teste)	Orgânico (Plásticos)	Inorgânico (óxidos, vidro e materiais cerâmico)
Flutuou (NaCl)	58,60%	41,40%
Afundou (NaCl)	43,22%	56,78%
Flutuou (CaCl <sub>2</sub> )	54,25%	45,75%
Afundou (CaCl <sub>2</sub> )	20%	80%

Como pode ser observado na Tabela 2, a fração inorgânica presente no material que flutuou em ambas soluções testadas foi superior a 40%, indicando que provavelmente houve arraste de material inorgânico (material cerâmico) nas partes poliméricas que flutuaram devido a etapa de moagem não ter conseguido liberar totalmente os materiais.

As placas de circuito impresso possuem uma composição heterogênea, sendo construídas sob uma base de material isolante, como teflon ou fibra de vidro, com uma das faces revestida por uma película de cobre. Tipicamente na face superior ficam os componentes e na face inferior fica o circuito.<sup>(11)</sup>

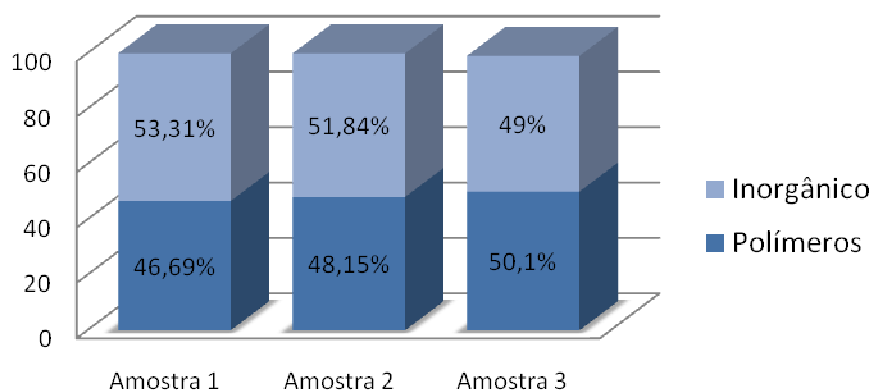
Devido a esta heterogenicidade e a diversidade de componentes acoplados à PCI, como capacitores, bobinas, diodos, resistores e circuitos integrados, mesmo com a moagem, fica difícil liberar todos os materiais que compõe uma PCI.

Os resultados obtidos no ensaio de perda ao fogo demonstraram serem mais aplicáveis ao tipo de resíduo. Portanto, adotou-se neste trabalho o ensaio de perda ao fogo, para determinação da fração polimérica (plásticos).

### 3.4 Ensaio Perda ao Fogo

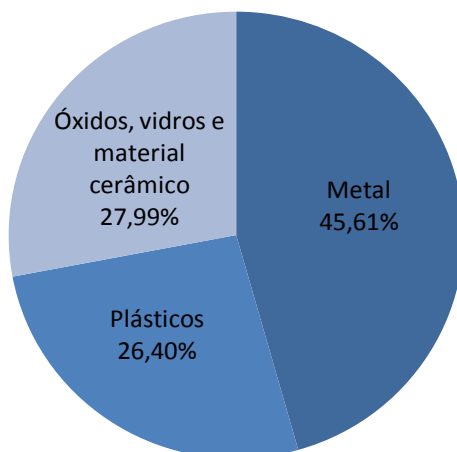
O ensaio de perda ao fogo foi utilizado para determinar na fração de material não-magnético/não-condutor o percentual de material polimérico. Os polímeros entram em combustão e a perda de massa determina a quantidade presente.

Os resultados do ensaio de perda ao fogo são apresentados na Figura 3.



**Figura 3.** Resultados do ensaio de perda ao fogo.

Com os resultados obtidos após o processamento das três amostras de PCI cominuídas, pode-se determinar a composição física das PCI estudadas, sendo apresentada na Figura 4.



**Figura 4.** Composição das PCI.

Comparando a composição das PCI estudadas com a Tabela 3 apresentada, pode-se observar que os resultados obtidos foram semelhantes aos encontrados por Menetti *et al.*<sup>(1)</sup> que estudou a recuperação de Au e Ag de concentrados obtidos a partir de sucata eletrônica.

**Tabela 3.** Composição encontrada por Menetti *et al.*<sup>(1)</sup>

Composição	(%)
<b>Materiais cerâmicos, vidros e óxido</b>	30
<b>Plásticos</b>	26
<b>Bromo</b>	4
<b>Metais</b>	40

### 3.5 Análises Químicas

Os resultados obtidos nas análises químicas das frações analisadas são apresentados na Tabela 4. Os valores apresentados são em porcentagem em massa.

**Tabela 4.** Resultados obtidos nas análises químicas das frações

Metais	M-AC	M-IP	E-C	E-M	E-NC	PCI
<b>Ag</b>	0,007	0,006	0,022	0,003	0,019	0,058
<b>Al</b>	0,343	0,038	1,447	0,155	0,401	2,386
<b>Au</b>	0,002	0,005	0,029	0,003	0,007	0,047
<b>Cu</b>	1,670	0,233	5,653	0,894	1,840	10,291
<b>Fe</b>	0,256	1,966	0,032	0,007	0,072	2,335
<b>Ni</b>	0,083	0,361	0,044	0,004	0,011	0,503
<b>Pb</b>	0,194	0,149	1,659	0,118	0,261	2,382
<b>Pd</b>	0,001	ND	0,010	0,001	0,003	0,016
<b>Sn</b>	0,341	0,234	2,721	0,202	0,406	3,905
<b>Zn</b>	0,522	0,021	1,232	0,119	0,210	2,106





O resultado obtido na composição das PCI estudadas e a composição de PCI determinadas por Park e Fray,<sup>(3)</sup> Menetti<sup>(1)</sup> e Veit<sup>(12)</sup> variam, isto ocorre devido a heterogenicidade das PCI, e provavelmente devido as diferentes metodologias aplicadas nos trabalhos ou ao fato de que a composição tem variado com o tempo.

Contudo observa-se que o cobre é o metal de maior percentual, seguido do alumínio e do ferro. O cobre e o alumínio são os metais que aparecem em maior quantidade nas PCI pois são materiais com alto desempenho de condutividade.<sup>(1)</sup>

Os resultados obtidos para o níquel e o ferro indicam que o processo de separação magnética foi eficiente na separação do material ferromagnético, concentrando os metais (Ni e Fe) na fração magnética.

Os metais preciosos nas PCI somam mais de 80% do valor total intrínseco regular considerando a quantidade de menos de 1% em peso,<sup>(3)</sup> sendo esta a razão que estimula os estudos de reciclagem.

As placas de circuito impresso contêm aproximadamente 28% de metais que são abundantes na fração não-ferrosa como o Cu, Al, Sn etc.<sup>(6)</sup>

#### 4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram de balanço de massa e demonstraram que a composição das placas de circuito impresso variam quando comparadas a dados de literatura devido a heterogenicidade das PCI, as diferentes metodologias aplicadas nos trabalhos e/ou ao fato de que a composição tem variado com o tempo.

Conclui-se que através do processamento mecânico das placas de circuito impresso houve a definição de operações tal que possibilitaram a concentração do metal em uma fração permitindo sua posterior recuperação.

#### Agradecimentos

- À Fapesp pela concessão da minha bolsa de doutorado.
- Ao meu orientador, Jorge Alberto Soares Tenório, pelos ensinamentos.
- Aos meus pais, pelo apoio incondicional.
- Ao Rafael, meu companheiro em todos os sentidos.
- À todos do laboratório, em especial a Viviane Tavares, por todo apoio à minha pesquisa desde o início.

#### REFERÊNCIAS

- 1 MENETTI, R. P.; CHAVES, A. P.; TENÓRIO, J. A. S. **Obtenção de Concentrados Metálicos Não-ferrosos a partir de Sucata Eletrônica**. In: Anais do 51<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM. Vol. 4. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Porto Alegre, RS. 1996.
- 2 ARAÚJO, M. C. P. B. **Reciclagem de Fios e Cabos Elétricos**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2006.
- 3 PARK, Y. J. & FRAY, D. J. **Recovery of High Purity Precious Metals from Printed Circuit Boards**. Journal of Hazardous Materials. V.164, pages 1152-1158. 2009.
- 4 LADOU, J. **Printed Circuit Board Industry**. International Journal of Hygiene and Environmental Health, Volume 209, Issue 3, 16 May 2006, Pages 211-219.
- 5 GUO, J.; GUO, J.; XU, Z. **Recycling of Non-metallic Fractions from Waste Printed Boards: A Review**. Journal of Hazardous Materials. V.168, Issues 2-3, pages 567-590. 2009.

- 6 LI, J.; LU, H.; GUO, J.; XU, Z.; ZHOU, Y. **Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards**. Environmental Science Technology. V.41, pages 1995-2000. 2007.
- 7 RAO, S.R. **Chapter 7: Recycling Metal**. In: RAO, S.R. (Editor). Waste Management Series. Vol. 7 – Resources Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes. 2006
- 8 CUI, J. & FORSSBERG, E. **Mechanical Recycling of Waste Electric and Electronic Equipment: a Review**. Journal of Hazardous Materials, Volume 99, Issue 3, 30 may 2003, pages 243-263.
- 9 SAMPAIO, J.A. & LUZ, A.B. **Cap 8 - Separação Magnética e Eletrostática**. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. Tratamento de Minérios. 4<sup>o</sup> edição. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Pg 305-335. Rio de Janeiro, 2004.
- 10 ZHANG, S.; FORSSBERG, E. **Intelligent Liberation and Classification of Electronic Scrap**. Powder Technology. V.105, pages 295-301. 1999.
- 11 PIROPO, B. **Computadores XIV: Circuitos Impressos Integrados**. Disponível em: <http://www.forumpcs.com.br/coluna.php?b=135976>. Acesso em 11/03/2009.
- 12 VEIT, H. M. **Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placa de Circuito Impresso. Tese de doutorado**. Departamento de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005.