

# RECUPERAÇÃO DE METAIS E POLÍMEROS PRESENTES EM LIXO ELETRÔNICO

*Débora Moura Castro de Sá<sup>1</sup>  
Larissa Assis Coura de Oliveira<sup>2</sup>  
Fernanda Fontes Almeida do Prado<sup>3</sup>  
Ikaro Leandro Ferreira Moraes<sup>4</sup>  
Gabriel Simão Santos de Oliveira<sup>5</sup>  
Leonardo Ramos Paes de Lima<sup>6</sup>  
Ricardo França Furtado da Costa<sup>7</sup>*

## Resumo

Este trabalho contém método de recuperação de metais e polímeros presentes em placas de circuito impresso (PCI's). O objetivo é encontrar destinação adequada a estes materiais, pois, por trás da estrutura tecnológica das PCI's, existem um grande número de metais, sendo alguns valiosos e outros tóxicos. O método se inicia com as etapas mecânicas para a cominuição das placas, sendo eles: desmantelamento, moagem, classificação, separação magnética e elutriação. Após a moagem obtém-se o material classificado com as frações de 75  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}$ , 1180  $\mu\text{m}$ , 2360  $\mu\text{m}$  e 4750  $\mu\text{m}$ , que são encaminhadas para a separação ferromagnética. Na próxima etapa, as frações não-ferromagnéticas seguem para a elutriação, onde separa-se a maior parte dos metais e cerâmicas dos polímeros. A partir desse estágio, os metais são destinados a processos químicos visando a separação e recuperação dos mesmos, por precipitação seletiva e oxirredução. Entretanto, para os polímeros, ainda não foi possível traçar um método de recuperação viável. Até o momento avaliou-se que nas frações de 300, 600 e 1180  $\mu\text{m}$ , obteve-se maior eficiência na separação no elutriador e obteve-se sucesso com a recuperação de cobre por meio de processos de precipitação seletiva e redução com barra de ferro.

**Palavras-chave:** Lixo eletrônico; Reciclagem; Metais; Polímeros.

## RECOVERY OF METALS AND POLYMERS PRESENT IN ELECTRONIC WASTE

### Abstract

This article contains method of recovering metals and polymers present in printed circuit boards (PCI's). The goal is to find a suitable destination for these materials, because, behind the technological structure of the PCI's, there are a large number of metals, some of which are valuable and others toxic. This method starts with the mechanical steps for the reduction of the plates, composed by dismantling, grinding, grading, magnetic separation and elutriation. After the grinding, the material classified with the fractions of 75  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}$ , 1180  $\mu\text{m}$ , 2360  $\mu\text{m}$  and 4750  $\mu\text{m}$  were obtained, which are then sent to the ferromagnetic separation. In the next step, the non-ferromagnetic fractions go to elutriation, where most of the metals, ceramics and polymers are separated. From this stage, the metals are destined to chemical processes to make the separation and recovery of the same, by selective precipitation and oxidation. However, for the polymers, it wasn't possible to trace a viable recovery method yet. At the moment, it has been evaluated that in the

fractions of 300, 600 and 1180  $\mu\text{m}$ , it was obtained a higher efficiency in the separation in the elutriator and was successful with copper recovery through selective precipitation and iron bar reduction processes.

However, for the polymers, it has not yet been possible to trace a viable recovery method. To date, it has been evaluated that in the fractions of 300, 600 and 1180  $\mu\text{m}$ , there was the greater release of metals and consequent efficiency in the separation of the samples during the elutriation. And, in addition, success was achieved in the recovery of copper through the processes of selective precipitation and reduction with iron bars.

**Keywords:** e-waste; environment; metals; polymers;

- <sup>1</sup> *Graduando Engenharia Química, bolsista FAPEMIG, iniciação científica, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, Minas Gerais e Brasil.*
- <sup>2</sup> *Graduanda Engenharia Química, bolsista FAPEMIG, iniciação científica, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, Minas Gerais e Brasil.*
- <sup>3</sup> *Graduando Engenharia Química, voluntária, iniciação científica, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, Minas Gerais e Brasil.*
- <sup>4</sup> *Estudante Técnico em Metalurgia, voluntário júnior, iniciação científica, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, Minas Gerais e Brasil.*
- <sup>5</sup> *Graduando Engenharia Mecânica, voluntário, iniciação científica, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, Minas Gerais e Brasil.*
- <sup>6</sup> *Bacharel e Licenciado em Química, Doutor, professor e coordenador do curso de Engenharia Química, escola politécnica, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, Minas Gerais e Brasil.*
- <sup>7</sup> *Bacharel em Química, doutor, professor do curso de Engenharia Química, escola politécnica, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, Minas Gerais e Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Graças às suas características, o ouro e o cobre, assim como outros metais, são altamente empregados na indústria eletrônica, sendo utilizados, por exemplo, em placas de circuito impresso e microprocessadores. Esses equipamentos eletrônicos possuem uma composição extremamente heterogênea, a qual pode variar de acordo com o modelo.

Toda essa mistura torna sua reciclagem bastante difícil, mas em compensação, a presença de metais e metais preciosos a torna uma matéria prima interessante. Também a presença de substâncias poluentes na sua composição estimula estudos para evitar a sua disposição diretamente no meio ambiente, podendo causar danos se dispostas de maneira inadequada [1].

Um dos maiores desafios da sociedade moderna é o lixo eletrônico. À medida que o mundo desenvolve, cresce o avanço tecnológico e com ele os resíduos sólidos. Em 2012, o lixo eletrônico cresceu três vezes mais que lixo convencional e, segundo a ONU (Organização das Nações Unidas), a situação é mais preocupante nos países emergentes [2]. Somado a isso, tem-se a ameaça à saúde humana e a diminuição do ouro nos depósitos naturais, tornando-se inviável para obtenção [3],[4].

Considera-se, neste trabalho, a necessidade de recuperação do ouro e cobre, dando continuidade ao projeto anterior de “Recuperação de ouro e cobre presentes em lixo eletrônico”, através de um método mais eficiente com geração de menos resíduo e melhor aproveitamento. E como complemento do processo, recuperar também outros metais, promovendo sua reciclagem. Já os polímeros, por sua vez, estão se tornando outro problema ambiental cada vez maior, tanto pela sua produção, a qual se dá a partir dos derivados de petróleo, como pelo seu descarte inadequado. Desta forma, também se faz necessário estimular a reciclagem, explorando novas aplicações para os polímeros recuperados.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

Com a colaboração dos responsáveis pelo projeto de extensão denominado “INFOSOL – Informática Solidária”, realizado no Unileste, obteve-se dezenas de PCI's. Durante todo o processo, as mesmas passam por uma etapa de seleção, duas de cominuição, uma de classificação e duas de separação.

#### 2.1.1 Processamento Manual

O primeiro passo consiste em remover peças em estado de oxidação elevado, dissipadores de alumínio e alumínio/cobre, cobre e ferro aparentes, chipset e capacitores, além de parafusos e baterias, os quais já possuem descarte adequado. Esse processo de desmantelamento aumenta as etapas mecânicas, e conseqüentemente diminui as etapas químicas, que por sua vez são mais onerosas. E também, a exclusão do ferro é de suma importância para proporcionar um melhor resultado nas etapas químicas, pois ele se comporta como um contaminante.

#### 2.1.2 Processamento Físico

Antes de trituradas, as placas precisam ser cortadas. Passando por uma tesoura guilhotina, obtém-se um tamanho ideal para que sejam introduzidas na abertura de alimentação do triturador.

Namoagem foram realizados dois processos, sendo um por meio do Triturador Forrageiro TRF400 e outro pelo equipamento elaborado pela equipe, o qual será denominado de Equipamento 2 no decorrer do trabalho.

### 2.1.3 Separação Granulométrica

Para realizar a classificação das partículas, foi necessário um agitador de peneiras, equipamento do laboratório de práticas de engenharia civil do Unileste, separando o material nas granulometrias 75 µm, 150 µm, 300 µm, 600 µm, 1180 µm, 2360 µm e 4750 µm.

### 2.1.4 Separação Ferromagnética

Cada fração do material anteriormente classificado passa por uma esteira separadora, onde através de um ímã de neodímio, é gerado um campo magnético sob as partículas, separando as ferromagnéticas das não-ferromagnéticas.

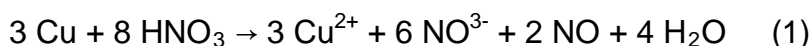
### 2.1.5 Separação por densidade

Com injeção de ar comprimido no elutriador desenvolvido pela equipe, em 2016-2017, é possível separar a maior parte dos metais, das cerâmicas e polímeros, nas frações de 300 µm, 600 µm, 1180 µm. Essa etapa interfere no tempo das reações químicas, dependendo então diretamente da qualidade da separação.

### 2.1.6 Reações Química

#### 2.1.6.1 Oxirredução

Visando a oxidação do cobre, a primeira etapa consiste na obtenção o  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  por adição  $\text{HNO}_3$  6M, sob aquecimento, ocorrendo a seguinte reação (Equação 1):

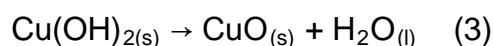


Da solução resultante após filtração, fez-se adição de mais  $\text{HNO}_3$  6M, novamente sob aquecimento, a fim de certificar a ausência de cobre. Desta forma, realiza-se o isolamento do cobre e outros metais em forma de nitrato, restando apenas cerâmicas e polímeros.

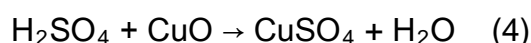
Após esta etapa de oxidação com nitrato, adicionou-se  $\text{NaOH}$  6M, sob agitação, gerando um precipitado azul, característico do  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ . A reação ocorre da seguinte forma (Equação 2):



O hidróxido formado, foi aquecido, obtendo seu respectivo óxido  $\text{CuO}$ , de acordo com a reação (Equação 3):



Para finalizar, adicionou-se  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1M ao óxido e como demonstrado na reação abaixo (Equação 4), obteve-se o  $\text{CuSO}_4$ . O mesmo foi utilizado para imersão de uma barra de ferro, efetivando a etapa de redução do cobre, conforme a reação (Equação 5).





Em seguida, o cobre obtido deve ser fundido.

### 2.1.6.2 Precipitação seletiva

Nessa etapa foi realizada a precipitação do cobre através da adição controlada de hidróxido de sódio na solução com metálicos dissolvidos.

Preparou-se duas amostras com presença de cobre e outros metais como estanho e ferro. Utilizou aproximadamente 24 ml para a liberação do cobre na forma de hidróxido. Em seguida filtrou as amostras, pesou e armazenou em recipientes fechados para possíveis análises.

Esse método pode ser eficiente, porém muito delicado, pois os metais presentes na solução possuem curvas de solubilidade muito próximas dificultando o isolamento do cobre.

### 2.1.7 Polímeros

Após a separação por densidade, são registradas 4 amostras, sendo que as duas frações menos densas, são constituída em sua maioria por polímeros da placa de circuito impresso que são separados em polímeros pesados e leves.

Na amostra de polímeros pesados, constituiu-se de alguns fragmentos cerâmicos finíssimos e polímeros leves. E a composição dos polímeros leves, em sua maioria é composta por fibra de vidro e polímeros finíssimos. Essas duas amostras são armazenadas para futuros testes e aplicações.

Além dos polímeros da PCI, estuda-se também o polímero de carcaça polimérica. Essa carcaça é constituída por ABS – um copolímero composto pela combinação de acrilonitrila-butadieno-estireno – que é um termoplástico. Esses foram triturados e classificados nas granulometrias de 150 µm; 300 µm; 600 µm; 1180 µm e 6300 µm, e apenas as frações de 150 µm e 300 µm foram levadas para os testes no laboratório de química do Unileste.

Primeiramente submeteu os polímeros de carcaça a teste térmico, onde os colocou na mufla e estufa a aproximadamente 100 – 110 °C, tendo em vista o ponto de fusão do ABS a 105 °C. E deixou 5 horas dentro da estufa e mufla durante 4 dias, com isso concluiu a indiferença da temperatura nesses polímeros. A partir disso, avaliou a possível presença de impurezas na mesma. Existe retardantes de chama nesses materiais o que dificulta o amolecimento [1]. Em seguida propôs para ações futuras o estudo para retirar esses retardantes.

## 2.2 Resultados e Discussão

A partir do processo de desmantelamento, separou-se os componentes desejáveis, identificando a massa inicial das placas igual a 27,0897 kg, e o material total retirado equivalente a 13.4437 gramas, conforme especificadas na tabela 1.

**Tabela 1.** Peso total dos componentes após o desmantelamento

<b>Desmantelamento (Kg)</b>	
Alumínio	7,0165
Aço Inox	1,18
Baterias e parafusos	0,66
Cobre aparente	0,3672
Conectores	0,04
Ferro	3,38
Polímeros	0,8
<b>TOTAL</b>	<b>13,4437</b>

*Fonte: Os autores, 2018*

Após essa etapa, foram encaminhadas 13.646 gramas para a guilhotina e diante as perdas por corte, 13.315 gramas seguiram para a moagem.

A tabela 2 apresenta a análise de eficiência dos dois equipamentos utilizados para a moagem das PCI's.

**Tabela 2.** Resultados Triturador x Esmeril

	<b>Triturador</b>	<b>Esmeril</b>
<i>Entrada (g)</i>	13.315	597
<i>Saída (g)</i>	12.802	354
<i>Perda (g)</i>	513	243
<i>Perda (%)</i>	3,85	40,7

*Fonte: Os autores, 2018*

Diante os registros, a perda do Triturador foi de 3,87%. Esse valor é relativamente aceitável, tendo em vista a dificuldade do processo em relação à dispersão de partículas no ar e no próprio equipamento.

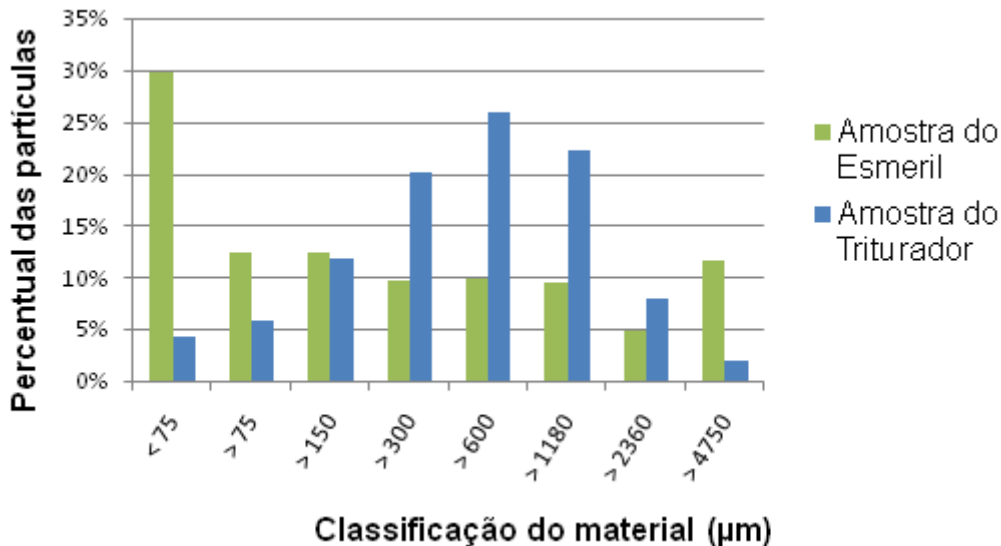
Já no Esmeril, observou-se uma perda de 40,7% do material. Além de mais trabalhoso quando comparado ao Triturador e apresentar uma perda específica mais elevada, ainda tem-se como objetivo comparar sua eficiência na etapa de reações químicas, pois é conhecido que o tamanho das partículas influencia diretamente no tempo e na quantidade de reagentes, levando em conta a maior superfície de contato entre as partículas.

Após o processamento físico, as placas foram encaminhadas para classificação das partículas no agitador de peneiras.

Ao analisar a figura 1, constatou-se que os equipamentos tiveram comportamentos distintos quanto às faixas granulométricas selecionadas. No triturador, a maior

quantidade de metais livres apresentou-se nas faixas entre 300 e 1180  $\mu\text{m}$ , enquanto no Esmeril, de 75 a 150  $\mu\text{m}$ . Isso seria devido às propriedades mecânicas dos metais, que são habitualmente dúcteis, o que torna a sua trituração mais difícil que a dos materiais poliméricos ou cerâmicos, que têm propriedades frágeis[5], e em seu estudo verificou-se que a maior obtenção de metal ocorreu na faixa de 500 a 1000 $\mu\text{m}$ .

Diante disso, é possível justificar a diferença das faixas nos equipamentos, pois no Esmeril o contato com a placa é direto, onde há o pressionamento da mesma contra a lixa.



**Figura 1.** Relação das faixas granulométricas entre o esmeril e triturador.

**Fonte:** Os autores, 2018.

Em sequência ao processo de separação, efetuou-se a separação por densidade através do elutriador, equipamento projetado e construído pela equipe.

Nessa etapa foi necessário aplicar algumas otimizações para dar sequência ao processo de recuperação de metais e polímeros. O antigo elutriador envolvia uma alimentação na vertical onde as partículas escoavam junto com uma corrente de ar seco descendente e conectada a primeira saída, havia uma corrente de fluido, disposta de forma horizontal na estrutura, necessária para a força de arraste das partículas. Além disso, alterou-se o tubo de alimentação, como pode ser visto na figura 2.

Depois das modificações o equipamento passou a ser alimentado na mesma posição vertical, porém sem a corrente descendente e mantendo a corrente de arraste. Essas modificações foram efetuadas devido ao entupimento das partículas no tubo da alimentação, pois aumentando a área, a velocidade de arraste das partículas se adequa ao desejado, facilitando a separação.



**Figura 2. Elutriador antigo e novo, respectivamente.**

*Fonte: O Autor, 2018*

Ao analisar a eficiência do processo de separação, observou a composição da fração, e o tipo de processamento da partícula, esmeril ou triturador.

Em sequência na etapa química, foram realizados testes simples no laboratório de química com as carcaças poliméricas a fim de criar um molde para possíveis testes de resistência e possíveis aplicações. Como visto na metodologia dessa etapa, os polímeros não apresentaram resultados quanto ao amolecimento, devido ao retardante de chama. O Óxido de Decabromodifenila ou simplesmente Decabromo, possui nome comercial de FR-1210. É um retardante de chama bromado utilizado nas formulações do copolímero de ABS [6].

Reações de fase sólida: o retardante de chama pode causar a formação de uma camada de carbono na superfície do polímero, a qual atuará fisicamente como uma camada protetora. Isto pode ocorrer por exemplo, pela ação desidratante do agente sobre o polímero, gerando ligações duplas, as quais podem provocar a carbonização da superfície através de ligações cruzadas e ciclização [7].

Com o estudo de Gallo e Agnelli [7], explicou a presença da queima superficial desses polímeros.

Em paralelo ao estudo de polímeros, para os metais foram realizados testes de precipitação seletiva e oxirredução. Na etapa de oxirredução, foram obtidos 1,561 g de cobre provenientes do Triturador e 2,06 g provenientes do Esmeril. Entretanto na precipitação seletiva, não foi possível quantificar a recuperação de cobre devido a impurezas de outros metais. Diante disso, esses testes ainda estão em fases de otimizações e pesquisas.

### **3 CONCLUSÃO**

O trabalho desenvolvido permitiu instigar nos alunos envolvidos o viés inovador através da análise de problemas e modificações de equipamentos necessários para a separação física do material, ademais, durante os dois anos de pesquisa, proporcionou conhecimentos em outras áreas da engenharia, como a mecânica e conhecimentos do setor de metais e polímeros.

Contudo, apesar das modificações realizadas para a melhoria do processo, com os testes, concluiu-se a ineficiência do esmeril em relação ao processo de moagem, optando portanto pelo uso convencional do triturador, tendo visto que foi obtido no esmeril uma perda de 50% do material inicialmente utilizado.



## Agradecimentos

Ao orientador, Ricardo França Furtado da Costa, pelo apoio nas decisões e por todo auxílio durante as etapas do projeto.

Ao coordenador, Leonardo Ramos Paes de Lima, pelas sugestões, contribuindo sempre com o bom desenvolvimento da pesquisa.

Ao Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – UNILESTE-MG, por ceder o ambiente, equipamentos e funcionários necessários para a desenvolvimento do Projeto de Pesquisa.

À FAPEMIG pelo fomento de bolsas de auxílio à pesquisa referente ao processo PRT -014/2016.

Aos funcionários dos laboratórios de Engenharia Química e Engenharia Mecânica da UNILESTE-MG, pelo auxílio e disposição.

## REFERÊNCIAS

- 1 VEIT, H. M. Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- 2 TRIGUEIRO, A. Brasil é campeão na geração de lixo eletrônico por habitante. 2012. [acesso em 9 ago. 2017]. Disponível em: <http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2012/07/brasil-e-campeao-na-geracao-de-lixo-eletronico-por-habitante.html>.
- 3 MACDONALD, A.; MILLER, J. W. Gold Deals Remain Likely Despite Barrick-Newmont Merger's Collapse. The Wall Street Journal, 19 mai. 2014. [acesso em 9 ago. 2017]. Disponível em: <http://online.wsj.com/news/articles/SB10001424052702304908304579562191180572808>.
- 4 PRIOR, E. How much gold is there in the world? BBC News Magazine, 1 abr. 2013. [acesso em 7 ago. 2017]. Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/news/magazine-21969100>.
- 5 VENTURA, E. A. C. C. Estudo de Processos Físicos para Recuperação de Metais de Placas de Circuito Impresso. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2014. 115p
- 6 MARTINS, P. A. Uso de aditivos não tóxicos como retardantes de chama em ABS. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2013. 152 p.
- 7 GALLO, J. B.; AGNELLI, J. A. M. Aspectos do Comportamento de Polímeros em Condições de Incêndio. Polímeros: Ciência e Tecnologia. 1998, p. 23-38.