

PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: CARACTERIZAÇÃO E VALOR AGREGADO

Marcos Paulo Kohler Caldas ^{1,2}

Bárbara Mazzini Loureiro ³

Flávia Paulucci Cianga Silva ⁴

Viviane Tavares de Moraes ⁵

Jorge Alberto Soares Tenório ⁶

Denise Croce Romano Espinosa ⁶

Resumo

Esse trabalho tem o propósito de caracterizar quatro lotes diferentes de placas de circuito impresso (PCIs) do mercado de sucatas identificando e quantificando os metais presentes para assim relacionar ao valor associado a cada um dos lotes. Para alcançar o objetivo proposto realizou-se cominuição em moinho de facas, seguido de análise em estereoscópio para verificar a liberação dos metais. Em seguida foram testadas duas rotas de lixiviação ácida para caracterização da fração metálica: lixiviação em água régia, seguida de lixiviação em ácido nítrico e também lixiviação em água régia invertida. As análises químicas quantitativas foram feitas por ICP-OES e também se realizou ensaios de perda ao fogo para quantificar as frações polimérica e cerâmica. Encontrou-se para o lote A 33,6% de material metálico, 42,01% no lote B, 24,27% no lote C e 26,04 no lote D. O metal mais abundante em todos os lotes foi o cobre e foram encontradas porcentagens de ouro com alto valor associado. Para 100% dos metais recuperados nos lotes estudados seria possível obter para o lote A 27.643,42 dólares, para o lote B 8.585,22 dólares, para o lote C 10.187,76 dólares e para o lote D 6.409,17 dólares por tonelada. A diferença entre os valores dos lotes, que pode chegar a 21.234,25 dólares quando comparados A e D justifica uma melhor análise das placas, com posterior separação por tipo, antes da venda às indústrias recicladoras.

Palavras-chave: PCIs; Reciclagem; Caracterização; Valor econômico.

PRINTED CIRCUIT BOARDS: CHARACTERIZATION AND ADDED VALUE.

Abstract

This work has the purpose of characterizing four different lots of printed circuit boards (PCBs) of the scrap market, identifying and quantifying metals in them to establish a relation with the value associated with each of the lots. To achieve the proposed objective, comminution was performed in a cutting mill, followed by analysis in stereoscope to verify the release of metals. Subsequently, two routes of acid leaching for metal fraction characterization were tested: leaching in aqua regia, followed by leaching in nitric acid and also leaching in inverse aqua regia. The quantitative chemical analyses were performed by ICP-OES, and loss on ignition was also performed to quantify the polymer and ceramic fractions. For lot A, 33.6% of metal material was found, 42.01% for lot B, 24.27% for lot C, and 26.04 for lot D. The most abundant metal in all the lots was copper, and percentages of gold with high associated value were found. Considering 100% of the metal recovered in the studied lots, a sum of 27,643.42 USD could be obtained for lot A, 8,585.22 USD for lot B, 10,187.76 USD for lot C, and 6,409.17 USD for lot D, per ton of PCB. The difference between the values of the lots, which can reach 21,234.25 USD when A and D are compared, justifies a better analysis of the plates, with subsequent separation by type, before the sale to the recycling industries.

Keywords: PCBs; Recycling; Characterization; Economic value.

¹Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: marcospaulo@ifes.edu.br

²Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Espírito Santo – IFES, Serra, ES, Brasil.

³Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil.

⁴Instituto Tecnológico da Vale – ITV, Ouro Preto, MG, Brasil.

⁵Centro Universitário, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, Brasil.

⁶Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo – USP, SP, Brasil.



I INTRODUÇÃO

A tecnologia está evoluindo de forma acelerada e com isso o ciclo de vida dos equipamentos eletroeletrônicos vem diminuindo. Rapidamente os modelos e configurações de computadores, celulares, televisões e impressoras, por exemplo, se tornam obsoletos e são descartados [1]. Estima-se que em 2016 foram produzidas 44,7 milhões de toneladas de resíduos eletroeletrônicos (REEEs) [2,3]. Nesse mesmo ano o Brasil produziu 1,5 milhão de toneladas de REEE, ou seja, 7,2 kg per capita [3,4].

A matéria prima utilizada na produção dos equipamentos é, em geral, obtida a partir de fontes não renováveis. Contudo, com o passar das décadas, os teores de metal presentes nos minérios tem diminuído, tornando cada vez mais caro a mineração e obtenção destes elementos o que reforça a importância da reciclagem desses equipamentos e a recuperação dos materiais neles presentes. Além disso, a disposição inadequada pode trazer vários riscos tanto para a população quanto para o meio ambiente, pois envolve materiais perigosos e tóxicos [5]. Faz parte do desenvolvimento socioambiental de um país a atenção com seus resíduos. Através de diversos estudos percebe-se que são muitos os benefícios que essa política pode trazer em um mundo onde um dos conceitos mais falados e procurados é a sustentabilidade [6-11].

Uma parte dos REEEs de grande interesse econômico de reciclagem são as placas de circuito impresso (PCIs), onde se encontra a maior fração metálica. Elas contêm partes tanto inorgânicas como orgânicas e uma grande variedade de metais de interesse em recuperação, como Cu, Au, Al, Sn, entre outros [1]. Porém, as PCIs são extremamente heterogêneas, variando sua composição tanto em relação a sua aplicação, como fabricantes e tecnologia empregada. Isso influencia diretamente ao valor econômico associado a cada tipo de placa, e, portanto, ao seu comércio [12].

A coleta e separação dessas placas dentre o lixo convencional não costuma ser feita pelo próprio consumidor e, nessa etapa, que aparece o papel dos sucateiros, pessoas que recuperam esses materiais junto às assistências técnicas, centros de coletas e aterros. É nesse momento que acontece a separação das placas de acordo com seu valor associado, e se torna de extrema importância a caracterização delas. Os sucateiros vendem em geral em lotes as PCIs para empresas recicladoras, a fim de aprimorar o processo de recuperação e o seu ganho [3].

O objetivo desse trabalho é caracterizar quatro lotes encontrados no mercado de sucatas de PCIs a fim de identificar e quantificar os metais presentes em cada um deles. Pretende-se também relacionar os dados encontrados com seus valores de mercado, justificando sua importância e sua separação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram separados para caracterização quatro lotes de placas de circuito impresso. Cada lote se caracteriza pela presença de um ou mais tipos de placas de circuito impresso de computadores obsoletos. O lote A é composto de: memória dourada, processador slot e placas de HD (Figura 1). O lote B refere-se a placas mãe de computador antigas (Figura 2), o lote C placas de circuito impresso provenientes de equipamentos diversos como impressoras e computadores obsoletos (Figura 3) e o lote D placas ponteiras (Figura 4). Essa separação e nomenclatura são feitas usualmente na indústria e usada no mercado de compra e venda de REEE e relaciona-se ao valor associado a cada tipo placa.

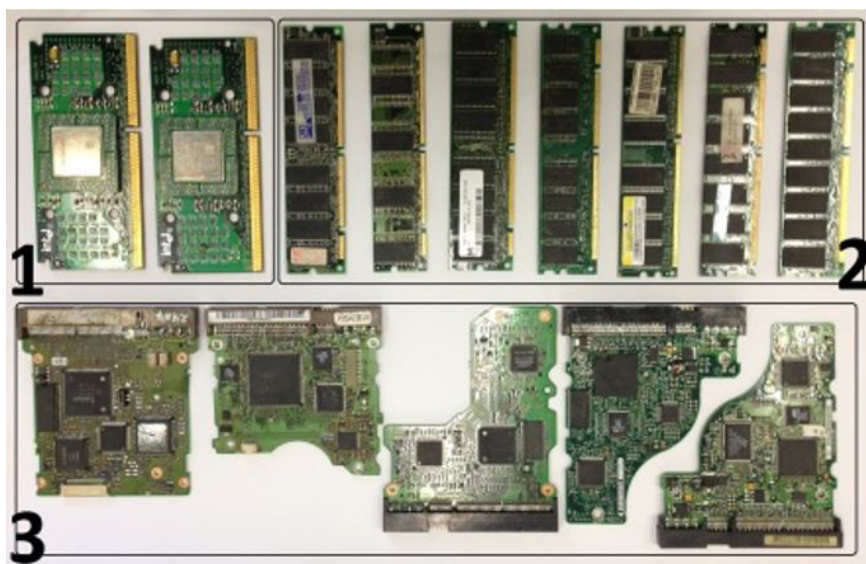


Figura 1. Lote A. 1-Memória dourada; 2-Procesador slot; 3-Placas de HD.

Para processamento mecânico foram utilizados aproximadamente 300 gramas de cada lote. As PCs foram cominuídas em um moinho de facas, passando sequencialmente a amostra por grelhas de 9mm, 6mm e 3mm.

Após a cominuição os lotes foram analisados em estereoscópio para verificar a liberação dos materiais presentes nas placas. Em seguida foram feitas duas rotas de lixiviação ácida: digestão em água régia [8] seguida de

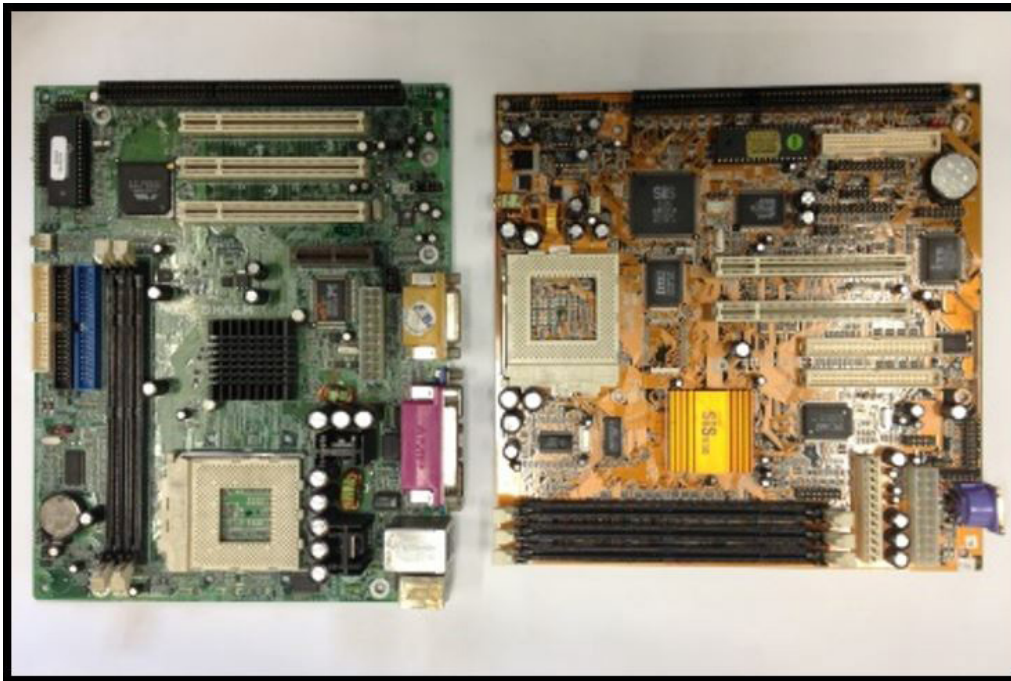


Figura 2. Lote B. Placas mãe antigas.

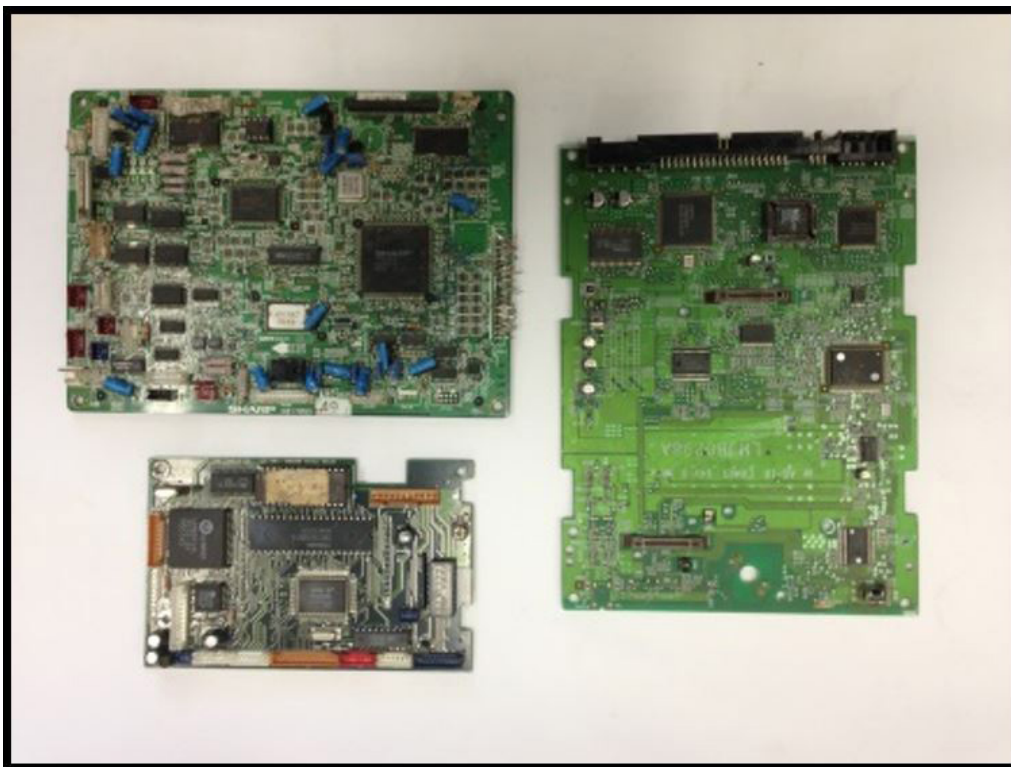


Figura 3. Lote C. Placas diversas.

lixiviação com ácido nítrico 10 M [13] e água régia invertida. Esses procedimentos foram realizados para garantir que todo o metal presente nas PCIs fossem solubilizados e posteriormente quantificados. Os filtrados da primeira sequência de lixiviação passaram por ensaio de perda ao fogo para quantificar as frações cerâmica e polimérica de cada lote, fechando assim o balanço de massa [8]. A análise química quantitativa foi feita por ICP-OES. A sequência utilizada está ilustrada no fluxograma do processo (Figura 5).

2.2 Análise no Estereoscópio

As amostras após passarem pelo processo de cominuição foram observadas em estereoscópio a fim de verificar a liberação dos materiais e, assim, garantir que

a fração metálica fosse solubilizada durante a lixiviação ácida.

2.3 Lixiviação Ácida das PCIs

2.3.1 Caracterização com água régia

Separou-se para lixiviação em água régia aproximadamente 5g de cada lote por quarteamento. Utilizou-se uma proporção de 1:20, 20ml de água régia para cada 1g de amostra [7]. A solução permaneceu durante 24h a temperatura ambiente (25°C), para completa digestão dos metais. As próximas etapas foram filtração em papel de filtro quantitativo seguido de análise do líquido por Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado (ICP-OES) visando quantificar os metais presentes.

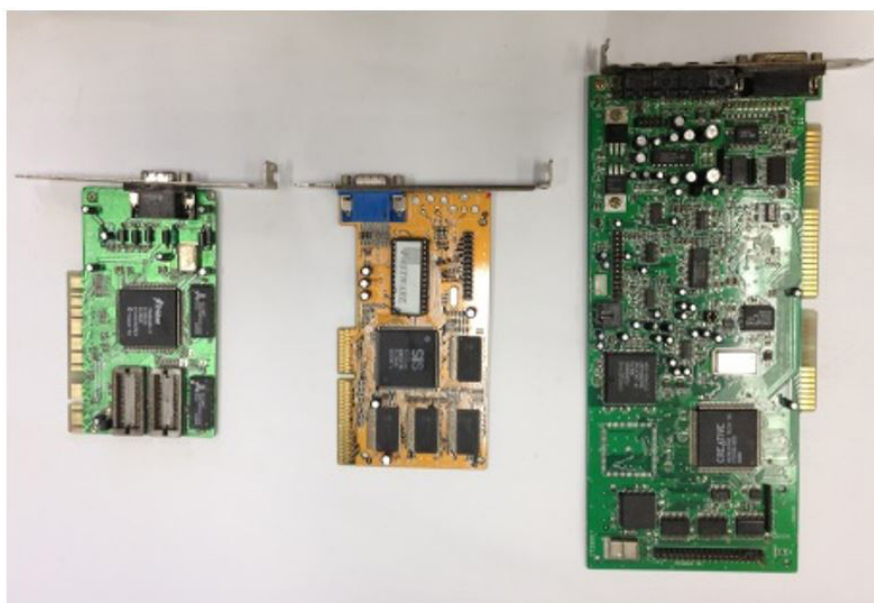


Figura 4. Lote D. Placas ponteiros.

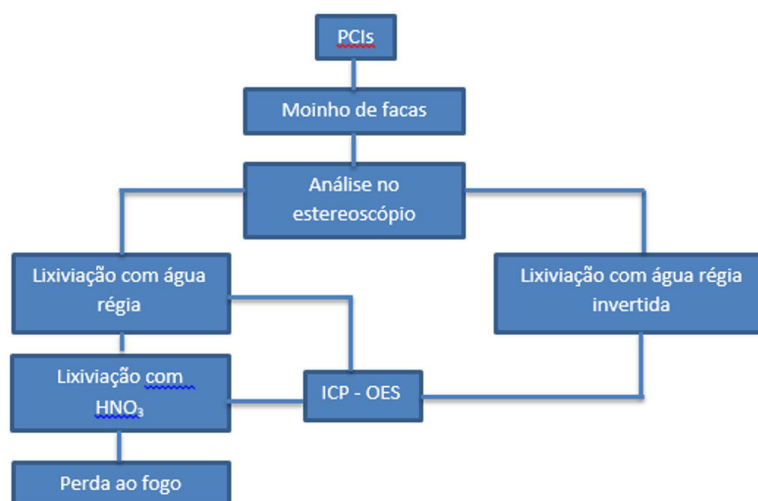


Figura 5. Fluxograma do processo.

2.3.2 Lixiviação com HNO_3

Os sólidos filtrados na etapa de lixiviação em água régia foram colocados em ácido nítrico 10M durante 2h em temperatura ambiente (25 °C) na proporção 1:5, 5ml de ácido para cada 1g de sólido. Utilizou-se uma solução 10M uma vez que a prata é solubilizada em solução 8M de ácido nítrico [13]. Essa etapa foi realizada com intenção de verificar se ainda existiam metais não solubilizados na etapa anterior (lixiviação em água régia). Após a filtragem do resíduo sólido, o licor foi analisado por ICP-OES visando novamente quantificar os metais presentes.

Os resíduos não lixiviados foram secos em estufa, 60°C por 48h, pesados para cálculo do balanço de massa e então encaminhados para análise de perda ao fogo.

2.3.3 Caracterização com água régia invertida

O lote C foi selecionado com o intuito de verificar se o processo convencional de lixiviação por água régia foi eficaz para a completa solubilização dos metais. Escolheu-se o processo de água régia invertida (IHCl: 3HNO_3) por ser aplicado em laboratórios de análises químicas para abertura de amostras sólidas para quantificação de metais por ICP.

Aproximadamente 5g de amostra foi colocada em ácido nítrico na proporção 1:10, 10ml de ácido para cada 1g de amostra, e a solução permaneceu por 24 h a temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. Posteriormente adicionou-se ao mesmo béquer 17mL de ácido clorídrico, mantendo a proporção de ácidos (IHCl: 3HNO_3). Essa solução foi então aquecida a 100 °C até evaporação dos ácidos. Como se verificou que ainda havia peças metálicas mais 30mL dessa mistura de ácidos foi adicionada e prosseguiu-se com a evaporação até restar líquido suficiente apenas para cobrir o sólido.

Essa solução foi filtrada com papel de filtro quantitativo de filtragem rápida em um balão volumétrico de 250ml. Foi utilizado cerca de 40mL da mistura de ácidos com água deionizada (1:1) para lavar o papel de filtro com o objetivo de garantir que todo o metal solubilizado foi direcionado ao balão, adicionou-se ainda 20mL de HCl e o restante do volume foi completado com água deionizada. O papel de filtro mais resíduo foi lavado com água deionizada em abundância e seco em estufa em 60 °C por 48h. Após esse período pesou-se e fez-se balanço de massa.

Essa solução do balão volumétrico foi novamente filtrada em papel de filtro quantitativo de filtragem lenta uma vez que verificou-se a formação de precipitado. O líquido previamente diluído foi novamente filtrado em papel de filtro de separação de fases. Encontrou-se uma massa de 0,0864g de sólido precipitado, que foi caracterizado por EDS. Por fim, a concentração dos metais foi determinada utilizando ICP-OES.

2.4 Perda ao Fogo e Composição das PCs

O resíduo remanescente da lixiviação em ácido nítrico foi colocado em navícula de cerâmica previamente pesada e levado ao forno a 800°C por 1h. Após resfriamento, a navícula foi novamente pesada e, após descontar a massa da navícula, tem-se que a diferença de massa entre o resíduo inicial e final corresponde a parte orgânica que evaporou e, portanto, representa a fração polimérica presente nas placas. Já o que restou na navícula corresponde à fração cerâmica, parte inorgânica [14].

As frações de cerâmicos, polímeros e metais foram determinadas pelas Equações 1 e 2:

$$LA = (M) \quad (1)$$

$$PF = (P) \quad (2)$$

Onde LA significa Lixiviação em água régia; PF Perda ao fogo; M refere-se à fração metálica; P à fração polimérica. A fração cerâmica foi determinada a partir das frações M e P [13].

2.5 Cálculos Financeiros

Os cálculos financeiros para avaliar o valor de venda dos metais analisados foram feitos baseados nas tabelas London Bullion Market Association e London Metal Exchange (LME) que possuem a cotação da tonelada de cada um dos metais analisados nesta pesquisa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise no Estereoscópio

Após a moagem observou-se perdas de massa decorrentes do manuseio do material no moinho e possíveis perdas em transporte de 2,75% em média, sendo 2,5% para o lote A, 1,8% para o lote B, 3,0% para o lote C e 3,2% para o lote D.

Nas imagens observadas (Figura 6-9) é possível observar partes metálicas visíveis tanto totalmente liberadas na amostra como associadas às outras camadas da placa. Segundo Reuter et al. [15] mesmo com algumas peças com materiais associados essa granulometria é eficiente para liberar os metais para a lixiviação ácida.

3.2 Lixiviação Ácida das PCs

3.2.1 Caracterização com água régia, HNO_3 e perda ao fogo

Após a sequência de lixiviações e ensaio de perda ao fogo foi possível determinar a composição das frações polimérica, cerâmica e metálica de cada lote de PCs estudados utilizando as equações de balanço de massa [8] (Figura 10).



Figura 6. Lote A cominuído.



Figura 7. Lote B cominuído.

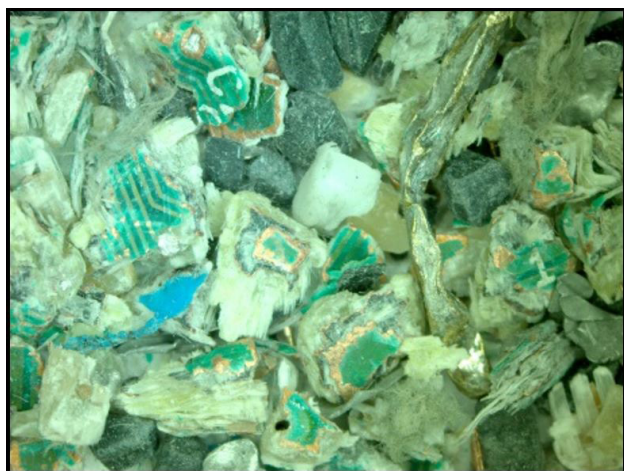


Figura 8. Lote C cominuído.

Verificou-se que o lote A estudado possui 33,58% em massa de metais, 37,89% de fração cerâmica e 28,52% de fração polimérica. O lote B possui 42,01% em massa de metais, 27,6% de fração cerâmica e 30,4% de



Figura 9. Lote D cominuído.

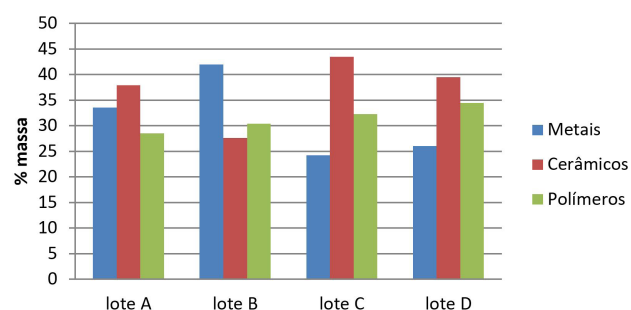


Figura 10. Gráfico de % massa de cada fração nos lotes.

fração polimérica. O lote C 24,27% em massa de metais, 43,46% de fração cerâmica e 32,27% de fração polimérica. E, o lote D 26,04% em massa de metais, 39,5% de fração cerâmica e 34,46% de fração polimérica. Segundo *Yamane e Moraes et al, 2011* [8] para computadores foram encontrado 45% metais, 27% polímeros e 28% cerâmicos. Já *Veit et al. 2006* [9] encontrou também para placas de computadores 40% metais 30% cerâmicos e 30% de polímeros, em média. Portanto, apenas o lote B ficou próximo desses resultados encontrados, os outros lotes possuem porcentagem de metais menor que encontrado na literatura. Esse se assemelha mais aos resultados já encontrados, pois é composto de placas mães antigas, um tipo de PCB mais comum nos resíduos eletroeletrônicos e possivelmente o utilizado nesses estudos.

3.2.2 Caracterização usando água régia invertida

Após os resultados do ensaio de água régia invertida foi possível por balanço de massa calcular a porcentagem de metais do lote C analisando a diferença de massa entre o material colocado para digestão e o material retido no filtro. Encontrou-se um valor de 43,5% de metais. Comparando com o resultado do balanço de massa encontrado para a caracterização em água régia (24,27% em massa de metais) percebe-se uma grande diferença. Porém, percebe-se que esse valor não representa apenas a fração metálica pois

verificou-se a solubilização da resina, provavelmente devido a temperatura do experimento. As resinas mais utilizadas em PCBs são resina epoxy e resina fenólica e é possível haver solubilização de ambas nas condições do processo [16]. Essa rota de caracterização foi descartada, portanto, devido a solubilização da resina, o que compromete os resultados. Além disso essa rota apresenta maior utilização de reagentes, energia e tempo.

3.3 Análise dos Metais por ICP-OES

A porcentagem em massa dos metais presentes em cada lote foi calculada a partir dos resultados obtidos com a análise de ICP-OES da lixiviação em água régia. Os valores estão apresentados na Tabela I.

Valores semelhantes aos vistos na Tabela I também foram encontrados por outros autores. Park e Fray [7] encontraram 0,025% de ouro, 16% de cobre, 3% de estanho, 2% de chumbo e 5% de ferro. Já Tuncuk et al. [1] encontrou 0,01% de ouro, 18,5% de cobre, 4,9% de estanho, 2,7% de chumbo e 2,1% de ferro. Yamane et al. [8] encontraram 0,16% de prata, 0,13% de ouro, 20,19% de cobre, 8,83% de estanho, 5,53% de chumbo e 7,33% de ferro. Já Kasper et al. [10] encontraram 0,05% de prata, 0,09% de ouro, 37,81% de cobre, 2,55% de estanho, 1,23% de chumbo e 4,85% de ferro.

Opostamente ao que sugere Petter et al. [17], a lixiviação em água régia mostrou ser suficiente para solubilizar os metais presentes na placa inclusive a prata, pois a lixiviação em ácido nítrico resultou em porcentagens massa de metais menores que 0,1% e para prata não houve solubilização.

O resultado está próximo do obtido por balanço de massa (33,58%, 42,01%, 24,27%, 26,04% massa de metais dos lotes A, B, C e D respectivamente). Foi encontrada para os lotes A, C e D uma maior porcentagem de metais por ICP-OES provavelmente devido à heterogeneidade das amostras e possíveis imprecisões nas pesagens e manipulações para cálculo de balanço de massa. Além disso, pode haver

a presença de outros metais que não foram identificados na análise química por ICP-OES, no caso do lote B, em que se encontrou uma maior porcentagem metálica no balanço de massa.

Observa-se que todos os lotes de placas continham PCBs que não são *lead free*, pois observa-se a presença de até 1,46% de chumbo. Isso era esperado já que a norma RoHS *lead free*, uma diretiva europeia de 2006 que proíbe que o chumbo seja usado no processo de fabricação, é relativamente recente e, algumas das placas usadas neste estudo são de equipamentos antigos.

Comparando as concentrações encontradas dos metais para o lote C utilizando-se água régia e água régia invertida percebe-se que foram encontradas concentrações menores, porém próximas de todos os metais na água régia invertida, com exceção do bário (0,2234% de diferença), cálcio (1,39%) e ferro (3%).

3.4 Valorização

O metal com maior porcentagem massa da placa em todos os lotes é o cobre. Em 2013 o preço do cobre em média foi 7.926,00 U\$/t [18]. Considerando que haja recuperação de 100% do cobre no lote seria possível retirar 227,8kg de cobre o equivalente a 1.518,74 dólares. As reservas brasileiras de minério de cobre possuem um teor médio de 0,8% de cobre, já no Chile, que detém 32,7% das reservas mundiais esse teor pode chegar em até 1,5% [18]. Portanto há maior disponibilidade de cobre na placa do que no minério, o que tem influenciado o grande número de estudos na área [7, 8, 12, 14, 17].

Já em relação ao ouro foi encontrado para o lote A uma porcentagem em massa de 0,06%, o equivalente a 24.760,06 dólares se 100% fosse recuperado. As reservas brasileiras possuem um teor de ouro de 0,0002% aproximadamente [18]. Portanto, uma placa pode conter até 300 vezes mais ouro que seu minério.

Tabela I. Porcentagem em massa de cada metal nos lotes estudados a partir dos ensaios de lixiviação ácida

Metal	Lote A ¹	Lote B ¹	Lote C ¹	Lote C ²	Lote D ¹
Prata	0,03	0,019	0,062	0,0312	0,033
Alumínio	0,06	7,5	3,026	2,73	3,55
Ouro	0,06	0,015	0,0205	0,00853	0,012
Bário	0,07	0,025	0,0246	0,248	0,015
Cálcio	0,07	0,23	0,07	1,46	0,0949
Cobalto	0,01	0	0,0157	0,01	0
Cobre	26,4	22,78	16,67	15,98	14,28
Ferro	2,1	0,026	0	2,996	3,73
Níquel	2,24	0,084	0,352	0,972	0,46
Chumbo	1,46	0,288	0,87	1,015	0,87
Estanho	2,95	2,7	2,93	2,68	1,29
Zinco	2,69	5,38	0,842	0,858	2,63
Total	38,14	39,05	24,88	28,99	26,96

¹Lixiviação em água régia; ²Lixiviação em água régia invertida.

Calcula-se que para 100% dos metais recuperados nos lotes estudados seria possível obter para o lote A 27.643,42 dólares, para o lote B 8.585,22 dólares, para o lote C 10.187,76 dólares e para o lote D 6.409,17 dólares por tonelada.

No mercado brasileiro encontra-se uma média de preço no mercado de compra e vendas de sucata de 15.909,09 dólares por tonelada do lote A, 5.681,8 dólares/t do lote B, 5.727,09 dólares/t do lote C e 6.136,36 dólares/t do lote D.

4 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados concluiu-se que:

- O lote A estudado possui 33,58% em massa de metais, 37,89% de fração cerâmica e 28,52% de fração polimérica. O lote B possui 42,01% em massa de metais, 27,6% de fração cerâmica e 30,4% de fração polimérica. O lote C 24,27% em massa de metais, 43,46% de fração cerâmica e 32,27% de fração polimérica. E, o lote D 26,04% em massa de metais, 39,5% de fração cerâmica e 34,46% de fração polimérica;

- Os lotes estudados possuem placas que não são *lead free*;
- Verificou-se a presença de uma gama de metais, sendo os de maior interesse: cobre (14,28-26,4%), estanho (1,29-2,95%), ouro (0,012-0,06%), alumínio (0,06-7,5%), prata (0,019-0,062%), zinco (0,842-5,38%) e Ni (0,084-2,24%);
- Podem ser recuperados para o lote A 27.643,42 dólares, para o lote B 8.585,22 dólares, para o lote C 10.187,76 dólares e para o lote D 6.409,17 dólares por tonelada se 100% dos metais fossem recuperados. A maior valor agregado encontrado para o lote A se dá devido à presença muito superior de ouro neste lote;
- A concentração de cobre e ouro é maior que nos minérios, influenciando estudos na área, destacando a importância da caracterização para processos futuros de reciclagem e recuperação das frações metálicas.

Agradecimentos

À FAPESP, processo 17412-0, CNPq e CAPES. Ao Instituto Federal do Espírito Santo.

REFERÊNCIAS

- 1 Tuncuk A, Akcil A, Yazici EY, Devici H. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*. 2012;25(1):28-37.
- 2 United Nations Environment Programme. Call for global action on e-waste. Lisboa: UNEP; 2006
- 3 Baldé C.P., Forti V., Gray V., Kuehr R., Stegmann P. The global e-waste monitor – 2017: quantities, flows, and resources. Genebra: ITU.
- 4 Araújo MG, Magrini A, Mahler CF, Bilitewski B. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. *Waste Management (New York, N.Y.)*. 2012;32(2):335-342.
- 5 Robinson BH. E-waste: an assessment of global production and environmental impacts. *The Science of the Total Environment*. 2009;408(2):183-191.
- 6 Ongondo FO, Williams ID, Cherrett TJ. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management (New York, N.Y.)*. 2011;4(31):714-730.
- 7 Park YJ, Fray DJ. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;164:1152-1158.
- 8 Yamane LH, Moraes VT, Espinosa DCR, Tenório JAS. Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management (New York, N.Y.)*. 2011;31(12):2553-2558.
- 9 Veit HM, Bernardes AM, Ferreira JZ, Tenório JAS, Malfatti CF. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;137(3):1704-1709.
- 10 Kasper AC, Berselli GBT, Freitas BD, Tenório JAS, Andréa M, Bernardes AM, et al. Printed wiring boards for mobile phones: characterization and recycling of copper. *Waste Management (New York, N.Y.)*. 2011;31(12):2536-2545.
- 11 Marques AC, Cabrera JM, Fraga Malfatti CF. Printed circuit boards: a review on the perspective of sustainability. *Journal of Environmental Management*. 2013;131:298-306.
- 12 Zhang S, Forssberg E. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. *Resources, Conservation and Recycling*. 1997;21:247-269.
- 13 Vogel AI. Química analítica qualitativa. 5ª ed. São Paulo: Mestre Jou; 1992.

- 14 Moraes V. Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos. [doutorado]. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2011.
- 15 Reuter MA, Hudson C, van Schaik A, Heiskanen K, Meskers C, Hagelüken C. Metal recycling: opportunities, limits, infrastructure - a report of the working group on the global metal flows to the international resource panel. Lisboa: UNEP; 2013.
- 16 Li J, Shrivastava P, Gao Z, Zhang HC. Printed circuit board recycling: a state-of-the-art survey. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. 2004;27(1):33-42.
- 17 Oliveira PCF. Valorização de placas de circuito impresso por hidrometalurgia [Tese de doutorado]. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa; 2012.
- 18 Agência Nacional de Mineração. Departamento Nacional de Produção Mineral [página da internet]. Brasília: ANM; 2014 [citado em 2017 Março 21]. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/>

Recebido em: 1 Jun. 2018

Aceito em: 8 Nov. 2018