



## BALANÇO DE MASSAS DE MATERIAIS SEPARADOS DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO VIA DESMANTELAMENTO MANUAL E CARACTERIZAÇÃO DE PINOS CONECTORES

PINHEIRO, R.P.R.P.<sup>1</sup>, FRANCA, J.V.C.<sup>1</sup>, MONJARDIM, M.D.<sup>1</sup>, CIMINELLI, V.S.T.<sup>1,2</sup>, MAJUSTE, D.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte - MG. E-mail: [ravelpimenta@ufmg.br](mailto:ravelpimenta@ufmg.br); [jvictorfranca@yahoo.com.br](mailto:jvictorfranca@yahoo.com.br); [mathewsmonjardim@gmail.com](mailto:mathewsmonjardim@gmail.com); [daniel.majuste@demet.ufmg.br](mailto:daniel.majuste@demet.ufmg.br); [virginia.ciminelli@demet.ufmg.br](mailto:virginia.ciminelli@demet.ufmg.br)

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Recursos Minerais, Água e Biodiversidade (INCT – ACQUA), Belo Horizonte-MG.

### RESUMO

No presente trabalho, um balanço de massas de diversos materiais separados de placas de circuito impresso de computadores foi realizado para contribuir na definição de alternativas de reciclagem/tratamento desses materiais, principalmente, dos pinos conectores metálicos presentes nos diferentes tipos de componentes eletrônicos. O desmantelamento manual resultou na separação de nove tipos de materiais, com a seguinte distribuição percentual (em massa) em ordem decrescente: placas desmontadas, plásticos, carcaças metálicas, pinos conectores, PLC chips, capacitores, cerâmicos, fios de cobre e solda residual. Massas relativas de 90g/kg e 73g/kg de pinos foram separados a partir de dois lotes contendo 30 placas cada. A análise química quantitativa dos pinos indicou um teor elevado de cobre (66-68% m/m) e teor significativo de zinco (25-27% m/m), além de teores apreciáveis de metais preciosos, tais como ouro (127-128 g/t) e prata (119-335 g/t). Tecnologias para o tratamento desse material com foco na recuperação dos metais listados acima estão sendo avaliadas na UFMG.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduo eletrônico, Placas de circuito impresso, Desmantelamento, Pinos conectores.

### ABSTRACT

This work describes a mass balance for different materials manually separated from printed circuit boards (PCI) of computers aiming at contribute to the definition of recycling and treatment alternatives for such materials, mainly for metallic connector pins removed from the electronic components. The manual dismanteling resulted in 9 types of materials listed in decreasing order of mass distribution (%): disassembled circuit boards, plastics, metallic shields, connector pins, PLC chips, capacitors, ceramics, copper wires and residual welding alloys. Relative masses of 90g/kg and 73g/kg of connector pins were obtained from two groups of 30 PCI each. The quantitative chemical analyses of the connector pins has shown a high copper content (66-68% m/m), significant content of zinc (25-27% m/m) and very attractive contents of precious metals, such as gold (127-128 g/t) and silver (119-335 g/t). Technologies for the processing of this material aiming at recovery these metals are currently being evaluated at UFMG.

**KEYWORDS:** Printed circuit boards, Manual dismanteling, Electronic waste, Connector pins.

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2016, aproximadamente 45 milhões de toneladas de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) foram gerados em todo o mundo e apenas 20% deste total foi coletado e reciclado apropriadamente (Baldéet *et al.*, 2017). O Brasil foi o maior gerador deste tipo de resíduo na América Latina, totalizando cerca de 1,5 milhões de toneladas.

De acordo com Kaya (2012) e Jiang *et al.* (2012), as placas de circuito impresso (PCI) representam apenas cerca de 3-6% (em massa) do total de REEE gerado globalmente, sendo uma grande parcela do valor econômico desse tipo de resíduo devido a presença significativa de cobre e de outros metais com alto valor econômico, tais como Au, Ag, Ni, Sn dentre outros. A rota tradicional de tratamento de PCI é a rota pirometalúrgica, a qual contempla as etapas de preparação de concentrado (*i.e.* trituração, moagem, classificação e separação), fundição e eletrorefino, além do processamento da lama anódica a fim de recuperar metais preciosos. O uso de temperaturas elevadas na fundição representa elevado investimento de capital e operacional para uma unidade de tratamento e há liberação de gases tóxicos (*e.g.* dioxinas e furanos) para a atmosfera devido à queima de retardantes de chama contidos nas placas (Tuncuk *et al.*, 2012; Cui e Zhang, 2008). Outra limitação dessa rota é o nível elevado de perda de metais preciosos na escória formada durante a etapa de fundição (Cui e Zhang, 2008). Além disso, nas operações de preparação, perdas significativas de material, da ordem de 10-35% são reportadas na literatura (Jadhav e Hocheng, 2015; Tuncuk *et al.*, 2012).

Neste contexto, a aplicação de rotas hidrometalúrgicas na recuperação de metais presentes em PCI tem sido cada vez mais investigada devido a potenciais vantagens, como menor investimento de capital e gastos operacionais; menor impacto ambiental; e maior flexibilidade (diferentes materiais, metais e/ou sais, podem ser produzidos) (Tuncuk *et al.*, 2012; Cui e Zhang, 2008). As rotas hidrometalúrgicas de tratamento desse tipo de resíduo, ainda em fase de desenvolvimento, também envolvem a etapa inicial de preparação devido a necessidade de expor o conteúdo metálico aos reagentes químicos, aumentar o teor dos metais de interesse no material a ser processado e, ainda, remover os materiais indesejáveis e inertes presentes, tais como, plásticos e cerâmicos. Por outro lado, segundo Mesquita *et al.* (2018), o tratamento de pinos conectores (100% metálicos) separados de componentes eletrônicos presentes em PCI representa uma alternativa promissora devido aos altos teores dos metais de interesse, os quais encontram-se expostos ao sistema reacional. Dessa forma, operações de moagem de PCI e separação (gravítica, magnética e/ou eletrostática) não são realizadas, reduzindo custos operacionais e consumo de energia.

Logicamente, a viabilidade econômica de processo hidrometalúrgico de tratamento de tais pinos conectores metálicos depende dos teores envolvidos de metais com alto valor comercial e facilidade de separação prévia dos pinos em etapa de desmantelamento de PCI. No presente trabalho, o desmantelamento manual de dois lotes de placas foi realizado com foco na obtenção de amostras de pinos conectores para caracterização química e realização de balanço de massas para os diversos materiais separados, para contribuir na identificação de alternativas de reciclagem/tratamento desses materiais.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Desmantelamento das placas de circuito impresso

As placas de circuito impresso utilizadas neste trabalho foram fornecidas pelo Setor de Tecnologia da Informação da UFMG. As placas apresentam diferenças entre si, tais como

formato, tamanho, fabricante, ano de fabricação e quantidade de componentes eletrônicos presentes. Dois lotes, contendo 30 placas cada um, foram desmantelados. Os componentes, fixados às placas em pequenos orifícios com solda, foram removidos usando um soprador de ar quente (450°C e vazão de 500L/min) (GHG 630 DCE, BOSCH) em capela, para fundição da solda, e alicates, para remoção dos componentes.

Anteriormente à remoção dos componentes eletrônicos, as placas montadas foram pesadas usando balança de precisão (Bel Engineering, L). Após a remoção manual de todos os tipos de componentes presentes, as placas desmontadas foram pesadas. Em seguida, a separação manual dos pinos conectores metálicos presentes nos diversos componentes foi realizada usando alicates. Após tal separação, tanto os pinos metálicos quanto os diversos materiais separados, como plásticos, cerâmicos, fios de cobre, carcaças metálicas, dentre outros, foram pesados usando balança de precisão e, então, armazenados separadamente de acordo com o lote de origem e tipo de material.

## **2.2. Homogeneização dos pinos conectores**

O desmantelamento manual dos dois lotes de placas resultaram em duas amostras de pinos conectores, de diferentes tipos, contendo 1342,94g (Lote 2018) e 1135,40g (Lote 2019). Esses lotes foram homogeneizados manualmente em recipiente plástico fechado e, então, submetidos a quarteamentos sucessivos usando um quarteador mecânico (Sieving-Riffler, QUANTA-CHROME), visando obter sub-amostras representativas para análise química (contendo cerca de 1,5g cada) e processamento futuro.

## **2.3. Análise química dos pinos conectores**

O método de digestão e análise química dos pinos conectores adotado neste trabalho foi proposto por Mesquita *et al.* (2018). De maneira geral, esse método envolve etapa de digestão da massa metálica utilizando água régia invertida (1HCl:3HNO<sub>3</sub>) em temperaturas moderadas (55 ± 5 °C) e adições sucessivas de ácido clorídrico (HCl) 37%. A solução obtida após digestão completa do resíduo sólido, na qual não foram observados precipitados, foi posteriormente analisada por meio de espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), usando espectrômetro PERKIN-ELMER (Optima 7300DV). A análise química foi realizada conforme procedimentos analíticos distintos, de acordo com uma faixa de concentração esperada para o metal a ser analisado. A análise de elementos com baixa concentração relativa foi realizada em câmara Scott, sendo os parâmetros ajustados da seguinte maneira: potência do plasma de 1300W; fluxo do plasma de 15L/min; fluxo de gás auxiliar de 1mL/min; e fluxo do nebulizador de 0,6mL/min. A análise de elementos com alta concentração relativa, por sua vez, foi realizada em câmara de quartzo, ajustando-se os parâmetros em: potência do plasma de 1300W; fluxo do plasma de 15L/min; fluxo de gás auxiliar de 0,2mL/min; e fluxo do nebulizador de 0,8mL/min. Para ambos os procedimentos, curvas de calibração foram construídas utilizando-se padrões analíticos dos elementos de interesse. Tais elementos foram diluídos em uma solução contendo 12% v/v de HNO<sub>3</sub> e 32% v/v de HCl. Outras duas amostras foram preparadas e analisadas a título de comparação, visando garantir a confiabilidade nos resultados obtidos: amostra contendo 1,5mL de HNO<sub>3</sub> e 0,5mL de HCl (branco analítico), e outra contendo o mesmo volume de ácidos e 0,5g de liga de bronze com composição conhecida (IPT10, 85% Cu, 5% Zn, 5% Pb e 5% Sn) (padrão de referência).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Balanço de massa do desmantelamento manual

A Figura 3.1.1 apresenta a distribuição percentual relativa, em massa, de cada tipo de material obtido no desmantelamento manual dos dois lotes de placas: lote 2018 e lote 2019. Inicialmente, pode-se observar que apesar da heterogeneidade das placas desmanteladas, os resultados obtidos para os diferentes tipos de materiais são semelhantes, e os níveis de perdas são muito reduzidos, não excedendo 1% em ambos os casos. Os percentuais obtidos (m/m) para os principais materiais separados no desmantelamento, em ordem decrescente, foram: 40,8% e 41,8% de placas desmontadas; 23,6% e 26,3% de plásticos; 7,5% e 12,3% de carcaças metálicas; e 7,3% e 9,0% de pinos conectores metálicos. As pequenas diferenças percentuais observadas entre os dois lotes deve-se ao desmantelamento de PCI de modelos, tamanhos e marcas distintos.

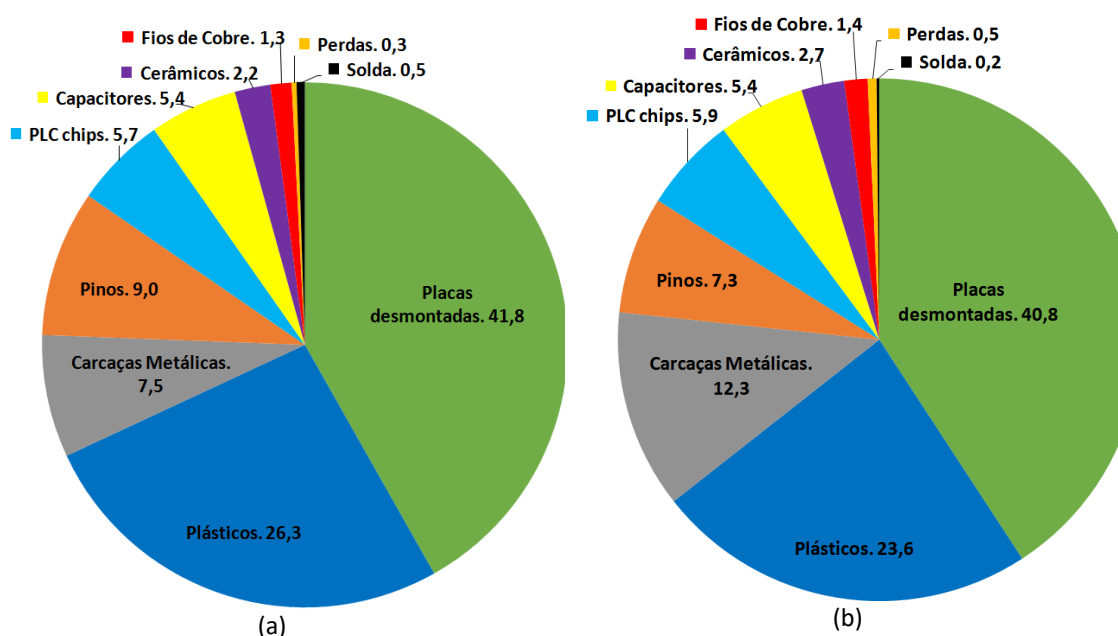


Figura 3.1.1. Distribuição percentual relativa (%m/m) dos diferentes tipos de materiais separados no desmantelamento manual dos dois lotes de placas: Lote 2018 (a) e Lote 2019 (b).

A Figura 3.1.2 apresenta fotografias dos diferentes tipos de materiais separados no desmantelamento e armazenados em recipientes plásticos. As placas desmontadas (3.1.2a), tipo de material com a maior massa dentre os demais, são principalmente compostas por resinas poliméricas, fibras de vidro, circuitos de cobre e metais residuais (Marques *et al.*, 2013). Tal material é normalmente moído e processado visando a recuperação de cobre, como bem descrito na literatura. Os plásticos (3.1.2b), que representam o segundo tipo de material presente, serão analisados quimicamente visando à identificação de alternativas para a sua reciclagem. As carcaças metálicas (3.1.2c), ou invólucros de alguns componentes ou dissipadores de calor, ambos compostos por diferentes tipos de aço ou ligas de menor valor

comercial, podem ser diretamente recicladas por terceiros. Com relação aos pinos metálicos (3.1.2d), de diferentes formas e dimensões, estes serão melhor analisados em seguida.

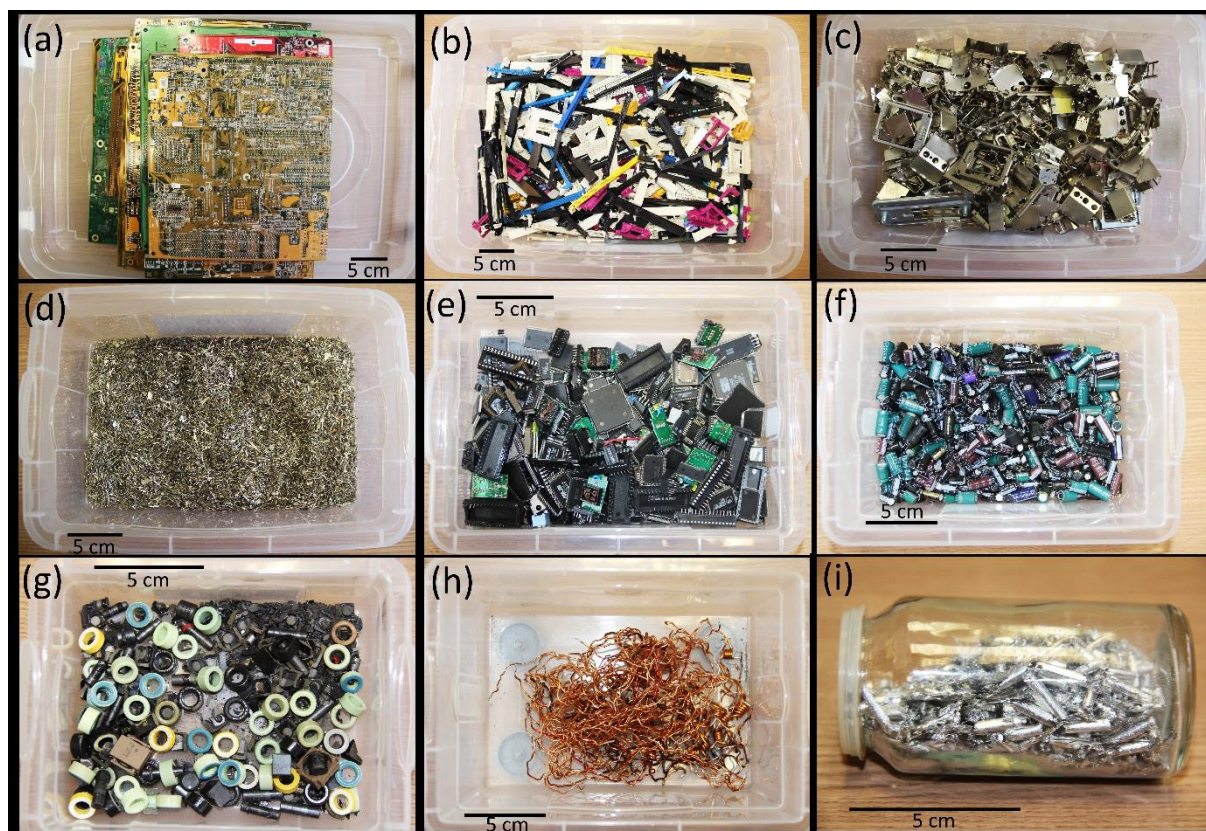


Figura 3.1.2. Fotografias dos diferentes tipos de materiais separados no desmontelamento manual de lote (2019) de PCI.

Com relação aos demais materiais separados no desmontelamento, alguns podem ser testados e reutilizados como, por exemplo, PLC chips (3.1.2e) e capacitores (3.1.2f), os quais não foram danificados durante o desmontelamento. O balanço de massas indicou que 5,7% e 5,9% de PLC chips e 5,4% e 5,4% de capacitores foram separados (Fig. 3.1.1). Os materiais cerâmicos (3.1.2g) e fios de cobre (3.1.2h) foram obtidos a partir de indutores toroidais presentes nas placas. O balanço de massas indicou que 2,2% e 2,7% de materiais cerâmicos e 1,3% e 1,4% de fios foram separados (Fig. 3.1.1). Enquanto a reciclagem diretamente de fios de cobre pode ser realizada, alternativas de reciclagem para os cerâmicos serão definidas após a análise química desses materiais. Com menor massa relativa (0,2% e 0,5%, Fig. 3.1.1), a solda residual (Fig. 3.1.2i), formada principalmente por ligas Sn-Pb, também pode ser reciclada por terceiros, tendo em vista o elevado valor comercial do estanho. Uma maior massa de solda residual pode ser recuperada na etapa de desmontelamento se utilizados sugadores de solda nesta operação.

Em resumo, a separação manual dos diversos tipos de materiais presentes em PCI apresentou elevada recuperação (baixo nível de perdas) e eficiência, tendo em vista que os diferentes materiais separados não apresentam contaminações visíveis por outros materiais, facilitando e possivelmente viabilizando a reciclagem destes. No que se refere à quantidade



de pinos separada (73g/kg de PCI e 90g/kg de PCI), o tratamento desse material, com teor de Au e Cu muito superior ao teor médio observado nas amostras tratadas por outros autores, pode apresentar viabilidade técnica e econômica. Por fim, é importante comentar que o desmantelamento manual é uma operação demorada, mas que pode ser otimizada dependendo da experiência do operador e número de operadores envolvidos na atividade. Estudos têm comprovado que o design de produtos visando o desmantelamento diminui o tempo e o esforço necessário para separação dos componentes presentes (Diener e Tillman, 2015; Krystofik et al., 2015). Foi também discutido que quando há necessidade de desmontar diversos tipos de dispositivos com características diferentes entre si, a força de trabalho humana apresenta melhores resultados comparativamente ao obtido por processos mecânicos. A habilidade manual possibilita pequenas adaptações nos processos de forma a adequar-se a tarefa a ser realizada (Soh et al., 2016; Vanegas et al., 2018).

### 3.2. Análise química dos pinos conectores

Após a etapa de desmantelamento, os pinos conectores separados foram misturados, homogeneizados e, então, quarteados. Na etapa de quarteamento, uma perda de massa da ordem de 0,07% (lote 2018) e 0,05% (lote 2019) foi determinada. Com relação à massa de pinos presente em cada sub-amostra obtida, desvio padrão de cerca de 5% foi calculado para ambos os lotes, indicando que a amostragem foi bem realizada e deve apresentar uma distribuição homogênea em termos dos diferentes tipos de pinos.

Os resultados das análises químicas via ICP-OES dos lotes de pinos separados neste trabalho são apresentados na Tabela 3.2.1. Para fins comparativos, a composição química média reportada por Mesquita *et al.* (2018) para amostra de pinos conectores separados de onze tipos de componentes eletrônicos de PCI foi utilizada como referência. Observa-se que, de forma geral, os resultados obtidos foram próximos aos constatados na referência, em especial ao se considerar os valores de desvio padrão calculados. Um resultado interessante observado foi uma diminuição do teor de cobre nas amostras analisadas neste estudo, em relação à referência, e aumento do teor de zinco, o que pode ser explicado pela presença de uma maior quantidade de pinos tipo Cu-Zn presentes nas amostras preparadas no presente trabalho. Com relação aos demais metais, concentrações semelhantes foram obtidas, exceto para o metal Ag.

**Tabela 3.2.1. Composição química dos lotes de pinos conectores desmantelados manualmente.**

Lote	Cu %m/m	Zn %m/m	Sn %m/m	Pb %m/m	Ni %m/m	Au g/t	Ag g/t	Pd g/t	Fe g/t
Mesquita <i>et al.</i> (2018)	73 (±6)	22 (±2)	4,6 (±0,8)	1,5 (±0,3)	1,1 (±0,2)	168 (±17)	17 (±4)	90 (±7)	103 (±10)
2018	68 (±2)	27 (±2)	4,8 (±0,9)	1,2 (±0,4)	0,9 (±0,1)	128 (±45)	119 (±80)	113 (±32)	174 (±38)
2019	66 (±2)	25 (±1)	6,2 (±0,4)	1,4 (±0,4)	1,1 (±0,1)	127 (±12)	335 (±43)	79 (±1)	125 (±22)

Para avaliar a relevância do presente trabalho no contexto da recuperação de metais a partir de reservas naturais, pode-se comentar que os teores de cobre, zinco e ouro nos

principais minérios é da ordem de 0,5-3,0% m/m, 4-7% m/m e 1-10g/t, respectivamente (Davenport *et al.*, 2002; Sinclair, 2005; WGC, 2019). Mesmo após as etapas de cominuição, classificação e concentração, o teor de cobre no concentrado industrial (*i.e.* 25-35% m/m) é bastante inferior ao teor reportado para as amostras de pinos (Tab. 3.2.1), enquanto o teor de zinco no concentrado pode ser comparável ao teor dessas amostras. O teor de ouro, por sua vez, determinado para as amostras de pinos é bastante superior ao teor desse metal na natureza, justificando assim o grande interesse e esforço no desenvolvimento de processos para recuperação do metal preciosos e metais de base a partir desse resíduo eletrônico.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados do balanço de massa para o desmantelamento manual das placas de circuito impresso mostram que o processo é uma alternativa estratégica dentre as demais técnicas de separação dos materiais presentes neste resíduo eletrônico, por oferecer matérias primas com elevado teor de pureza para a reciclagem, minimizar a perda de massa (inferior a 1%) e otimizar os gastos energético ao longo de toda a cadeia produtiva de recuperação desses materiais. Dos principais materiais recuperados no desmantelamento manual destacam-se, em termos de massa, os pinos conectores (cerca de 80g/kg). A análise de composição química quantitativa dos pinos revela uma fonte secundária de alta qualidade para a metalurgia extrativa, devido ausência de impurezas não metálicas e os elevados teores constatados (em relação às fontes primárias minerais) de metais de interesse, com destaque: aos metais de base cobre (66-68% m/m) e zinco (25-27% m/m); e os metais preciosos ouro (127-128 g/t) e prata (119-335 g/t). No contexto de economias circulares e da decrescente qualidade das reservas minerais ao redor do mundo, é justificado o interesse no desenvolvimento de tratamentos capazes de recuperar os elementos listados acima de forma eficiente e, neste sentido, rotas hidrometalúrgicas e tecnologias para o processamento dos pinos conectores estão sendo avaliadas na UFMG.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Análises Químicas - LAQ/DEMET/UFMG, pelo suporte técnico e análises realizadas, e às agências CAPES/PROEX, CNPq (427051/2016-9) e FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

#### 6. REFERÊNCIAS

##### 6.1. Artigos em Periódicos:

- A.TUNCUK, V.STAZI, A.AKCIL, E.Y.YAZICI, H.DEVECI. 2012. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering* .25-1, p 28-37
- BALDÉ, C.P., FORTI V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P.: The Global E-waste Monitor – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.
- DIENER, DEREK & TILLMAN, ANNE-MARIE. 2015. Component end-of-life management: Exploring opportunities and related benefits of remanufacturing and functional recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 102. 80-93. 10.1016/j.resconrec.2015.06.006.
- GHOSH, B., GHOSH, M.K., PARHI, P., MUKHERJEE, P.S., MISHRA, B.K., 2015. Waste printed circuit boards recycling: an extensive assessment of current status. *Journal of Cleaner Production* 94, p. 5-9.

JADHAV, U. AND HOCHENG, 2015 H. Hydrometallurgical Recovery of Metals from Large Printed Circuit Board Pieces. *Sci. Rep.* **5**, 14574;

JIANG, P., HARNEY, M., SONG, Y., CHEN, B., CHEN, Q., CHEN, T., LAZARUS, G., DUBOIS, L., KORZENSKI, M., 2012. Improving the end-of-life for electronic materials via sustainable recycling methods. *Procedia Environmental Sciences* **16**, p. 485-490.

JIRANG CUI AND LIFENG ZHANG, 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. *Journal of hazardous materials.* **158** 2-3.p. 228-56;

KAYA, M., 2016. A review of the recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management*, Volume **57**, 2016, p. 64-90.

MARK KRSTOFIKA, JEFFREY WAGNER, GABRIELLE GAUSTAD. 2015. Leveraging intellectual property rights to encourage green product design and remanufacturing for sustainable waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, **97**, p 44-54.

MARQUES, A.C., MARRERO, J.M.C., MALFATTI, C.F. A review of the recycling of non-metallic fractions of printed circuit boards. *SpringerPlus*, **2**:521, 2013.

MESQUITA, R.A., SILVA, R.A.F., MAJUSTE, D. Chemical mapping and analysis of electronic components from waste PCB with focus on metal recovery. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. **120**, p. 107-117, 2018.

Roderick J. Sinclair. *The Extractive Metallurgy of Zinc*. 2005

SL SOH, S K ONG, A Y C NEE, (2016) "Design for assembly and disassembly for remanufacturing", *Assembly Automation*, Vol. **36** Issue: 1, pp.12-24.

TESFAYE, F., LINDBERG, D., HAMUYUNI, J., TASKINEN, P., HUPA, L., 2017. Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste. *Minerals Engineering* **111**, p. 209-221.

VANEGAS, PAUL & PEETERS, JEF & CATTRYSSE, DIRK & TECCHIO, PAOLO & ARDENTE, FULVIO & MATHIEUX, FABRICE & DEWULF, WIM & DUFLOU, JOOST. (2017). Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. *Resources, Conservation and Recycling*. **135**. 10.1016/

W.G. DAVENPORT, M. KING, A.K. BISWAS. *Extractive Metallurgy of Copper*. 2002

WGC – World Gold Council [<https://www.gold.org/>].