



## RECUPERAÇÃO DE OURO VIA PROCESSAMENTO HIDROMETALÚRGICO DE PINOS DE PROCESSADORES OBSOLETOS

GONTIJO, T.B.Z.<sup>1</sup>; TIRONI, F. A.<sup>1</sup>; MAJUSTE, D<sup>1,2</sup>; CIMINELLI, V.S.T.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. e-mail: tassio08@ufmg.br

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

### RESUMO

Este artigo descreve a recuperação de ouro (99% de pureza) de pinos conectores de CPU obsoletos. A abordagem experimental consistiu na lixiviação sulfúrica dos pinos, seguida por etapas de lixiviação clorídrica visando sempre à dissolução dos metais, exceto a do Au. Os substratos, identificados por MEV-EDS, são formados por liga de Cu, Fe-Ni ou Fe-Ni-Co. Camadas finas de Au recobrindo camada de Ni (substrato de Cu) e camada de Co (substratos Fe-Ni ou Fe-Ni-Co) foram observadas. De acordo com análises via ICP-OES, a amostra preparada por mistura de pinos de diferentes é composta principalmente por Cu (43,1% m/m), Fe (26,1% m/m) e Ni (20,0% m/m). Concentrações satisfatórias de Co (4,6% m/m) e Au (1,4% m/m) foram determinadas. Amostras de pinos foram lixiviadas em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O em dois estágios para produzindo resíduo sólido rico em Au e licor contendo 5-6 g/L de Cu. Cerca de 65-75% do Cu inicial foi lixiviado. Após essa etapa, os resíduos foram lixiviados no sistema HCl-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O em mais dois estágios. Em seguida, lavados com solução de HCl e caracterizados. A recuperação global de Au, como partículas finas ou principalmente como folhas, foi de (98 ± 2)% sendo a pureza de aproximadamente (99,2 ± 0,8)%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos Eletrônicos, Processadores, Lixiviação, Ouro.

### ABSTRACT

This article describes the recovery of high purity gold (99%) from obsolete CPU connector pins. The experimental approach consisted of sulfuric leaching of the pins, followed by stages of hydrochloric leaching, always aiming at the dissolution of metals, except Au. The substrates, identified by MEV-EDS, are formed by Cu, Fe-Ni or Fe-Ni-Co alloy. Fine layers of Au coating Ni layer (Cu substrate) and Co layer (Fe-Ni or Fe-Ni-Co substrates) were observed. According to ICP-OES analysis, the sample prepared by mixing different pins is composed mainly of Cu (43.1% w/w), Fe (26.1% w/w) and Ni (20.0% w/w). Satisfactory concentrations of Co (4.6% w/w) and Au (1.4% w/w) were determined. Pin samples were leached in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O in two stages to produce Au-rich solid residue and liquor containing 5-6 g/L of Cu. About 65-75% of the initial Cu was leached. After this step, the residues were leached in the HCl-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system in two more stages. Then washed with HCl solution and characterized. The overall recovery of Au, as fine particles or mainly as sheets, was (98 ± 2)% with the purity being approximately (99.2 ± 0.8)%.

**KEYWORDS:** Electronic waste, Processor, Leaching, Gold

## 1. INTRODUÇÃO

Os minérios explorados, a cada dia, estão apresentando menor concentração de metais de base e preciosos, além de mineralogias complexas. A recuperação e reciclagem de metais a partir de fontes secundárias estão sendo cada vez mais necessários. Nesse contexto, resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) podem ser uma fonte chave, devido ao alto conteúdo de metais. A Universidade das Nações Unidas (UNU) estimou que a quantidade global de REEE gerada em 2016 foi de cerca de 44,7 milhões de toneladas. Espera-se que este montante cresça cerca de 3-4% anualmente. Segundo a pesquisa, apenas cerca de 20% da quantidade global de REEE gerada é coletada e reciclada adequadamente (Baldé *et al.*, 2017).

Aproximadamente 8,7% da quantidade total de REEE gerada em 2016 corresponde a pequenos equipamentos de Tecnologia da Informação, como desktops, laptops, tablets, telefones celulares, entre outros (Baldé *et al.*, 2017). Nesses equipamentos estão presente placas de circuito impresso (PCI), onde diversos componentes eletrônicos estão interligados e montados para formar um sistema funcional e operacional. PCI de desktops contêm cerca de 30-50% m/m de metais, sendo Cu o elemento majoritário, mas também apresenta metais valiosos, como Ni, Au e Ag, além de metais tóxicos, como o Pb (Tuncuk *et al.*, 2012; Yamane *et al.*, 2011; Cui e Zhang, 2008). O conteúdo metálico de resíduos de PCI tem atraído grande atenção mundial, de tal forma que rotas de processamento hidrometalúrgicas têm sido testadas com foco, principalmente, na recuperação de Cu e Au.

Poucos trabalhos relatam o tratamento de componentes eletrônicos separados de PCI. Os processadores (CPU) contêm quantidades apreciáveis de Cu, Ni e Au em seus pinos conectores. A lixiviação direta dos pinos, sem moagem, pode aumentar a recuperação de metais (principalmente a de metais preciosos), além de reduzir custos operacionais. Alzate *et al.* (2016) relataram o seguinte conteúdo químico de CPU montados (isto é, sem a separação dos pinos conectores das bases) após digestão com água régia e análise por espectroscopia de emissão atômica por plasma induzido por microondas: 86 g/kg Fe; 73,6 g/kg Ni; 26,7 g/kg Cu; 1,1 g/kg Au e <0,001 g/kg Ag. Bidini *et al.* (2015) relataram a composição de CPU montados após digestão com água régia e análise por espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado: 153,5 g/kg Cu; 22,2 g/kg Ni; 12,5 g/kg Sn; 5,5 g/kg Al; 2,5 g/kg Pb; 2,2 g/kg Au; 2,1 g/kg Ag e 1,0 g/kg Sb. Birloaga *et al.* (2013) avaliaram o conteúdo de CPU montadas e pinos separados por espectrometria de fluorescência de raios X (m/m): 35,0% de Au; 26,8% de Fe; 24,6% Ni; 0,1% Al; 0,07% Pb; 0,06% Cu e 0,05% Sn (para os pinos); e 34,1% de Al; 8,6% de Fe; 7,8% Cu; 3,1% Sn; 1,5% de Pb; 0,9% Ni; 0,7% de Zn; 0,4% Ag e 0,2% Au (para as CPUs).

Vale destacar que uma tecnologia para recuperar metais preciosos e de base a partir de CPU de resíduos ainda precisa ser desenvolvida, e sua viabilidade técnica e econômica depende fortemente de sua quantidade na matéria-prima a ser tratada. O objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de lixiviação de metais básicos contidos em pinos de conexão removidos manualmente da CPU, para a obtenção de ouro na forma metálica. Ácido sulfúrico e clorídrico foram selecionados como reagentes principais devido às suas capacidades de lixiviar seletivamente Cu, Fe, Ni e Co em relação ao Au, custo relativamente baixo e grande disponibilidade no Brasil. Os resultados desta investigação podem contribuir para o desenvolvimento de uma tecnologia sustentável para a reciclagem de ouro e metais básicos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Preparação das Amostras

O presente estudo utilizou-se de 152 CPU provenientes de computadores obsoletos diversos. Os componentes fornecidos pelo setor de tecnologia da informação da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Os pinos conectores presentes na base dos CPU foram removidos utilizando soprador térmico (Steinel, HL500) e cinzel. A fração metálica de pinos obtida foi separada, agrupada e pesada em balança analítica (Mettler AE200). Após a pesagem, os pinos foram homogeneizados e quarteados obtendo frações de amostra contendo aproximadamente 5 g (Quantachrome, SRR5). As bases compostas por fibra de vidro ou cerâmica foram reservadas para projetos futuros.

### 2.2. Caracterização das Amostras

A análise qualitativa e morfológica dos pinos conectores foi realizada utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS) (Quanta FEG 3D FEI). Para tanto, os pinos foram embutidos em resina epóxi (Struers, Epofix), a peça foi polida a úmido utilizando-se pasta de diamante (1  $\mu\text{m}$ ), lavada com água deionizada (Millipore, Milli-Q) e secada a temperatura ambiente. Foram realizadas imagens de elétrons retroespalhados e mapeamentos químicos.

Para a realização da análise quantitativa, foi adotada a metodologia proposta em [Mesquita \*et al.\* \(2018\)](#), onde a dissolução total dos pinos conectores é alcançada. Dessa forma, 0,5 g de pinos foram pesados em quadruplicata em balança analítica (Mettler AE200). A massa foi transferida para um tubo e colocado em bloco digestor (Tecnal, TE-040/25) juntamente com 3 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e 1 mL de ácido clorídrico (HCl) 37% (Química Moderna Gold). A temperatura do processo foi mantida constante a  $55 \pm 5$  °C, após 10 minutos de digestão é adicionado 3 mL de HCl ao tubo. Por mais duas vezes são adicionados 3 mL e 1 mL de HCl após transcorridos 10 minutos de cada adição. A solução obtida foi transferida para tubo Falcon, diluída com água deionizada (Millipore, Milli-Q) até 25 mL e analisadas via Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES). Para a quantificação foram considerados os elementos identificados via MEV.

### 2.3. Lixiviação dos Pinos Conectores

Os ensaios foram conduzidos em reator de vidro com capacidade de 500 mL (Pyrex) e chapa aquecedora (IKA RET basic) para controle de temperatura. Adotou-se como agente lixiviante ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 96% (Química Moderna Gold) ou ácido clorídrico (HCl) 33% (Química Moderna Gold) de acordo com a etapa conduzida e como agente oxidante peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 30% v/v (Vetec). A temperatura adotada foi de 25 °C, os testes foram realizados em duplicatas e em dois estágios de lixiviação em cada sistema. O sólido residual de cada estágio foi lavado abundantemente com água deionizada (Millipore, Milli-Q), secado em temperatura ambiente e armazenados em vácuo, enquanto o licor foi filtrado por membrana de celulose e ésteres (47 mm diâmetro, 0,1 mm tamanho de poro—Millipore). Sólidos e licores de cada estágio foram analisados por ICP-OES conforme os procedimentos descritos anteriormente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Caracterização das amostras

Conforme os dados apresentados em [Gontijo et al. \(2017\)](#), mapas químicos realizados via MEV-EDS para os pinos conectores apresentaram substratos compostos principalmente por Cu, liga Fe-Ni ou liga Fe-Ni-Co. Todos esses elementos foram detectados com alta intensidade relativa e baixos níveis de ruído de fundo. Elementos como Sn e Zn também foram detectados nos substratos, mas com altos níveis de ruído de fundo. [Gontijo et al. \(2017\)](#) descreveu ainda um fino revestimento de Au (espessura <10 µm) sobre uma camada de Ni que recobre pinos com substrato de Cu. Camadas finas de Au (espessura < 20 µm) também foram identificadas recobrando uma camada de Ni-Co em pinos de substrato Fe-Ni ou Fe-Ni-Co. A análise MEV-EDS também indicou diferentes tipos de ligas de solda, de acordo com o substrato utilizado. Para os substratos constituídos por Cu, a liga de solda Sn-Pb foi detectada. Para os substratos de ligas Fe-Ni ou Fe-Ni-Co, os elementos Cu e Ag foram utilizados. O mapeamento químico detalhado das soldas está descrito em [Gontijo et al. \(2017\)](#).

A análise química quantitativa obtida via ICP-OES está apresentada na Tabela 1. Os metais mais abundantes são: Cu (43,1% m/m), Fe (26,1% m/m), Ni (20,0% m/m) e Co (4,6% m/m). Quantidades significativas de Au (14 g/kg) também foram detectadas, além de quantidades relativamente baixas de Ag (2 g/kg). Sn e Zn foram detectados compondo cerca de 1,4% m/m e 0,8% m/m respectivamente. Esses elementos provavelmente encontram-se dispersos nos substratos. Sn ainda pode ser encontrado nas ligas de solda empregadas. Cerca de 2,3% m/m de Pb presente nas amostras atribuem toxicidade a esse resíduo.

**Tabela 1 - Composição química (g/kg) de pinos de CPU**

Cu	Zn	Sn	Pb	Ni	Au	Ag	Co	Fe
431,1 ± 66,5	8,4 ± 0,1	14,0 ± 3,1	22,6 ± 0,2	200,6 ± 11,8	14,2 ± 0,9	1,5 ± 0,3	46,4 ± 8,4	261,0 ± 9,7

É importante ressaltar que o conteúdo químico de CPU relatado por [Alzate et al. \(2016\)](#), [Bidini et al. \(2015\)](#) e [Birloaga et al. \(2013\)](#) diferem-se muito entre si e dos resultados obtidos no trabalho atual. As divergências entre os trabalhos de [Alzate et al. \(2016\)](#) e [Bidini et al. \(2015\)](#) com o atual, podem ser atribuídas ao tipo de amostra caracterizada, em que os trabalhos anteriores analisaram CPU sem prévia remoção dos pinos de conexão das bases, além de analisar somente amostras de um único tipo. Por outro lado, os valores aqui reportados quando são comparados aos encontrados por [Birloaga et al. \(2013\)](#), as discrepâncias são ainda maiores entre os resultados. O teor de Au determinado por [Birloaga et al. \(2013\)](#) é cerca de 25x maior que o valor reportado na Tab. 1. As divergências podem ser explicadas pela técnica de análise escolhida, já que o trabalho anterior optou pelo uso de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), uma técnica semiquantitativa.

#### 3.2. Efeito das Variáveis de Operação – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1ª Etapa)

O efeito da concentração de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e relação S/L para a lixiviação dos metais presentes nos pinos foram sistematicamente avaliados, de forma a produzir licor rico em Cu e sólido concentrado em Au. Os valores de tempo de reação (15 min), temperatura (25 °C) e agitação (400 rpm), assim como os níveis dos parâmetros testados (1,0 mol/L e 2,0 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 5,0% v/v e 6,7% v/v H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 15 g/L, 25 g/L e 35 g/L

razão S/L) foram determinados de acordo com os resultados de [Gontijo e Majuste \(2019\)](#). Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que a maior lixiviação de Cu foi alcançada nas condições de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1,0 mol/L contendo 6,7% v/v de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e relação S/L 25 g/L, obtendo licor com cerca de 8,2 g/L de Cu. Na razão S/L de 35 g/L, a maior concentração de Cu (cerca de 9,6 g/L) foi alcançada, enquanto apenas cerca de 0,3 g/L de Fe foi obtido, portanto essa condição foi selecionada como a mais promissora. Para uma lixiviação global em torno de (40 ± 2)%, o seguinte conteúdo metálico (m/m) analisado por ICP-OES para o sólido residual foi determinado: (37,0 ± 0,9)% Fe; (27,2 ± 0,8)% Ni; (20,9 ± 1,8)% Cu; (6,7 ± 0,1)% Co; (3,3 ± 0,4)% Pb; (2,1 ± 0,3)% Au; (2,0 ± 0,1)% Sn; (0,1 ± 0,1)% Ag; e (0,7 ± 0,3)% de Zn.

Ainda de acordo com a tabela 2, nenhuma alteração significativa na lixiviação de Cu em função da concentração de ácido e da relação S/L foi observada, mas uma dependência forte com a concentração de oxidante foi identificada. Um provável efeito da concentração de ácido na lixiviação de Fe, Ni, Sn, Co e Ag foi detectado, além de um possível efeito da concentração de oxidantes na lixiviação de Pb. De maneira geral, o Pb apresentou baixos percentuais de lixiviação em todos os sistemas, enquanto a Ag atingiu a dissolução total em sistemas contendo 2,0 mol/L de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (em razões S/L de 25 g/L e 35 g/L). Em nenhuma condição testada foi detectado a presença de Au no licor.

**Tabela 2 - Percentual de lixiviação dos metais: avaliação do efeito de concentração de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e relação S/L em ensaios realizados durante 15 min, 25 °C e 400 rpm.**

[H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ] (mol/L)	[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] (% v/v)	Relação S/L (g/L)	Percentual de Lixiviação (%)			
			Co	Cu	Fe	Ni
1	5,0	15	3 ± 3	61 ± 1	4 ± 1	9 ± 1
		25	3 ± 1	55 ± 4	4 ± 6	8 ± 1
		35	18 ± 2	52 ± 1	16 ± 1	17 ± 1
	6,7	15	1 ± 1	68 ± 2	3 ± 1	8 ± 1
		25	3 ± 1	76 ± 7	5 ± 1	9 ± 1
		35	1 ± 1	64 ± 3	3 ± 1	7 ± 1
2	5,0	15	16 ± 3	56 ± 1	14 ± 2	15 ± 2
		25	22 ± 13	65 ± 1	20 ± 11	19 ± 8
		35	40 ± 3	52 ± 4	33 ± 4	29 ± 3
	6,7	15	13 ± 2	62 ± 4	12 ± 1	13 ± 1
		25	35 ± 7	74 ± 4	32 ± 6	29 ± 4
		35	39 ± 2	64 ± 1	32 ± 1	30 ± 1

### 3.3. Efeito das Variáveis de Operação – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (2ª Etapa)

Na segunda etapa, o efeito da concentração de ácido, concentração de oxidante e taxa de agitação foram avaliados sistematicamente para a dissolução do cobre remanescente da primeira etapa. Assim como na etapa anterior, foram fixados o tempo (15 min) e de acordo com resultados de [Gontijo e Majuste \(2019\)](#) e relação S/L (35 g/L) de acordo com o resultado mais promissor da 1ª etapa. Os níveis dos parâmetros avaliados na 2ª etapa (*i.e.*, 0,5 mol/L e 1,0 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 3,3% v/v e 6,7% v/v H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 400 rpm e 800 rpm de taxa agitação) foram selecionados na tentativa de melhorar a difusão de reagentes através do núcleo cilíndrico dos pinos. Os resultados descritos na Tabela 3 apresentam que a máxima lixiviação de Cu foi encontrada usando solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1,0 mol/L contendo 6,7% v/v de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 800 rpm, o que corresponde a um licor contendo cerca de 1,6 g/L de Cu, sendo essa a condição determinada como a mais promissora. Para essa etapa baixos percentuais de lixiviação de Cu e Zn (até cerca de 25% e 28%, respectivamente) foram observados. Novamente, os percentuais de lixiviação de Pb não foram significativos (abaixo de 0,5%) e a lixiviação total da Ag (100%) foi alcançada para a maioria dos sistemas testados. Nenhuma

mudança significativa da 1ª etapa para a 2ª etapa na lixiviação de Fe, Ni, Sn e Co foi identificada. A lixiviação global do segundo estágio foi de cerca de  $(8 \pm 1)\%$  o que pode ser considerado um processo ineficaz, provavelmente atribuído à geometria complexa dos pinos lixiviados. O seguinte teor médio metálico (m/m) analisado por ICP-OES para o sólido residual foi determinado:  $(38,4 \pm 1,8)\%$  Fe;  $(28,3 \pm 1,5)\%$  Ni;  $(18,0 \pm 4,8)\%$  Cu;  $(6,9 \pm 1,8)\%$  Co;  $(3,5 \pm 0,7)\%$  Pb;  $(2,2 \pm 0,7)\%$  Au;  $(2,0 \pm 0,1)\%$  Sn; e  $(0,7 \pm 0,4)\%$  de Zn.

Considerando os dois estágios de lixiviação em  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$  sob as condições promissoras determinadas, cerca de 71% do Cu total foi lixiviado. O licor misto produzido continha cerca de 5,5 g/L de Cu, 350 mg/L de Fe e <250 mg/L de outros metais. O tratamento deste licor com foco em (i) recuperação de cobre por cementação com pó de ferro e (ii) recuperação de sulfato de cobre hidratado via cristalização estão atualmente sendo avaliados.

**Tabela 3 - Percentual de lixiviação dos metais: avaliação do efeito de concentração de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e agitação em ensaios realizados durante 15 min, 25 °C e relação sólido-líquido de 35 g/L.**

[ $\text{H}_2\text{SO}_4$ ] (mol/L)	[ $\text{H}_2\text{O}_2$ ] (% v/v)	Agitação (rpm)	Percentual de Lixiviação (%)			
			Co	Cu	Fe	Ni
0,5	3,3	400	$2 \pm 1$	$9 \pm 1$	$2 \pm 1$	$1 \pm 1$
		800	$2 \pm 1$	$14 \pm 1$	$2 \pm 1$	$2 \pm 1$
	6,7	400	$1 \pm 1$	$12 \pm 1$	$1 \pm 1$	$1 \pm 1$
		800	$1 \pm 1$	$14 \pm 2$	$1 \pm 1$	$1 \pm 1$
1,0	3,3	400	$3 \pm 2$	$17 \pm 5$	$3 \pm 2$	$2 \pm 1$
		800	$19 \pm 2$	$7 \pm 2$	$14 \pm 3$	$11 \pm 2$
	6,7	400	$2 \pm 1$	$16 \pm 2$	$2 \pm 1$	$2 \pm 1$
		800	$3 \pm 1$	$19 \pm 3$	$3 \pm 1$	$2 \pm 1$

### 3.4. Efeito das Variáveis de Operação – HCl/ $\text{H}_2\text{O}_2$ (1ª e 2ª Etapa)

Com o intuito de dissolver metais remanescentes na fase sólida (principalmente Fe e Ni) e elevar ainda mais o teor de Au no sólido, foram avaliados etapas de lixiviação em meios HCl- $\text{H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ . Apenas o efeito da concentração de oxidante (0,3% v/v, 1,0% v/v, 3,3% v/v e 6,7% v/v) foi investigado. O tempo de lixiviação foi fixado em 45 min, relação S/L de 12 g/L, temperatura de  $(25 \pm 0,1)$  °C e taxa de agitação de 200 rpm (Liu *et al.*, 2009). A Tabela 4 revela que quantidades significativas de Au foram lixiviadas em soluções contendo 3,3% v/v e 6,7% v/v  $\text{H}_2\text{O}_2$ , provavelmente devido a formação de espécies solúveis de  $\text{AuCl}_4^-$ . Os metais Fe, Ni e Co apresentaram elevados percentuais de dissolução em condições oxidantes elevadas (Tab. 4), sendo que possivelmente existe uma relação entre eles devido as suas ligações nos substratos à base de Fe-Ni e Fe-Ni-Co. A solução contendo 1,0% v/v  $\text{H}_2\text{O}_2$  foi selecionada como a mais promissora, uma vez que ocorre baixa dissolução de Au (1%) e elevada lixiviação de outros metais (cerca de 87% Fe, 85% Co, 76% Ni, 75% Sn, 71% Pb). Uma segunda etapa de lixiviação aplicando as condições promissoras anteriormente definidas foi realizada. Nessas condições, 100% de Fe, 100% de Co,  $(61 \pm 15)\%$  de Ni contidos no resíduo foram dissolvidos. Análises mais detalhadas podem ser encontradas em Gontijo e Majuste (2019).

Considerando as duas etapas de lixiviação em meio clorídrico nas condições promissoras, a lixiviação de Fe, Co e Ni em torno de 100%, 100% e 90%, respectivamente, e perdas de ouro de até 4% foram alcançadas. O licor misto produzido nos dois estágios de lixiviação no meio HCl- $\text{H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$  apresentou cerca de 3 g/L de Fe, 2 g/L de Ni, 0,6 g/L de Co e 6 mg/L de Au. Ainda é esperado a presença de elementos no resíduo sólido (principalmente óxidos e cloretos metálicos) devido à remoção incompleta do licor durante a filtração.

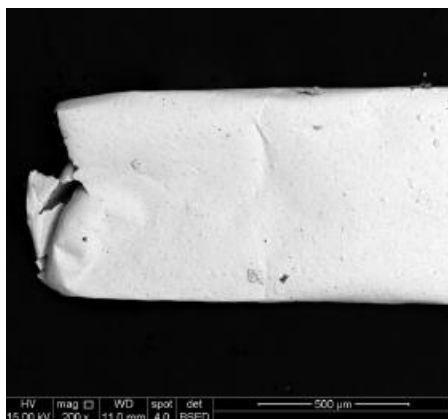


**Tabela 4 - Percentual de lixiviação dos metais: avaliação do efeito da concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> na solução clorídrica (2 mol/L). Ensaios realizados durante 45 min a 25 °C, relação S/L de 12 g/L e agitação de 200 rpm.**

[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] (% v/v)	Percentual de Lixiviação (%)				
	Au	Co	Cu	Fe	Ni
6,7	15 ± 9	100 ± 1	15 ± 4	100 ± 1	100 ± 1
3,3	18 ± 1	100 ± 3	12 ± 1	100 ± 1	93 ± 6
1,0	1 ± 1	85 ± 9	17 ± 3	87 ± 7	76 ± 11
0,3	<0,1	34 ± 6	2 ± 1	28 ± 4	23 ± 2

### 3.5. Recuperação de Ouro e Caracterização

A fase sólida final obtida após os estágios de lixiviação sob condições promissoras foi lavada com solução de HCl a 2,0 mol/L por 120 min a 25 °C. Esta etapa foi realizada para dissolver óxidos metálicos e cloretos metálicos remanescentes de separação sólido-líquido incompleta durante as filtrações. A Figura 1 mostra micrografia via MEV deste material após as etapas de lixiviação. É possível observar os revestimentos de Au dos pinos, enquanto os substratos foram dissolvidos, como desejado. Os finos revestimentos (<10 µm) foram deformados ou fragmentados devido à colisão com o rotor em rotação. A análise por ICP-OES do produto final obtido revelou a seguinte composição (m/m): (99,2 ± 0,8)% Au; (0,3 ± 0,1)% Cu; (0,3 ± 0,1)% Fe; (0,2 ± 0,1)% Ni; e níveis muito baixos para os outros metais (<0,001%).



**Figura 1 - Micrografia final da camada de Au**

## 4. CONCLUSÕES

A lixiviação sulfúrica de pinos conectores, removidos manualmente de CPU, apresentou-se promissora para a recuperação de ouro. O mapeamento químico via MEV-EDS dos pinos indicou: substratos constituídos por Cu, liga Fe-Ni ou liga Fe-Ni-Co. Revestimento fino de Au em camada de Ni (pinos de Cu), ou Au sobreposto a Co (pinos de Fe-Ni ou Fe-Ni-Co) também foram observados. Análise via ICP-OES revelou que a amostra preparada pela mistura de pinos é composta por: Cu (43,1% m/m), Fe (26,1% m/m), Ni (20,0% m/m), Co (4,6% m/m) e Au (1,4% m/m).

Inicialmente, os pinos foram lixiviados em sistema H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O em duas etapas a 25 °C, sendo a duração de cada de 15 minutos. As lixiviações na melhor condição encontrada (*i.e.*, 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 6,7% v/v H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 35 g/L S/L, e 400 rpm para 1ª etapa e 800 rpm para 2ª etapa) resultaram na dissolução total de 65-75% de Cu. O licor global de sulfatos obtido

continha 5-6 g/L de Cu, 300-400 mg/L de Fe e <250 mg/L de outros metais. As fases sólidas obtidas após lixiviação em meio sulfúrico foram tratadas em sistema clorídrico por dois estágios. Em condições promissoras (isto é, 2 mol/L HCl, 1% v/v H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 12 g/L S/L, 45 min, 200 rpm e 25 ° C), a lixiviação global levou à produção de licor contendo cerca de 3 g/L de Fe, 2 g/L de Ni, 0,6 g/L de Co e 6 mg/L de Au. Nessas condições, a lixiviação total de Fe, Co e Ni foi de cerca de 100%, 100% e 90%, respectivamente, e perdas de até 4% de Au foram alcançadas. O resíduo obtido após as etapas de lixiviação foi lavado com solução de HCl. Análises via ICP-OES indicaram a recuperação de (98 ± 2)% de Au, principalmente como folhas finas, sendo o grau de pureza de (99,2 ± 0,8)%. Nossas descobertas podem contribuir para recuperação de ouro e outros metais valiosos a partir de fontes secundárias de metais.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, CNPQ e FAPEMIG.

## 6. REFERÊNCIAS

- Alzate, A., M. E. López and C. Serna (2016). "Recovery of gold from waste electrical and electronic equipment (WEEE) using ammonium persulfate." *Waste Management* 57: 113-120.
- Baldé, C.P., Forti V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. (2017). "The Global E-waste Monitor – 2017". United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.
- Bidini, G., F. Fantozzi, P. Bartocci, B. D'Alessandro, M. D'Amico, P. Laranci, E. Scozza and M. Zagaroli (2015). "Recovery of precious metals from scrap printed circuit boards through pyrolysis." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 111: 140-147.
- Birloaga, I., I. De Michelis, F. Ferella, M. Buzatu and F. Vegliò (2013). "Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery." *Waste Management* 33(4): 935-941
- Cui, J. and L. Zhang (2008). "Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review." *Journal of Hazardous Materials* 158(2-3): 228-256.
- Gontijo, T.B.Z., Lopes, P.S.F., Caldeira, C.L., Majuste, D., Ciminelli, V.S.T (2017). "Caracterização de processadores de computadores visando a recuperação de ouro, cobre e cobalto". XXVII ENTMMME – Anais de congresso.
- Gontijo, T.B.Z. e Majuste, D. (2019). "Recovery of high purity gold from hydrometallurgical processing of waste central processing units (WCPU)". Submetido para hydrometallurgy journal.
- Liu, R., Shieh, R.S., Yeh, R.Y.L., Lin, C.H. (2009). "The general utilization of scrapped PC board". *Waste Management* 29. 2842-2845.
- Mesquita, R.A.; Silva, R.A.F.; Majuste, D. (2018). "Chemical mapping and analysis of electronic components from computer printed circuit boards". *Process Safety and Environmental Protection*. 120 (10).
- Tuncuk, A., V. Stazi, A. Akcil, E. Y. Yazici and H. Deveci (2012). "Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling." *Minerals Engineering* 25(1): 28-37.
- Yamane, L. H., V. T. de Moraes, D. C. R. Espinosa and J. A. S. Tenório (2011). "Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers." *Waste Management* 31(12): 2553-2555.