

## Recuperação de metais através da reciclagem de placas de circuito impresso oriundas de sucata eletrônica

### RESUMO

**Jonathan Tomazoni Paumann**  
[jonathantomazoni@outlook.com](mailto:jonathantomazoni@outlook.com)  
Escola Estadual Técnica Affonso Wolf,  
Dois Irmãos, Rio Grande do Sul, Brasil

**Kátia Elizangela Ocanha Dorneles**  
[katia.ocanha@hotmail.com](mailto:katia.ocanha@hotmail.com)  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos,  
São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil

**Guilherme Lopes Batista**  
[lopesbatista@unisinis.br](mailto:lopesbatista@unisinis.br)  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos,  
São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil

**Carlos Alberto Mendes Moraes**  
[cmoraes@unisinis.br](mailto:cmoraes@unisinis.br)  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos,  
São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil

As reservas naturais de minérios estão diminuindo gradativamente em todo o planeta. Uma das maneiras de minimizar esse problema é a recuperação de metais contidos em resíduos sólidos industriais ou urbanos, por exemplo, na sucata eletrônica. Por essa razão, o objetivo do trabalho foi recuperar metais de sucata eletrônica, por meio do processamento de Placas de Circuito Impresso. Após a coleta, os resíduos foram separados em três grupos: Aparelhos Celulares, Computadores pessoais e Outros Eletroeletrônicos. Então, realizou-se o processo de desmontagem dos resíduos, visando a retirada das Placas de Circuito Impresso (PCIs). Posteriormente, as PCIs dos resíduos passaram por processos que visaram a obtenção de metais, como processamento mecânico, hidrometalurgia e eletrometalurgia. Mediante lixiviações das amostras, constatou-se que as frações 1 e 3 dos celulares tiveram as maiores massas lixiviadas, 51,2% e 53,4%, respectivamente, enquanto que a fração 1 das amostras de PCs e OEEs tiveram 39% e 37% de massa lixiviada, cada. Por meio dos ensaios de voltametria nas amostras, foi possível determinar que o potencial de redução do cobre, nas amostras, é -0,4V vs Ag/AgCl. Nos ensaios de eletro-obtenção, obteve-se nos cátodos um teor de recuperação de 58,26% de cobre. A dessoldagem das PCIs dos PCs possibilitou a obtenção de 14,84 gramas de cobre, 40 gramas de alumínio, 103 gramas da suposta liga Cu-Zn-Ni e 79 gramas da suposta liga Zn-Fe. Os resultados obtidos demonstraram que a dessoldagem é uma forma eficiente de pré-tratamento das PCIs e que é possível obter o cobre por meio da via eletroquímica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos; Reciclagem de Placas de Circuito Impresso; Recuperação; Metais.

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento demasiado no descarte de resíduo elétrico e eletrônico, trazido a luz do argumento, do estudo, dos debates e da pesquisa, vem gerando muita discussão a respeito de alternativas que possam ser implantadas para reaproveitar toda essa sucata, que acaba sendo levada para aterros e posteriormente contaminando o solo, por meio da liberação de metais tóxicos no meio.

No mundo, estima-se que a geração desses resíduos é de 50 milhões de toneladas, sendo que na maioria dos casos o descarte é feito sem a devida preocupação (UNEP, 2015). Conforme München (2016), em 2014, o continente asiático foi o maior gerador de resíduos eletroeletrônicos do mundo (16 milhões de toneladas), seguido pela Europa (11,6 milhões de toneladas), América do Norte (7,9 milhões de toneladas), América Latina e Caribe (3,8 milhões de toneladas), África (1,9 milhões de toneladas) e Oceania (0,6 milhões de toneladas).

Como de praxe, a grande maioria desses resíduos em fim de vida útil não é reaproveitada, sendo, portanto, os aterros e incineradores seus principais destinos. Desse modo, faz-se necessária a implementação de sistemas de gestão desses resíduos para diminuir o número de casos como os citados anteriormente. Todavia, Kang e Schoenung (2005) colocam que o desenvolvimento de uma estratégia de sucesso requer uma série de fatores, como sustentabilidade econômica, viabilidade técnica, um nível realista de apoio social, inclusão da reciclagem e reaproveitamento dos eletroeletrônicos em fim de vida útil.

A gestão correta dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos em simbiose com a reciclagem adequada desses resíduos pode gerar resultados significativos no âmbito econômico, uma vez que apresentam substâncias de alto valor em sua composição, como o cobre e metais nobres como a prata, ouro e paládio, sendo esse último encontrado em concentrações dez vezes maiores em PCIs (Placas de circuito impresso) do que em minerais comercialmente extraídos (SANTOS, 2012).

Dessa maneira, o artigo aborda o desenvolvimento de uma metodologia de recuperação de metais de placas de circuito impresso provenientes de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos.

## 2 METODOLOGIA

Os resíduos que foram utilizados na pesquisa foram obtidos mediante campanha realizada na Escola Estadual Técnica Affonso Wolf – Dois Irmãos/RS e de doação. Os reagentes químicos ácido clorídrico (37% m/m, Química Moderna), HNO<sub>3</sub> (65% m/m, Química Moderna) que foram utilizados durante todo o trabalho experimental, tinham grau de pureza “para análise”.

Como padrão analítico foi utilizada solução de sulfato de cobre em ácido sulfúrico Copper plater 400 (75g/L sulfato de Cobre em 370g/L de ácido sulfúrico, LPKF Electronics, Alemanha). A vidraria empregada foi de vidro borossilicato.

## 2.1 Pré-tratamento das amostras

Primeiramente, após a coleta dos resíduos, houve a divisão de três grupos de sucata: Aparelhos Celulares (ACs), Computadores Pessoais (PCs) e Outros Eletroeletrônicos (OEEs). Após, os resíduos foram desmontados para a retirada das Placas de Circuito Impresso (PCIs). Os resíduos de polímeros e cerâmicos foram estocados para trabalhos futuros.

Posteriormente, todas as PCIs dos resíduos foram pesadas em balança semi-analítica da Bel Engineering modelo Mark 500, localizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), a fim de realizar a tabulação das massas das placas. Nesta pesquisa, utilizaram-se sete Placas de Circuito Impresso de PCs, quatorze placas de ACs e treze placas de OEEs.

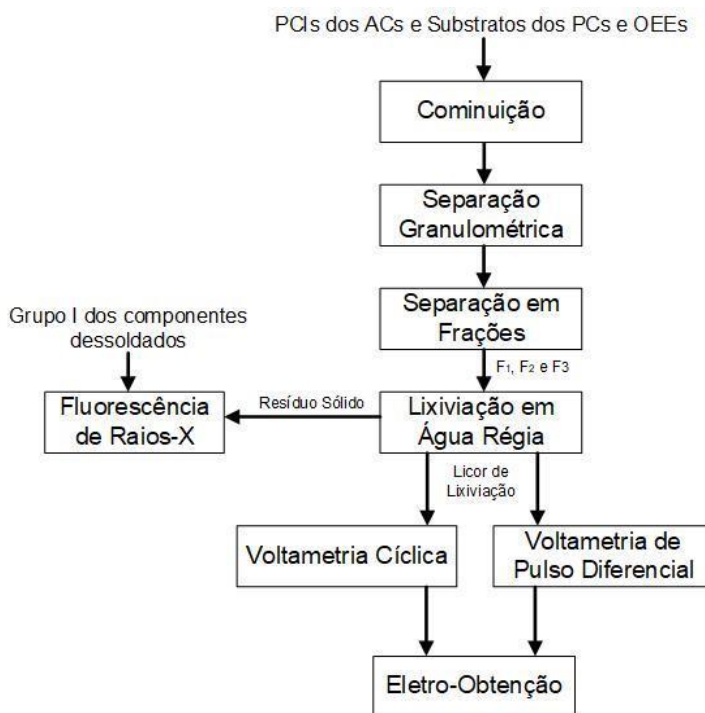
Antes do processamento mecânico, as PCIs dos computadores pessoais e outros eletroeletrônicos passaram por uma etapa de pré-tratamento, na qual os componentes foram removidos das placas por dessoldagem, obtendo assim somente o substrato (placa "lisa"). Para isso, foi utilizado um soprador a ar de uma estação de retrabalho TS-2850D da Toyo, operando a uma temperatura de 500 °C, localizada no LCVMat. A dessoldagem das PCIs dos PCs levou no total 7 horas para ser concluída, enquanto que as dos OEEs precisaram de 2 horas e 10 minutos para serem completamente dessoldadas.

Tanto os componentes quanto os substratos, de ambos os resíduos, foram pesados antes e depois em balança. Os componentes que foram dessoldados das PCIs foram separados em três grupos: (I) Metais, (II) Polímeros e Cerâmicos e (III) Cerâmicos + Cobre.

As PCIs dos PCs necessitaram ainda serem cortadas como mais uma etapa de pré-tratamento, uma vez que não seria possível processá-las posteriormente com seus tamanhos originais. Esse procedimento foi realizado em uma máquina denominada Serra Fita, da Reico/Calfran modelo SFMAC instalada no Laboratório de Maquetaria (LM) da UNISINOS. O corte das placas levou aproximadamente 10 minutos.

As próximas etapas foram igualmente realizadas entre os resíduos, sendo que em nenhuma delas os mesmos foram misturados. A figura 1 resume todas essas etapas que foram realizadas.

Figura 1 – Fluxograma das etapas



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

## 2.2 Moagem

Para que os resíduos pudessem ter uma granulometria necessária para os ensaios de lixiviação, foi de extrema importância a diminuição do seu tamanho. Para tal, foi utilizado um moinho de facas da SEIBT, modelo MGHS270A, localizado no LCVMat. As PCIs dos aparelhos celulares foram trituradas por 10 minutos, as de computadores pessoais por 55 minutos e as dos outros eletroeletrônicos por 25 minutos. Após a moagem, as amostras foram pesadas em balança semi-analítica.

## 2.3 Classificação granulométrica

Após a moagem, as PCIs moídas passaram por uma classificação granulométrica. Esse procedimento foi realizado em um agitador de peneiras da marca Bertel equipado com dois grupos de seis peneiras. O caixilho das peneiras é de INOX 8" x 2" e as aberturas das malhas estão descritas na tabela 1. A análise foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS.

Tabela 1 - Abertura das malhas das peneiras

Abertura (mm)	4,75	3,35	1,70	0,85	0,60	0,425	0,30	0,212	0,15	0,106	0,075	0,053
---------------	------	------	------	------	------	-------	------	-------	------	-------	-------	-------

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Do total de massa obtido no processo de moagem das PCIs, foram utilizadas 120 gramas na classificação granulométrica. Havia dois grupos de peneiras, de seis peneiras em cada. A análise consistiu em colocar 40 gramas do resíduo moído na peneira superior, do grupamento que continha as peneiras de maior abertura, e deixar em agitação por 15 minutos. Transcorridos os 15 minutos, o material classificado foi pesado em balança semi-analítica, e nesse processo foi utilizado um pincel para auxiliar na limpeza das peneiras, que continham material moído preso às malhas.

Após, os resíduos que não ficaram retidos nas malhas foram pesados e transferidos para o outro grupo de peneiras, as quais possuíam as menores aberturas, o conjunto foi agitado por mais 15 minutos e, por fim, os resíduos retidos em cada tamanho de abertura foram pesados. Foram realizadas três vias de ensaios. A análise foi realizada de acordo com a norma CEMP 081 da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA). Ao final desse processo os resíduos foram divididos em três frações, com faixas de granulometria distintas entre cada fração: **F1** < 1 mm, **F2** < 2 mm e **F3** > 2 mm.

A separação ocorre para avaliar a faixa granulométrica em que o grau de liberação dos metais é maior e, também, avaliar a geração de resíduos em etapas posteriores. As faixas de granulometria adotadas foram escolhidas por meio de consulta na Literatura, por meio dos estudos de Moraes (2011) e Da Silveira (2016).

## 2.4 Lixiviação em Água Régia

O objetivo dessa etapa consistiu em dissolver os metais das amostras e separá-los de polímeros e outros materiais. Para isso, utilizou-se uma solução de água régia (3HCl:1HNO<sub>3</sub> V/V) como agente lixiviante, a qual sempre era preparada antes de cada ensaio. A proporção (Sólido-Líquido) utilizada foi de 1:20, e o sistema também possuía aquecimento e agitação magnética, por meio do uso de um agitador magnético com aquecimento digital integrado da Warmnest modelo HJ-3. A lixiviação das amostras foi realizada no LCVMat. As condições utilizadas e informações relevantes sobre os ensaios estão expostos na tabela 2.

Tabela 2 - Condições das lixiviações das amostras

	Massa da amostra (g)	Volume de Água Régia (mL)	Temperatura (°C)	Tempo (Min)
Fração 1 (ACs, PCs e OEEs)	10	200	60	60
Fração 2 (ACs, PCs e OEEs)	10	200	60	60
Fração 3 (ACs)	10	200	60	60
Fração 3 (PCs e OEEs)	05	100	60	60

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Primeiramente, antes de cada ensaio, as amostras foram pesadas em balança analítica, da SHIMADZU modelo AUY 220, localizada no LCVMat. Após, a solução de Água Régia foi preparada e despejada no béquer que continha a amostra, em seguida, esse mesmo béquer foi colocado sobre o agitador magnético com aquecimento digital, o qual já estava previamente ligado na temperatura de 60°C, e então foideixado em agitação por 1 hora. Posteriormente, utilizando um papel filtro J prolab com porosidade de 8µm, o sistema foi filtrado, obtendo-se assim o licor de lixiviação e um material sólido. O material retido no papel filtro foi acondicionado em uma estufa da marca DeLeo a 50°C por 12 horas e depois pesado em balança analítica.

O licor de lixiviação, obtido por meio da filtração, foi guardado em um frasco de vidro âmbar para posteriormente ser utilizado nos ensaios eletroanalíticos, e o material não lixiviado foi enviado para ser analisado por fluorescência de Raios – X. Os filtros contaminados foram enviados para descarte apropriado.

### **2.5 Fluorescência de Raios – X (FRX) dos resíduos de lixiviação e do Grupo I dos componentes**

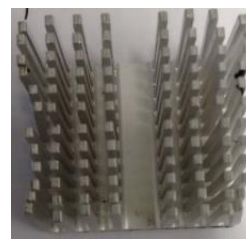
A FRX é uma técnica que permite determinar a constituição química elementar, em que os resultados são expressos em percentual. A análise química do material sólido retido nos filtros foi realizada com o objetivo de verificar se havia algum elemento químico de interesse que não tinha sido lixiviado com efetividade. Por outro lado, a FRX foi empregada nos componentes metálicos com o intento de verificar se essas partes metálicas apresentavam um alto ou baixo índice de pureza. As figuras 2 e 3 apresentam os resíduos que foram analisados.

Para realizar essas análises utilizou-se um equipamento de fluorescência de raios-X por Energia Dispersiva modelo EDX 720 HS, marca Shimadzu, localizado no LCVMat.

Figura 2 – Resíduo sólido da lixiviação



Figura 3 - Amostras dos componentes metálicos



## 2.6 Ensaios voltamétricos

A primeira análise realizada que envolveu a eletroquímica foi a voltametria, a qual foi empregada com o objetivo de descobrir os potenciais de redução das espécies químicas. No presente trabalho, empregou-se duas técnicas de voltametria: De Pulso Diferencial (VPD) e Cíclica (VC). Todos os ensaios de voltametria foram realizados no Laboratório de Eletrônica Flexível do Instituto Tecnológico de Semicondutores (itt Chip). Os equipamentos utilizados foram um Potenciostato da Metrohm/AutoLab modelo PGSTAT302N ligado a um computador, também se utilizou o Software NOVA versão 2.1.2 para a aquisição dos dados.

A célula eletroquímica utilizada foi composta por um eletrodo de referência Ag/AgCl, um contra eletrodo em fio de platina e os eletrodos de trabalho que foram testados eram de Carbono Vítreo e de grafite (lápiz de carpinteiro marca Irwing tipo HB). Na tabela 3 encontram-se as condições utilizadas na voltametria cíclica e na tabela 4 as informações referentes a voltametria de pulso diferencial. Ressalta-se que as condições das voltametrias se mantiveram iguais durante todos os ensaios, a única mudança que ocorreu foi a troca entre os eletrodos de trabalho.

Tabela 3 - Condições da voltametria cíclica

Intervalo de potencial do ciclo	Velocidade de Varredura	Nº de Ciclos
(V vs. Ag/AgCl) (mV vs. Ag/AgCl / s)		

+1V à -1V	100	4
-----------	-----	---

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Tabela 4 - Condições da voltametria de pulso diferencial

Intervalo de DDP	Incremento de DDP	Amplitude do pulso	Tempo do pulso
(V vs. Ag/AgCl) (mV)	(mV)	(ms)	

-1V à +1V	5	25	50
-----------	---	----	----

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Os ensaios ocorreram de forma sistemática. Para cada fração, primeiramente, era realizada a voltametria cíclica com eletrodo de grafite, após com Carbono Vítreo, em seguida era feita a voltametria de pulso diferencial com Carbono Vítreo e por último a mesma voltametria, mas com eletrodo de grafite. Foram realizadas ao todo 36 análises. Esses ensaios corresponderam à primeira bateria de experimentos.

A segunda bateria de análises foi feita com o intuito de descobrir quais espécies que correspondiam aos picos de redução observados nos gráficos. Nessa parte dos ensaios foram testadas duas soluções: Uma de água régia (branco), a qual passou pelas quatro análises de voltametria, e uma solução de  $\text{Cu}^{+2}$  (75g/L) dissolvido em  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (370g/L), que passou apenas pelos dois ensaios de voltametria de pulso diferencial. As condições das duas voltametrias são idênticas com as da primeira bateria.

Após o término dos experimentos de voltametria, sucedeu-se para a eletro-obtenção. A célula nesse caso tinha como eletrodo de trabalho uma mina de grafite, utilizada em lapiseiras escolares. O grafite foi do tipo 2B, com pureza de 74%, diâmetro de 0,9mm e tinha 17,2 mm<sup>2</sup> de área exposta para a solução. Os eletrodos foram, primeiramente, secos em estufa a uma temperatura de 100 °C por 5 minutos, em seguida foram deixados para resfriar e por fim foram pesados em balança analítica. Nesses ensaios foram utilizados dois potenciais, os quais foram determinados por meio das voltametrias, (I) -0,4V (vs Ag/AgCl) e (II) +0,2V (vs Ag/AgCl). Por último, foi realizada uma estimativa gravimétrica do quanto é possível obter de metais e, também, o valor econômico associado aos mesmos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da parte experimental estão apresentados e discutidos nos próximos itens.

#### 3.1 Processamento mecânico

Por meio da desmontagem manual obteve-se aproximadamente 2,6 kg de Placas de Circuito Impresso (PCIs) dos três tipos de resíduos estudados. As PCIs majoritárias, considerando a quantidade, foram as placas do grupo dos Aparelhos Celulares, mas as PCIs dos PCs representaram um percentual maior de massa, cerca de 74%.

Dentre as PCIs que foram estudadas, as placas dos aparelhos celulares apresentaram uma média mássica de 14,72g e desvio padrão de 3,14, as dos PCs tiveram uma média mássica de 272,55g e 29,37 de desvio padrão e as dos OEEs apresentaram 35,43g de média mássica e 12,68 de desvio padrão.

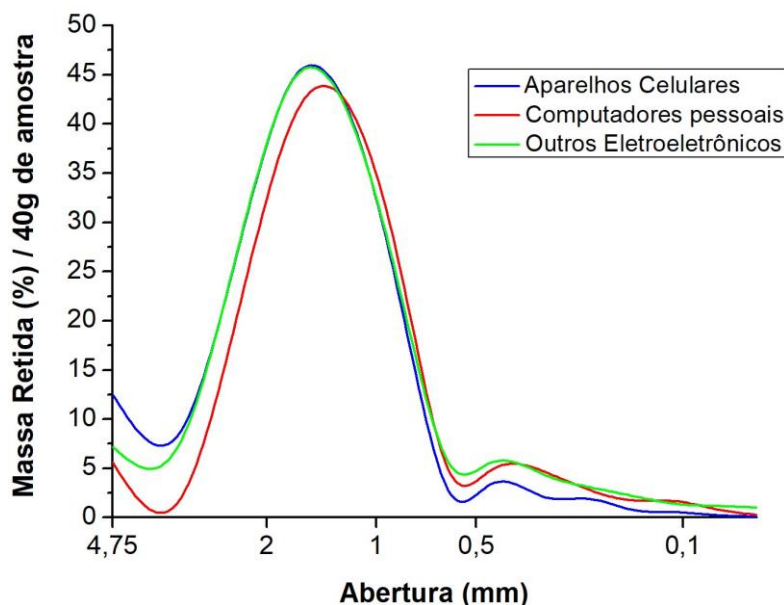
A dessoldagem das PCIs dos PCs provocou a diminuição de 25,45% de massa, enquanto que as dos OEEs representou 15% da massa total. A dessoldagem das PCIs proporcionou a obtenção de peças metálicas que podem ser ou não puras, ou seja, esse simples procedimento já proporcionou a recuperação de metais, os quais não precisaram passar pelos procedimentos posteriores para serem recuperados. Nas PCIs dos PCs essas peças metálicas representaram 11,7% da massa total das placas.

Houveram algumas perdas na dessoldagem das placas, nas PCIs dos PCs houve a perda de 0,87% de material e nos OEEs representou 0,11% da massa total. A moagem dessas placas também apresentou perdas, na trituração das PCIs dos PCs houve a perda de 6,3%, enquanto que a trituração das placas dos OEEs apresentou 5% de perdas. Durante a trituração das PCIs dos aparelhos celulares houve a perda de 8% de massa.

A classificação granulométrica das PCIs dos três grupos de resíduos diferiu em alguns aspectos. Mas, conforme pode ser observado na figura 4, todos os grupos de resíduos tiveram uma maior concentração entre 1mm e 2mm.



Figura 4 – Classificação granulométrica dos resíduos



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

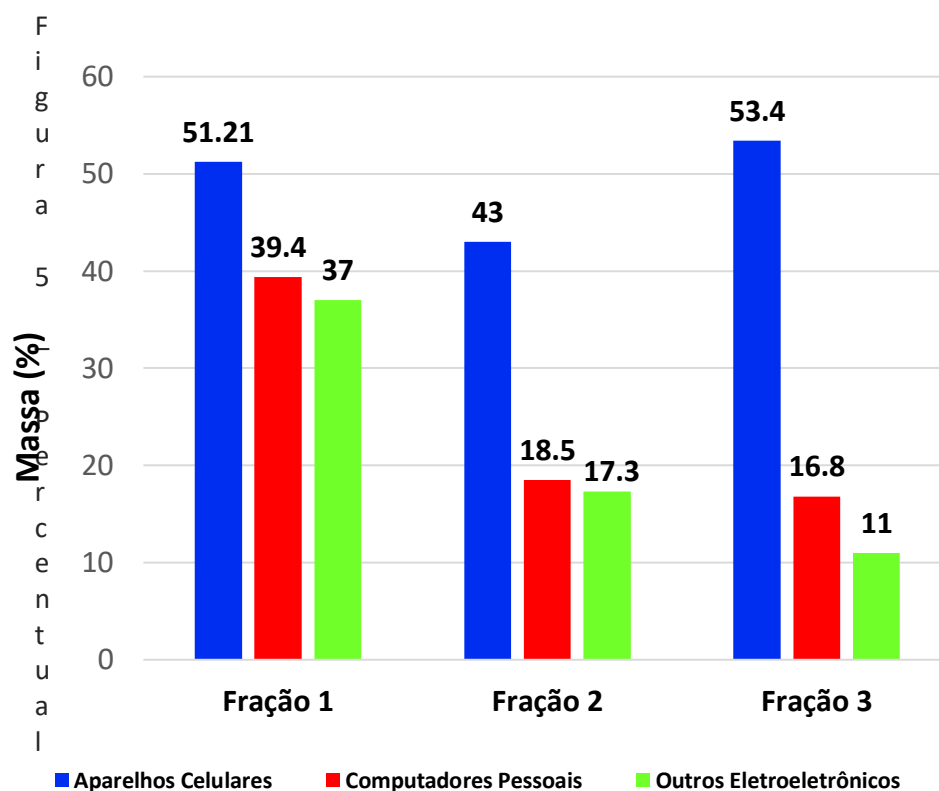
Além dessa região do gráfico que varia de 1mm a 2mm, há, também, outras duas regiões que merecem destaque. A primeira é para a área que compreende as granulometrias mais grossas, na qual é possível observar que os resíduos de aparelhos celulares tiveram uma concentração maior quando comparados, por exemplo, com os resíduos de computadores pessoais. Esse fenômeno observado é fruto da dessoldagem das placas, pois, uma vez que a retirada dos componentes presos às placas diminui a resistência contra impactos, essas podem ser trituradas com mais facilidade, ou seja, há um número menor de resíduos com granulometrias grossas, como é o caso das PCIs dos PCs.

Esse mesmo efeito pode ser constatado nos tamanhos inferiores a 0,5mm, em que há uma maior concentração dos resíduos de PCs e OEEs, mostrando novamente a influência da dessoldagem. A fração 2 ( $1\text{mm} < F_2 < 2\text{mm}$ ) dos resíduos de aparelhos celulares teve a maior retenção entre as frações desse grupo, com 44,58% dos resíduos pertencendo a essa faixa granulométrica. Já para os outros dois grupos de resíduos, as suas respectivas frações 1 ( $F_1 < 1\text{mm}$ ) tiveram a maior retenção de massa quando comparada com as demais, para PCs a fração 1 foi composta por 46,36% e para os OEEs 46,97% dos resíduos estavam concentrados nessa faixa granulométrica.

### 3.2 Hidrometalurgia

Com as análises de lixiviação das PCIs dos resíduos estudados, foi possível determinar a concentração dos metais nas diferentes granulometrias estudadas e, da mesma forma, a quantidade de materiais não solúveis, como polímeros e cerâmicos. A figura 5 apresenta os percentuais de massa lixiviada que foram

obtidos nos ensaios, e para saber o quanto havia de material insolúvel, diminuiu-se a quantidade de massa lixiviada de 100%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Por meio do gráfico, é possível notar que as PCIs dos aparelhos celulares tiveram as maiores massas lixiviadas, isto é, há uma concentração maior de metais para esse grupo de resíduos. Observando o percentual de massa lixiviada da fração 1 dos resíduos de aparelhos celulares, constata-se que há uma tendência de concentração de metais em granulometrias inferiores a 1mm, a mesma que foi observada por Moraes (2011) e Da Silveira (2016). Ainda considerando essa mesma fração, observa-se que houve um elevado percentual de material não lixiviado, concluindo-se, portanto, que essa faixa de granulometria (abaixo de 1mm) não é adequada para recuperar metais, pois, mesmo tendo mais da metade de massa lixiviada, a geração de resíduos sólidos é grande.

Já a fração 3 das PCIs dos aparelhos celulares teve a maior concentração de metais entre todas as frações estudadas, 53,4% de massa lixiviada. Valor muito acima do que foi encontrado por Da Silveira (2016), a qual constatou que 39,19% da fração que continha resíduos maiores que 2mm era de metais. Essa diferença de concentração é fruto do processo de dessoldagem, pois a não dessoldagem das PCIs ocasionou uma concentração maior de resíduos nessa fração granulométrica ( $F_3 > 2\text{mm}$ ), e muitos desses resíduos eram peças metálicas que não foram trituradas com eficiência pelo moinho, gerando assim uma fração rica em metais.

Na lixiviação após a moagem das PCIs dos PCs, constatou-se que os metais se concentraram em uma faixa granulométrica menor que 1mm, 39,4% da massa correspondia aos metais. Em contraste com o estudo de Veit (2005), que trabalhou com PCIs de computadores pessoais, a concentração de metais encontradas pelo autor foi de 38,14% para uma faixa granulométrica que variou de 0,5mm a 1mm. Nas frações 2 e 3 não foi possível concentrar uma quantidade significativa de metais, tendo alcançado um percentual muito pequeno de massa lixiviada. Veit (2005) sugere que para esse tipo de resíduo (PCIs de computadores pessoais) apenas se trabalhe com resíduos de granulometria inferior a 1mm. Em seu estudo, o autor precisou utilizar um segundo moinho para garantir essa granulometria ( $F < 1\text{mm}$ ).

Embora que, para efeito de comparação, não exista nenhum trabalho que tenha utilizado os mesmos resíduos do grupo dos Outros eletroeletrônicos, é possível utilizar o mesmo comentário dito anteriormente, pois as concentrações de metais que foram obtidas nas três frações são próximas.

### 3.3 Eletrometalurgia

O emprego da técnica de voltametria cíclica permitiu examinar os potenciais de redução de espécies químicas presentes em solução. Visando aumentar a qualidade dos resultados, foi utilizada voltametria de pulso diferencial, obtendo-se picos bem mais definidos, quando comparada com a voltametria cíclica. Desta forma, foi possível diferenciar alguns processos de maneira mais clara. Na primeira bateria de ensaios de voltametria foram observados três picos comuns entre todos os gráficos, nos potenciais de -0,4V (vs Ag/AgCl), +0,2V (vs Ag/AgCl) e +0,6V (vs Ag/AgCl).

Na tentativa de descobrir quais espécies estavam relacionadas com esses potenciais, foi realizada a segunda bateria de ensaios. O experimento de voltametria de pulso diferencial na solução de água régia (branco) constatou um pico no potencial de +0,6V (vs Ag/AgCl), como pode ser observado na figura 6, sendo assim, este se referiu às espécies químicas da solução de água régia independente do processo de extração.

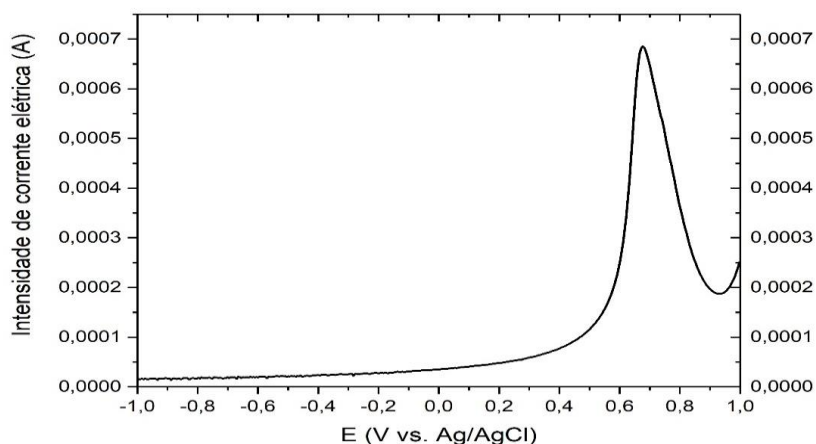


Figura 6 – Voltamograma de VPD na solução de Água Régia

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Da mesma forma, a aplicação da voltametria de pulso diferencial na solução de  $\text{Cu}^{+2}$  constatou um sinal de excitação bem definido no potencial de -0,4V (vs Ag/AgCl), como pode ser observado na figura 7. Portanto, o potencial de -0,4V (vs Ag/AgCl), prontamente anterior ao desenvolvimento do pico, pode ser utilizado visando a obtenção de cobre e o de +0,6V (vs Ag/AgCl) pode ser ignorado. Ainda não foi possível descobrir quais espécies podem estar relacionadas com o potencial de +0,2V (vs Ag/AgCl), exigindo maiores investigações.

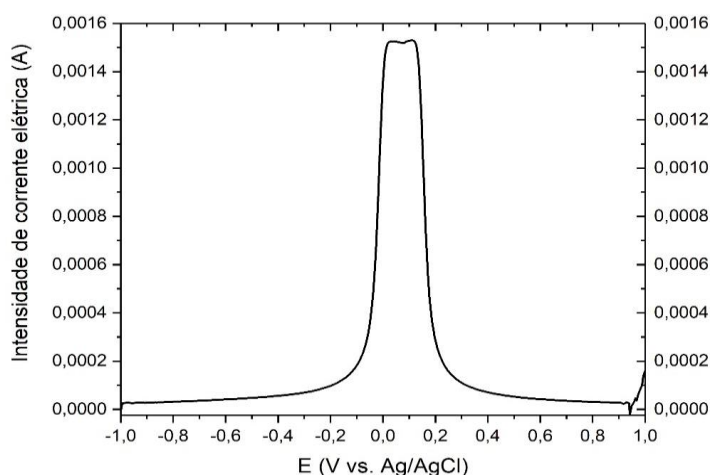


Figura 7 – Voltamograma de VPD na solução de cobre

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Na eletro-obtenção, foi aplicado um potencial de -0,4 V (vs Ag/AgCl) na solução sob agitação durante 15 minutos utilizando eletrodos de grafite de lapiseira (área ativa de 17,3mm<sup>2</sup>), e os resíduos de celulares tiveram uma média de 49,1 mgCu/10g de resíduo, os de PCs possuíam 40,63 mgCu/10g de resíduo e os OEEs tinham 36,6 mgCu/10g de resíduo. Na figura 8, observa-se o cobre recuperado nos cátodos. Vale ressaltar que o rendimento de obtenção pode ser aumentado utilizando-se eletrodos de área maior e tempo maior de deposição.

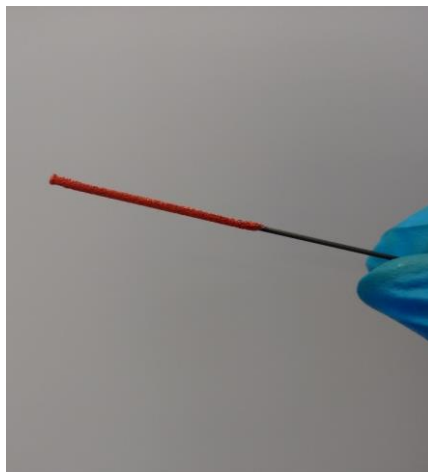


Figura 7 – Cobre recuperado

Fonte: Registrado pelos autores (2018).

### 3.4 FRX dos resíduos de lixiviação e Grupo I dos componentes

Em todos os resíduos de lixiviação que foram analisados por meio da técnica de FRX, não se encontrou nenhum metal de interesse, mostrando, portanto, que as condições utilizadas nos ensaios de lixiviação foram adequadas. A FRX do Grupo I mostrou que os componentes responsáveis pelo contanto elétrico (a, Fig. 3) são majoritariamente formados por Cu, Zn e Ni, indicando que se trata de uma liga metálica, por outro lado o suporte do processador (b, Fig. 3) é predominantemente constituído pelo zinco e em menor quantidade por ferro, sugerindo também que seja uma liga metálica. A FRX do dissipador da memória interna (c, Fig. 3) mostrou o alumínio como elemento majoritário e alguns metais como traços, o que sugere que essa parte seja basicamente constituída de alumínio. Porém, análises micrográficas deverão ser realizadas para confirmar as fases e, portanto, os tipos de ligas.

### 3.5 Estimativa de recuperação de metais

Aqui, realizou-se apenas uma estimativa da quantidade de metais que poderiam ser recuperados por meio da metodologia que foi utilizada na presente pesquisa, avaliando também o aspecto econômico dessa recuperação. Para fins matemáticos, foi considerado a quantidade de uma tonelada de PCIs, para cada grupo de resíduos, as quantidades de metais que foram obtidas nesse trabalho, o

valor dos metais de acordo com a Bolsa de Metais de Londres (07/18) e o dólar a R\$ 3,84. Apenas o Cu e o Al foram considerados na estimativa, pois os outros metais estão sob a forma de liga metálica. Esses resultados estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Processamento de uma tonelada de PCI

Processo	Grupo de Resíduo	Massa de Al (kg)	Massa de Cu (kg)	Valor do Al	Valor do Cu
Dessoldagem	PCs	20,96	7,78	R\$ 169,26	R\$ 186,8
Eletro-obtenção	PCs -		2,59	-	R\$ 62,18
Eletro-obtenção	OEEs-	2,80		- R\$ 67,23	
Eletro-obtenção	ACs -	4,5		-	R\$ 108,05

Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Apenas para efeito expositivo, por meio do processamento de uma tonelada de PCIs de PCs seria possível também recuperar 54 kg da liga Cu-Zn-Ni e 41,4 kg da liga Zn-Fe, ambas provenientes da dessoldagem. Já o processamento de uma tonelada de PCIs dos OEEs recuperaria 26,05 kg da liga Cu-Zi-Ni.

#### 4 CONCLUSÃO

Nessa pesquisa foi possível concluir:

- A maior parte dos resíduos se concentrou na granulometria de 1,7mm e 0,85mm;
- Os metais tendem a se concentrar em tamanhos inferiores a 1mm, uma vez que a lixiviação desses resíduos foi a que apresentou a maior porcentagem de massa lixiviada, ou seja, dissolvida;
- Os componentes metálicos, presos às PCIs dos computadores pessoais, representaram 11,7% da massa total, mostrando que o emprego da dessoldagem é muito efetivo na obtenção de metais;
- A não dessoldagem das PCIs dos aparelhos celulares dificultou em muito a extração de metais, visto que não foi possível obter esses mesmos metais na eletro-obtenção, provocando assim a perda desse material;
- Os metais que foram obtidos em maior quantidade, por meio da dessoldagem, foram as supostas ligas metálicas com os elementos majoritário Zn-Fe e Cu-Zn-Ni, por isso é necessário um estudo mais aprofundado em que se utilize essas ligas metálicas, a fim de separar os metais que as compõem;
- A aplicação do potencial de -0,4V (vs Ag/AgCl) se mostrou eficiente na obtenção de cobre. Entretanto, para fins de extração laboratorial, sugere-se a utilização de placa.

# Recovery of metals through the recycling of printed circuit boards from electronic scrap

## ABSTRACT

The natural reserves of ores are gradually decreasing across the planet. One way to minimize this problem would be to recover metals contained in industrial or urban solid waste, for example in electronic scrap. For this reason, the objective of the work was to recover metals from electronic scrap, through the processing of printed circuit boards (PCBs). After the collection, the residues were separated into three groups: Cellular Devices (CDs), Personal Computers (PCs) and Other Electronics (OEs). Then, the process of disassembling the residues was carried out, aiming at the removal of Printed Circuit Boards (PCBs). Subsequently, the residues PCBs went through processes that aimed at obtaining metals, such as mechanical processing, hydrometallurgy and electrometallurgy. Through leaching the samples, fractions 1 and 3 of the cellular devices had the largest leached masses, 51.2% and 53.4%, respectively, while fraction 1 of PCs and OEs samples had 39% and 37% of leached mass, each. By means of the voltammetry tests in the samples, it was possible to determine that the copper reduction potential in the samples is  $-0.4V$  vs  $Ag/AgCl$ . In the electro-obtaining assays, a recovery content of 58.26% of copper was obtained in the cathodes. The desoldering of the PCBs from the PCs allowed 14.84 grams of copper, 40 grams of aluminum, 103 grams of a Cu-Zn-Ni alloy and 79 grams of a Zn-Fe alloy. The results showed that desoldering is an efficient way of pre-treatment of PCBs and that it is possible to obtain copper by means of the electrochemical pathway.

**KEY WORDS:** Residues electrical and electronic equipment; Recycling of Printed Circuit Boards; Recovery; Metals.

## REFERÊNCIAS

- ABDI. **Logística Reversa de Equipamentos Eletrônicos: Análise de Viabilidade Técnica e Econômica**. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. Brasília. 2013.
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Norma CEMP 081: Materiais para fundição – determinação da distribuição granulométrica, módulo de finura e teor de finos em materiais granulares**. 2015. 5p.
- Bolsa de Metais de Londres. Cotação LME (London Metal Exchange). Disponível em: < <http://www.maxiligas.com.br/cotacao-lme-london-metal-exchange>>. Acesso em: 20 jul. 2018.
- KANG, H.-Y.; SCHOENUNG, J. M. **Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options**. Resour. Conserv. Recycl., vol. 45, no 4, p. 368–400, dez. 2005.
- MORAES, V. T de. **Recuperação de metais a partir de processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos**. (Tese de doutorado). USP, 2011.
- MÜNCHEN, D.D. **Recuperação de neodímio a partir de ímãs de neodímio-ferro-boro por meio de processos mecânicos e hidrometalúrgicos** (Dissertação de Mestrado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 63p. 2016.
- RODRIGUES, A.C. **Impactos Socioambientais dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos: Estudo da Cadeia Pós-consumo no Brasil**. Santa Bárbara D'Oeste. 2007. 303p. (Dissertação de Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da UNIMEP.
- RODRIGUES, A.C. **Fluxo domiciliar de geração e destinação de REEE no município de São Paulo/SP: caracterização e subsídios para políticas públicas** (Tese de Doutorado). São Paulo: Faculdade de Saúde Pública da USP. 2012.
- SANTOS, C.A.F. **A Gestão dos resíduos eletroeletrônicos e suas consequências para a sustentabilidade: Um estudo de múltiplos casos na região metropolitana de Porto Alegre** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 131p. 2012.
- SILVEIRA, T.A. **Caracterização de sucatas de smartphones e aplicação de processamento mecânico visando a recuperação de materiais oriundos de placas de circuito impresso**. (Monografia). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2016. 77p.
- VEIT, H.M. **Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso** (Tese de Doutorado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 115p. 2005.



**Recebido:** 11 jun. 2018.

**Aprovado:** 17 jul. 2018.

**DOI:** 10.3895/rbpd.v7n3.8647

**Como citar:** PAUMANN, J. T.; DORNELES, K. E. O.; BATISTA, G. L.; MORAES, C. A. M. Recuperação de metais através da reciclagem de placas de circuito impresso oriundas de sucata eletrônica. **R. bras. Planej. Desenv.**, Curitiba, v. 7, n. 3, Edição Especial Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, p.405-421, ago. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbpd>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Jonathan Tomazoni Paumann

R. Renato Vier, 205 - Floresta, Dois Irmãos – RS

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

