

VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE MÉTODOS DE MICROANÁLISE NA PESQUISA DA RECICLAGEM DO LIXO ELETRÔNICO

ECONOMIC VIABILITY OF THE USE OF MICRO ANALYSIS METHODS IN THE RESEARCH OF ELECTRONIC WASTE RECYCLING

Luiz Fernando Whitaker Kitajima

Professor do Centro Universitário do DF (UDF) e Faculdade da Confederação Nacional da Agricultura(FCNA)

E-mail: luizfwk@gmail.com

Regina Célia Rebouças Dalston

Professora da Universidade Católica de Brasília (UCB)

E-mail: rdalston@gmail.com

Graziela Ferreira Guarda

Professora da Universidade Católica de Brasília (UCB)

E-mail: grazielafguarda@gmail.com

Beatriz Barcelos

Professora da Universidade Católica de Brasília (UCB).

E-mail: beatriz.rodrigues.barcelos@gmail.com

Marcelo Nascimento Silva Franco

Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Católica de Brasília (UCB)

E-mail: marcelonsfranco@gmail.com

Recebido em: 12/02/2020

Aprovado em 12/07/2020

Resumo

O lixo eletrônico é uma forma de resíduo sólido que tem crescido de forma acelerada nas últimas décadas, sendo composta por aparelhos eletrodomésticos, computadores, televisões e aparelhos celulares. Este tipo de resíduo tem um grande potencial para promover impactos ambientais negativos no ambiente, quando são descartados de forma inadequada. Uma forma de minimizar estes impactos é a reciclagem, especialmente devido ao conteúdo de metais preciosos como o ouro. Estes processos, entretanto, podem produzir quantidades variáveis de ouro como produto final, e por isso uma análise química torna-se necessária nos produtos da reciclagem. Considerando que o ouro é usado como commodity de alto valor no mercado, este procedimento de extração apresenta relevância econômica. Neste trabalho é proposto o uso de métodos

microanalíticos, a saber o uso do EDS (Energy Dispersive System) acoplados a microsondas eletrônicas e microscópios eletrônicos de varredura. Em testes feito com amostras de materiais reciclados (especificamente pinos de CPU – Central Processing Unit), antes e depois de um ataque ácido com ácido nítrico (HNO₃) a 65%, mostrou que o procedimento é eficaz para separar metais base como o cobre, ferro e níquel, deixando apenas folhas de ouro. Este processo mostrou-se prático devido ao fato de que não é preciso dissolver a amostra para análises químicas (são métodos não-destrutivos), não gera resíduos e a análise é rápida. Portanto, os equipamentos supracitados são potencialmente úteis em trabalhos de reciclagem de metais preciosos em e-lixo para atestar a eficiência na separação de ouro (ou outro elemento) na amostra. Outro ponto importante é que a quantidade de ouro recuperada por equipamento é pequena e pode estar misturada com níquel e cobre, mas considerando o volume descartado de lixo eletrônico, esse volume maior de lixo eletrônico justificaria esses procedimentos.

Palavras-chave: E-lixo, reciclagem de ouro, métodos microanalíticos, EDS, Microsonda eletrônica, Microscopia eletrônica de varredura; viabilidade econômica.

Abstract

Electronic waste (or e-waste) is a type of solid waste. The e-waste is composed of several household electric appliances, computers, mobile phones, television sets, etc. The volume of this kind of waste had been increasing in the last decades and it has a great potential for environmental impact if it is discarded without care or any safety measure. Recycling is an alternative to reduce the environmental impact, especially due to the possibility of recovering gold and precious metals in this process. Considering the rising value of gold in market, this process is an interesting issue. This possibility makes chemical analysis of the recycled material an important tool to determine the quantity and quality of recovered precious metals. In this paper is proposed the use of microanalytical methods as EDS (Energy Dispersive System) coupled with electron microprobes or scanning electron microscopes. Tests done in e-waste samples (specifically CPU pins), before and after an acid dissolution by nitric acid (65% HNO₃ solution) showed that the process is efficient to leach the base metals (copper, iron and nickel) leaving behind only the gold (as thin sheets). This analytical procedure is very practical as it does not require sample dissolving (is a non-destructive analytical method), does not produce other wastes and the results are quickly obtained after the analysis. As a concluding remark, the EDS (Energy Dispersive System) coupled with electron microprobes or scanning electron microscopes is a potentially useful tool in precious metal recycling from e-waste for determining the efficiency in recovering gold or other precious metals. The recovered quantity is small, but due to rising prices of the metal this process would worth the investment and work developed for this recycling.

Keywords: E-waste, gold recycling, microanalytical methods, EDS, electron microprobe, scanning electron microscope; economic viability

Introdução

O rápido crescimento populacional e o aumento do consumo de bens desta população geram um volume de resíduos dos mais diversos tipos que, descartados imprópriamente, causam impactos negativos no ambiente e comprometem a disponibilidade de recursos para as gerações futuras e comprometem a qualidade ambiental (BRAGA et al. 2005; MOTA, 2006).

Um dos tipos de resíduo, no caso resíduo sólido, cujo volume tem crescido de forma acelerada nas últimas décadas é o chamado lixo eletrônico ou e-lixo. Este tipo de resíduo consiste em equipamentos eletrônicos descartados, especialmente computadores, telefones celulares, aparelhos de televisão e rádios, mas também inclui aparelhos eletrodomésticos como fornos de micro-ondas (BALDÉ et al. 2015).

Existem maneiras de se reduzir os impactos gerados por estes resíduos, especialmente pela reciclagem de seus componentes. Esse procedimento já é realizado em várias localidades no mundo, mas ainda passa por alguns obstáculos. Um deles é o descarte, armazenamento e processos de reciclagem inadequados, muitas vezes causando tantos impactos negativos ao ambiente quanto sendo socialmente inadequadas pelo uso de mão de obra sem treinamento, infantil ou mesmo com direitos trabalhistas ausentes. Outro problema é o fato de que a reciclagem pode gerar resíduos tóxicos, ocorre desperdícios no processo ou o produto final não ter qualidade suficiente para ser aceito no mercado (BALDÉ et al. 2015).

Assim, uma pesquisa mais detalhada deve ser feita nestes processos para que possam aliar baixos custos, riscos que podem ser administrados, baixa geração de resíduos e gerar produtos de qualidade. No caso do e-lixo, um dos processos de reciclagem é a chamada hidrometalurgia, que consiste na dissolução em ácidos, com posterior separação dos metais e sua fusão em forno para obtenção do elemento em sua forma metálica (RESTREPO e GOMEZ, 2011).

Na pesquisa para desenvolver este processo, torna-se importante determinar a qualidade do material final, em especial verificar a concentração do metal de interesse. Para isso, pode-se empregar métodos analíticos que permitam a obtenção desta informação de maneira rápida e com pouca ou nenhuma necessidade de se usar métodos que impliquem no ataque ácido ou outro tipo de análise destrutiva, e conseqüentemente, demorada e mais dispendiosa (KLEIN, 2002; WINTER, 2010).

Um destes métodos são os chamados métodos de microanálise, métodos que permitem usar pequenas porções do material final sólido, com pouca ou nenhuma preparação, e que são rápidos e reduzem os custos de pesquisa (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007). Tais métodos são empregados principalmente para exames de amostras biológicas ou minerais, mas podem ser utilizadas para o estudo da qualidade do produto obtido pela hidrometalurgia no e-lixo. Pode-se empregar também estes

métodos para os materiais obtidos durante o processo de reciclagem, tais como filtrados e precipitados. Além disso, tais métodos podem ser aplicados em outras situações no processo de reciclagem, como por exemplo a identificação positiva da presença de determinados elementos de interesse nas amostras a serem recicladas, com rapidez e baixos custos.

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados dos exames em amostras de lixo eletrônico e de material reciclado, utilizando o sistema EDS (elétron dispersive system) acoplados em microsonda eletrônica e microscópio eletrônico de varredura, bem como sua viabilidade econômica. O elemento estudado para reciclagem foi o ouro.

O ouro e o lixo eletrônico

O ouro é um elemento químico de símbolo Au, sendo um metal. É um elemento caracterizado por sua cor amarela, alta densidade, é maleável, bom condutor de eletricidade e resiste a ação do oxigênio (oxidação) e de muitos ácidos, só podendo ser dissolvido por uma mistura de ácidos nítrico e clorídrico conhecido como água-régia (GRAY, 2011).

Estas propriedades (facilidade de trabalhar, resistência química, condutibilidade) fizeram deste elemento um componente essencial em equipamentos eletrônicos como computadores e telefones celulares (RESTREPO e GOMEZ, 2011). O ouro é um dos primeiros metais a ser trabalhados na história humana, e há milhares de anos representa padrão de excelência e de reserva financeira, sendo que foi reconhecido como tal desde 1.500 AC no Egito. Entre o fim do século XIX e a década de 30 do século XX existiu, em diversas formas e em diversos países, o chamado padrão-ouro, em que o dinheiro circulante era lastreado por um dado valor de ouro metálico (REUTERS, 2010).

Na atualidade o ouro é considerado um investimento, tanto na posse do ouro metálico como em títulos lastreados em ouro. O ouro é, por exemplo, usado para *hedge*, que é a proteção da carteira de investimentos contra desvalorizações excessivas através de ativos que podem se valorizar (ou desvalorizar menos) (FURLANI, 2018). Entretanto, o ouro deve ser considerado mais uma commodity (metal precioso) do que moeda propriamente dita, já que o uso do ouro metálico como moeda tem limitações (ULRICH, 2015).

Como o lixo eletrônico apresenta ouro em seus componentes, sua extração mostra-se interessante do ponto de vista econômico, podendo ser uma fonte alternativa deste metal.

Métodos microanalíticos

Métodos microanalíticos são métodos usados para a análise quantitativa e qualitativa de pequenas amostras, com dimensões milimétricas a centimétricas. Tais métodos permitem a análise em um tempo relativamente curto e sem a necessidade de se destruir ou dissolver a amostra por ataque ácido para análises via úmida, por exemplo.

A microsonda eletrônica e o microscópio de varredura eletrônica com EDS são dois exemplos, e ambos operam com princípios semelhantes. A Figura 1 mostra um esquema básico destes equipamentos. Elas consistem em um tubo à vácuo (coluna), onde em uma extremidade há um filamento que, aquecido, gera um fluxo de elétrons graças a uma diferença de voltagem.

O feixe é colimado (focalizado) por meio de magnetos, que atuam como lentes condensadoras e focalizadoras, e atinge o “alvo” – no caso a amostra – localizado na parte inferior do tubo, a câmara de amostras, que também fica em vácuo. Os elétrons que atingem a amostra interagem com os elétrons dos átomos aí existentes, e os resultados das interações são detectados por equipamentos localizados na câmara de amostras.

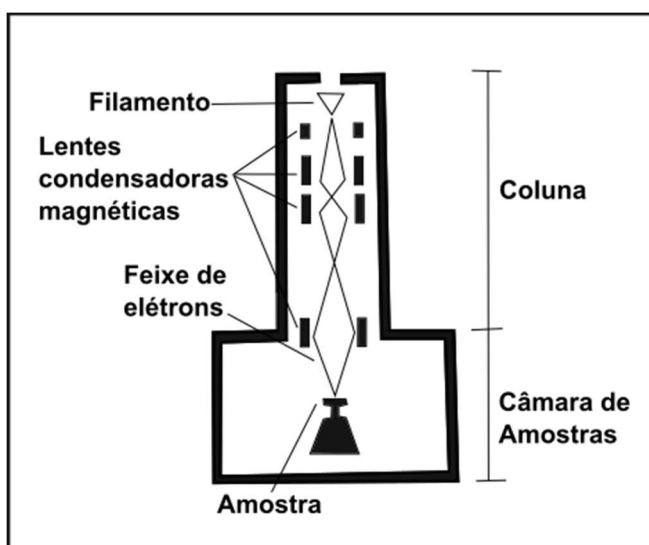


Figura 1. Desenho esquemático de um sistema MEV / Microsonda eletrônica.

Esta interação gera radiação secundária na forma de outros elétrons (elétrons secundários) ou raios-X. As características destes é proporcional à qualidade e quantidade dos elementos químicos que compõem a amostra, e ainda permitem formar imagens tridimensionais da amostra, com aumentos de até 300.000 vezes e distinguir detalhes de até 10^{-9} m, ou um nanômetro (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

Há ainda os elétrons retroespalhados, ou BSE (*Backscattered Secondary Electrons*), que são elétrons do feixe que são desviados de seu trajeto em até 90 graus após colisão com os átomos dos alvos. A energia do elétron retroespalhado é função do número atômico do átomo do alvo, e por isso os BSDE podem ser utilizados para formar imagens em tom de cinza, ou coloridos, que indicam o elemento dominante do alvo. Estas imagens assim podem mostrar um “mapa” do alvo, mostrando a distribuição dos elementos químicos constituintes.

O EDS, ou Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, ou espectroscopia de raios X por dispersão de energia, é um método que especificamente analisa os raios X emitidos pela amostra. O que é analisado é a energia emitida. Ela permite uma análise qualitativa (o que se tem na amostra) e nos modelos mais recentes permite uma análise quantitativa. Os resultados são mostrados tanto na forma de um espectro de energia, com a indicação dos elementos presentes, quanto um quadro semi-quantitativo. A amostra é visualizada através de um microscópio ao qual está acoplada uma câmera de televisão, e o sistema todo é controlado por computador.

No microscópio eletrônico de varredura, o feixe de elétrons é usado para “varrer” a amostra, sendo que a varredura gera uma imagem do aspecto tridimensional da amostra através dos elétrons secundários emitidos. Tal como na microsonda, este processo gera elétrons secundários que podem ser detectados e usados para quantificar a composição química da amostra examinada (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

Nos dois casos a amostra não precisa ser dissolvida para análises, bastando uma parte sólida da amostra, que pode ser polida ou não, dependendo do tipo de amostra, e às vezes é coberta com uma fina película de carbono ou ouro para dar condutividade elétrica e evitar o acúmulo de cargas elétricas na amostra, que pode afetar as análises. Se a amostra é metálica, tal cobertura pode mesmo ser dispensada. Portanto, as amostras usadas para as análises quase não precisam ser preparadas com métodos que utilizem

compostos agressivos ou tóxicos, como ácidos, o que facilita sua análise e reduz os custos, bastando pequenos fragmentos para tal.

Para o presente artigo foram empregadas as análises feitas com o uso de uma microsonda eletrônica e um microscópio eletrônico de varredura com um EDS acoplado.

Equipamentos e amostras utilizadas

Para as análises descritas neste artigo, foram usadas amostras trabalhadas na Universidade Católica de Brasília (UCB) no âmbito do Projeto e-Lixo: Reiniciar Tecnologia Sustentável, um projeto de pesquisa financiado pela FAP-DF (Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal) a partir do ano de 2015 e em trabalhos de conclusão de curso (TCC) do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária (FRANCO, 2015 e SANTANA, 2016). Este projeto (e-Lixo), entre outros objetivos, procura determinar processos de extração de ouro e outras matérias-primas a partir do lixo eletrônico. Um destes métodos é a hidrometalurgia, já descrito anteriormente e testado em trabalhos de conclusão de curso do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária do presente curso (FRANCO, 2015 e SANTANA, 2016).

As amostras analisadas consistem em:

- Pinos de CPU (Central Processing Unit), que foram aquecidas em bico de Bunsen para a separação dos pinos. Alguns pinos foram cortados perpendicularmente ao seu comprimento para expor o interior para análise. As CPUs são provenientes de computadores tipo *desktop* que foram descartados (Figuras 2a e 2b).
- Folhas metálicas provenientes destes pinos, após serem submetidas a ataque químico. Os pinos foram colocados em um béquer e cobertos com ácido nítrico (HNO_3) a 65%, e mantidos em ataque por até 72 horas (Figuras 3a e 3b).

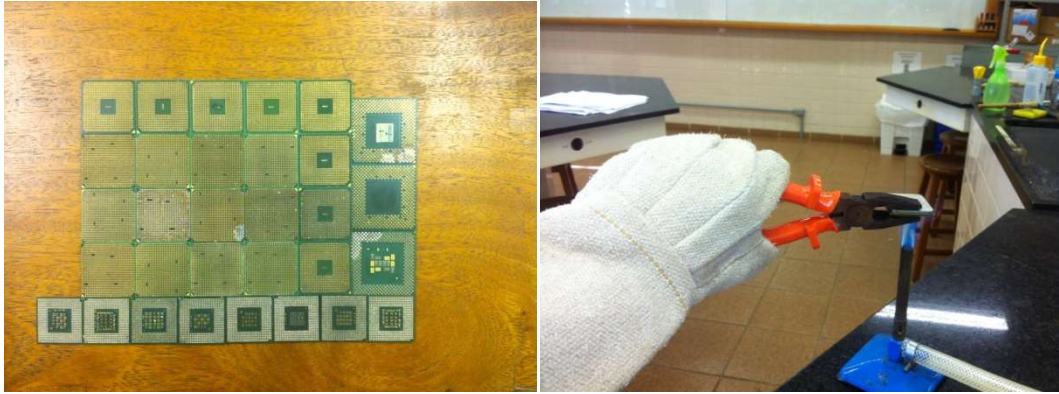


Figura 2a (esquerda). CPUs com os pinos. **Figura 2b** (direita). Retirada dos pinos com bico de Bunsen.

Fotos: Marcelo Franco.



Figura 3a (esquerda). Pinos no ataque ácido. **Figura 3b** (direita). Filtragem do ácido após o ataque, mostrando as folhas metálicas.

Fotos: Marcelo Franco.

A Figura 4 mostra fotografias dos pinos (antes dos ataques) e das folhas metálicas obtidas após os ataques, já posicionadas no suporte para amostras para análise em microscópio eletrônico de varredura.



Figura 4. Suportes de amostras para microscopia eletrônica com os pinos, inteiros ou cortados (esquerda) e as folhas metálicas obtidas após os ataques (direita). Estas amostras estão fixadas ao suporte com o uso de uma fita adesiva de carbono. Foto: prof. Dr. Elliot W. Kitajima.

Após este período, os metais base, a exceção do ouro, eram dissolvidos no ataque ácido, com o ácido adquirindo uma cor azulada. O material era filtrado e o béquer lavado com água destilada, esta água também era filtrada. O material retido no filtro era também lavado com água destilada e então colocado para secar e ser submetido a exame (Figuras).

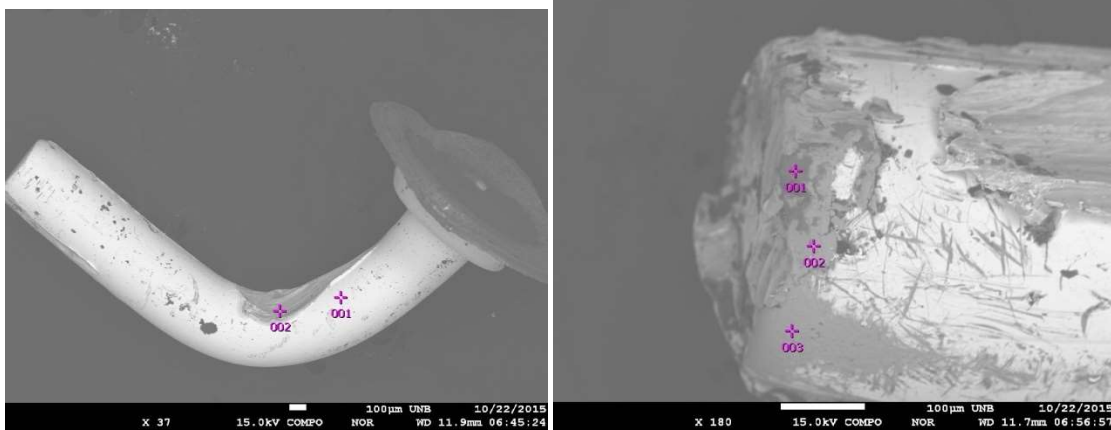
Para as análises em microsonda eletrônica utilizou-se a microsonda do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UnB). O equipamento é um JEOL JXA 8230. O professor responsável pelas análises foi o professor Dr. Nilsson Francisquini Botelho (também do IG-UnB).

Para a análise em microscópio eletrônico utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura do Núcleo de Apoio a Microscopia Eletrônica Aplicada a Agricultura (NAPMEPA) da Escola Superior de Agronomia Luiz de Queirós da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP). O Equipamento consistiu em um ZEISS DSM 940 A, e os professores responsáveis pelas análises foram os professores Drs. Elliot W. Kitajima e Francisco A. O. Tanaka.

Resultados e análise

Os exames foram inicialmente realizados nos pinos retirados das CPUs antes dos ataques químicos para a determinação da presença de ouro e outros metais. As análises feitas na microsonda eletrônica da Universidade de Brasília mostraram, nas imagens (Figuras 5a e 5b), que a superfície se apresentava desgastada em alguns pontos, e foram analisadas as partes mais claras e as partes desgastadas de cor mais escura.

Os espectros de EDS (Figuras 6a e 6b) mostraram que as áreas lisas e claras mostraram ser compostas por ouro, com picos menores de níquel e ferro. As partes mais escuras, expostas nas laterais e extremidades do pino, mostraram picos de energia correspondentes de níquel e ferro.



Figuras 5a e 5b. Fotos obtidas em microsonda eletrônica de dois pinos de CPU, antes do ataque. Fotos: prof. Dr. Nilsson Francisquini Botelho

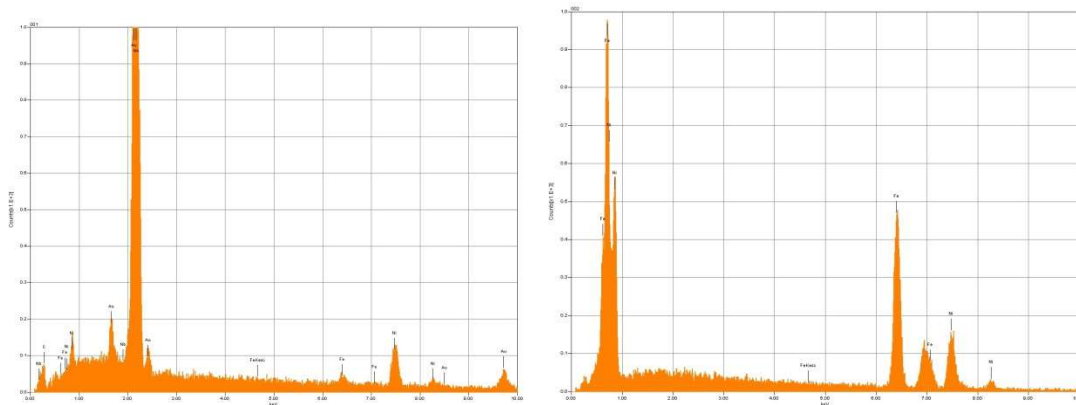


Figura 6a (esquerda). Espectro EDS da análise do pino mostrado na Figura, mostrando grandes picos de emissão de energia correspondentes ao ouro.

Figura 6b (direita). Espectro de EDS de um dos pontos raspados do pino na Figura, mostrando picos de emissão de energia maiores para o níquel e o ferro.

Espectros obtidos pelo prof. Dr. Nilsson Francisquini Botelho.

No microscópio de varredura com EDS acoplado da ESALQ-SP foram feitas análises em uma amostra cortada perpendicularmente ao comprimento e uma amostra que apresentava uma parte raspada. Nas Figuras 7a e 7b estão imagens com o “mapeamento” químico indicando, por cores, a composição dominante nas amostras. Os resultados mostraram que:

- A superfície dos pinos apresentou a presença de ouro e níquel
- -A parte central apresentou a presença de cobre.

- A análise pelo microscópio de varredura indicou as seguintes composições gerais (de toda a a imagem), indicadas na Tabela 1.

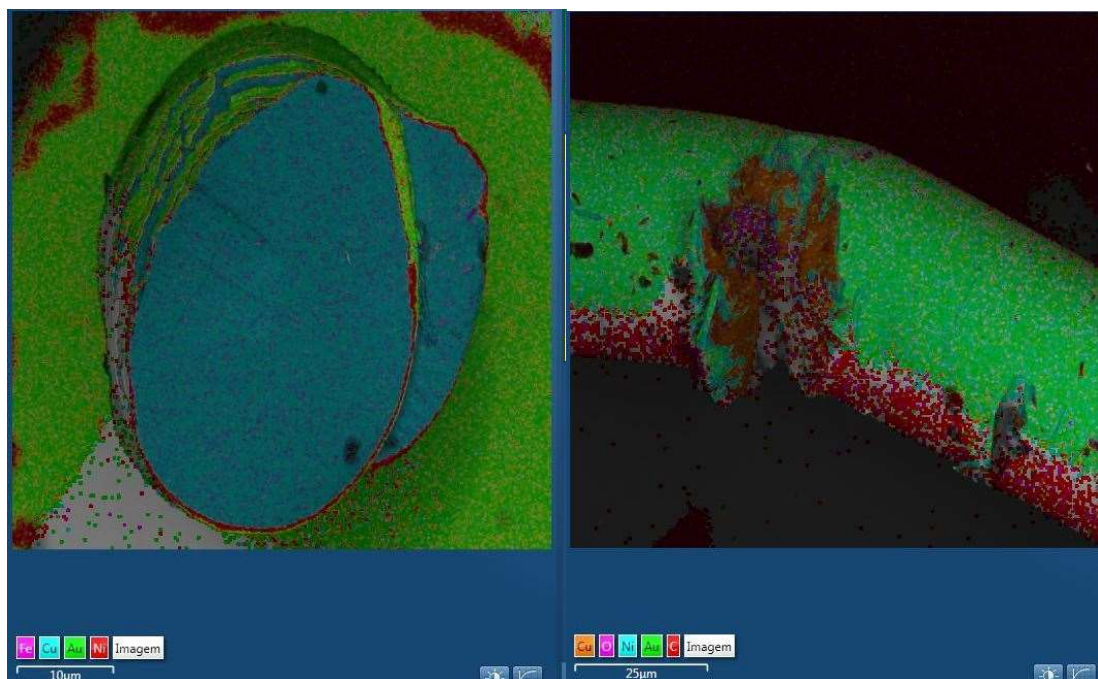


Figura 7a (esquerda). Imagem em MEV de um pino cortado, mostrando seu núcleo. O centro, de cor azul, indica a presença de cobre. As bordas, de cor verde e vermelho, indicam a presença de níquel.

Figura 7b (direita). Imagem em MEV de um pino parcialmente raspado. A cor verde azulada indica a presença de ouro e níquel, enquanto na parte raspada há uma mancha de cor laranja, indicando presença de cobre.

Fotos: profs. Drs. Elliot W. Kitajima / Francisco A. O. Tanaka

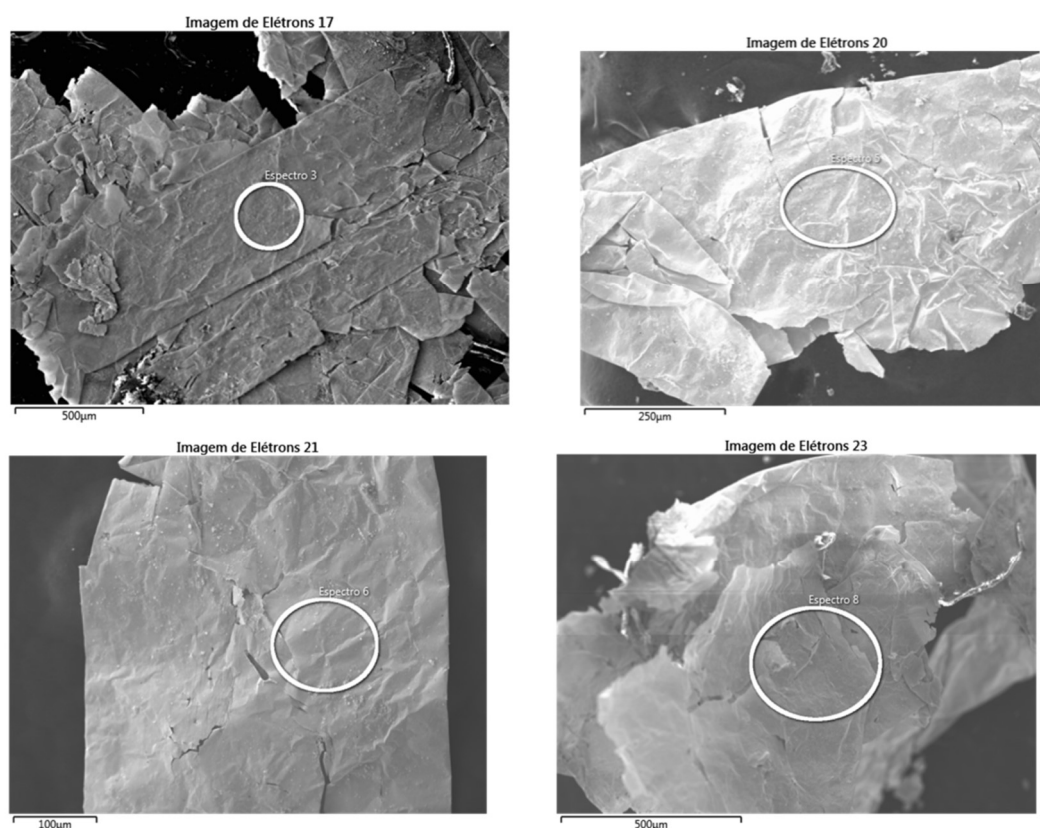
Tabela 1: Análise semi-quantitativos pinos mostrados nas Figuras a partir do EDS em microscopia eletrônica de varredura realizada na ESALQ. Os valores estão em % em peso.

	Pino cortado	Pino não cortado
Cu	36,7	5,9
Au	31,4	28,8
C	14,8	52,3
Ni	13,7	11,4
O	2,1	-
Fe	1,1	1,3
Sn	0,3	-

As imagens de elétrons retroespalhados mostraram que no pino cortado mostrava um centro constituído de cobre, enquanto que as bordas apresentaram concentrações maiores de ouro e níquel. Já o pino não cortado mostrava na parte raspada maiores concentrações de cobre, enquanto na parte não raspada mostrava a presença de ouro e níquel (Figuras 7a e 7b).

O material obtido após o ataque ácido mostrava-se macroscopicamente com o aspecto de folhas de cor dourada e dimensões milimétricas (algo entre 1 e 2 mm) (ver Figura 4). Nas análises em microsonda e microscopia eletrônica confirmaram o aspecto de folha, mostrando folhas alongadas (Figuras 8a à 8d).

As análises químicas resultaram em espectros EDS com grandes picos de emissão de ouro, com picos de emissão bem menores de carbono, oxigênio, estanho, antimônio e ferro (Figuras). As análises semi-quantitativas mostraram os seguintes resultados indicados na Tabela 2.

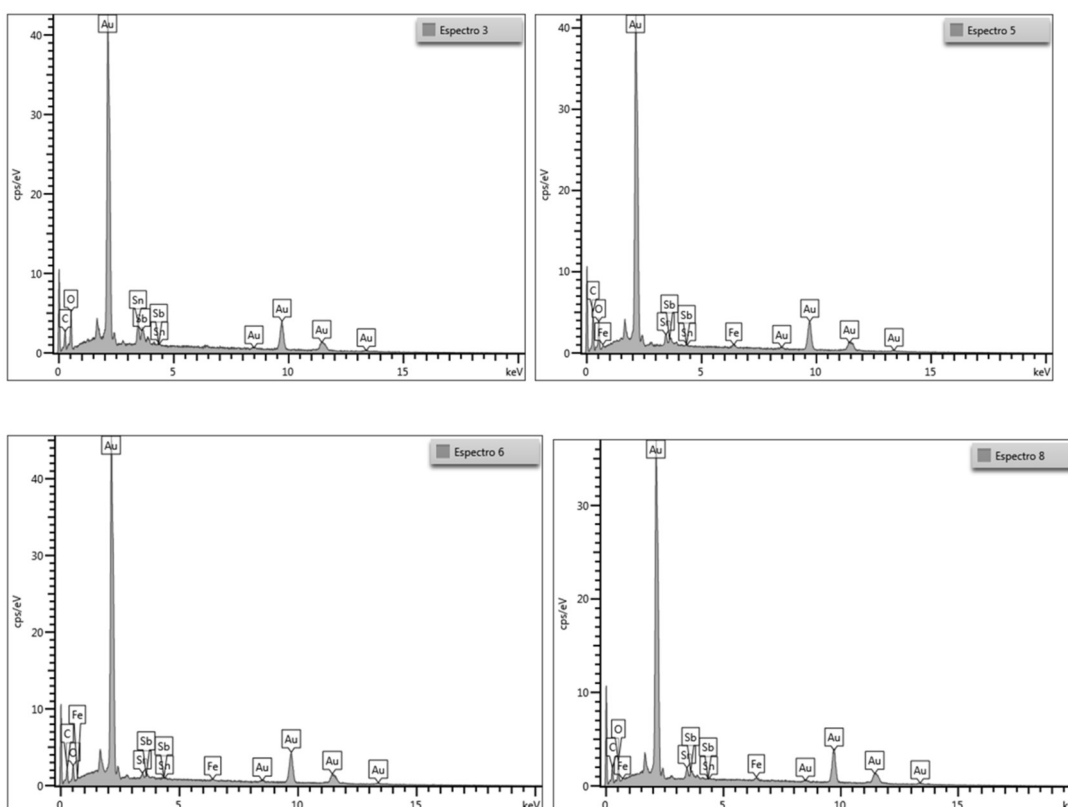


Figuras 8a (imagem superior esquerda), 8b (imagem superior direita), 8c (imagem inferior esquerda) e 8d (imagem inferior direita).

Amostras de pinos após ataque químico, observadas em microscopia eletrônica de varredura na ESALQ. Os círculos mostram as áreas analisadas com EDS. Fotos: profs. Drs. Elliot W. Kitajima / Francisco A. O. Tanaka

Tabela 2: Análise semi-quantitativa dos pinos mostrados nas Figuras a partir do EDS em microscopia eletrônica de varredura realizada na ESALQ. Os valores estão em % em peso.

	Amostra (Figura 8a)	Amostra (Figura 8b)	Amostra (Figura 8c)	Amostra (Figura 8d)
C	8,54	8,50	6,98	16,64
O	13,63	7,13	12,60	11,21
Sn	8,06	2,27	8,25	3,87
Sb	4,04	1,43	4,85	1,63
Au	85,27	80,20	65,54	65,88
Fe	-	0,47	1,79	0,76



Figuras 9a (imagem superior esquerda), 9b (imagem superior direita), 9c (imagem inferior esquerda) e 9d (imagem inferior direita).

Espectros EDS obtidos com microscópio eletrônico de varredura da ESALQ. As análises são das amostras indicadas nas Figuras. A seqüência dos espectros é a mesma

das amostras. Tendo em vista as imagens e as análises dos pinos antes dos ataques químicos, observa-se que os pinos são um cilindro de cobre coberto por uma fina (espessura da ordem de microns) folha feita de uma liga feita predominantemente de ouro com quantidades menores de níquel e de ferro. Por outro lado, após o ataque químico, resta a folha metálica, que se mostrou feita predominantemente de ouro, havendo quantidades menores de ferro, antimônio e estanho.

O carbono detectado nas amostras é proveniente da fita adesiva utilizada para fixar as amostras no suporte (ver Figura 4), e o oxigênio é proveniente de óxidos e outros compostos metálicos formados pela reação dos metais com o ácido nítrico (HNO_3). O estanho e antimônio são possivelmente resíduos da solda usada para prender os pinos às placas das CPUs. Os núcleos dos pinos são de cobre, e envolvidas por uma folha de dimensões micrométricas de ouro em liga com quantidades menores de níquel e ferro. Após o ataque ácido, as folhas formadas são predominantemente de ouro, com pequenas quantidades de ferro e sem níquel detectável.

Conclusões

As análises realizadas com o emprego de microsonda eletrônica e microscopia eletrônica de varredura puderam ser feitas sem a necessidade de dissolução química ou outro método destrutivo das amostras. Estes métodos destrutivos, além de demorados, utilizam ácidos como o nítrico e o clorídrico, sendo que para dissolver o ouro, é necessário o uso de água-régia, uma mistura dos ácidos supracitados. Logo, as amostras podiam ser utilizadas para outros tipos de análises caso fosse necessário.

Assim, com pouca preparação, as amostras puderam ter suas características químicas rapidamente determinadas, tanto qualitativamente quanto semi-quantitativamente. O tempo necessário para estas análises foi de, no máximo, duas horas, incluindo o tempo gasto na escolha dos pontos de análises. Um bônus adicional é que imagens das amostras puderam ser obtidas, sendo de especial interesse as imagens de eletros retroespalhados, ou BSE, que permitem fazer imagens onde aparecem as maiores concentrações de um determinado elemento.

As análises confirmaram a presença de ouro nas amostras a serem recicladas, porém misturado com outros metais, como o níquel. Antes do ataque ácido, também pode ser detectada a presença de outros metais base, notadamente o cobre. Após o

ataque ácido, verificou-se que o níquel e cobre foram dissolvidos pelo ácido, permanecendo apenas a folha de ouro.

Este resultado permite determinar também que o método de ataque ácido é eficiente na separação da maioria dos metais base do ouro, e sendo assim, a microscopia eletrônica e amicrossonda são ferramentas importantes na determinação da eficiência das diversas fases de reciclagem na separação do ouro, e conseqüentemente, ferramentas importantes nos trabalhos de reciclagem do lixo-eletrônico.

Esta parte reveste-se de importância considerando os valores de ouro no mercado em períodos de crise. Observou-se que a quantidade de ouro recuperado é relativamente pequena, porém isso se deveu a quantidade pequena de amostras. Considerando o volume de e-lixo produzido anualmente, a quantidade de ouro potencialmente recuperável indica que sua viabilidade econômica sem dúvida merece maior atenção.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem os professores Elliot Watanabe Kitajima e Francisco A. O. Tanaka, ambos do Núcleo de Apoio a Microscopia Eletrônica Aplicada a Agricultura (NAPMEPA) da Escola Superior de Agronomia Luiz de Queirós da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP), localizado na cidade de Piracicaba, pelo uso do microscópio eletrônico de varredura; professor Nilsson Francisquini Botelho, pelo uso da microsonda eletrônica do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UnB) e aos técnicos dos laboratórios da Universidade Católica de Brasília (UCB).

Bibliografia Consultada

BALDÉ, C. P.; WANG, F.; KUEHR, R. e HUISMAN, J.. **The Global e-waste monitor – 2014**. United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany, 2015.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável**. 2ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I. e MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras. Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007

FRANCO, M. N. S. **Reciclagem do ouro de pinos de processador-CPU a partir de resíduo eletroeletrônico.** Monografia. Curso de Engenharia Ambiental. Universidade Católica de Brasília. 2015.

FURLANI, B.. Para gestoras de fortunas, proteções para o patrimônio estão caras, e o momento é de preservar caixa. **Seudinheiro.** 6 / 04 / 2020. Disponível em: V <https://www.seudinheiro.com/2020/economia/prioridade-das-gestoras-de-fortuna-agora-e-preservar-caixa/> >. Acesso em junho de 2020.

GRAY, T. **Os Elementos: Uma exploração visual dos átomos conhecidos no universo.** São Paulo: Blucher, 2011.

KLEIN, C. **Manual of Mineral Science.** John Wiley & Sons, 22ª edição, 2002

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental.** 4ª ed. Rio de Janeiro, ABES. 2006. 388 p.

RESTREPO, O. J. e GOMEZ, H. O. **Methodology for recovery precious metals: gold, silver and platinum group from electronic waste.** In: ZHANG, L. e KRUMDICK, G. K. (eds.) Recycling of Electronic Waste II. Proceedings of the second symposium. TMS (The Mineral, Metals & Materials Society), 2011. Págs. 81 – 87.

REUTERS. **Timeline: Gold's history as a currency standard.** Postado em 8 / 11 / 2010. Disponível em: < <https://uk.reuters.com/article/us-goldstandard/timeline-golds-history-as-a-currency-standard-idUKTRE6A71J120101108> >. Acesso em janeiro de 2020.

SANTANA, A. L. **Processo químico de reciclagem do ouro e da prata oriundos de resíduos eletroeletrônicos.** Monografia. Curso de Engenharia Ambiental. Universidade Católica de Brasília. 2016.

ULRICH, F. Ouro não é mais dinheiro e não voltará a ser. **Infomoney.** 27 / 07 / 2015. Disponível em < <https://www.infomoney.com.br/colunistas/moeda-na-era-digital/ouro-nao-e-mais-dinheiro-e-nao-voltara-a-ser/> > . Acesso em janeiro de 2020.

WINTER, J. D. **Principles of Igneous and Metamorphic Petrology.** Prentice Hall, 2ª edição, 2010.