

III-335 - ESTUDO DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: CARACTERIZAÇÃO DE COBRE PRESENTE NAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCIs) DE COMPUTADORES OBSOLETOS VISANDO À PRODUÇÃO DE NANOPARTÍCULAS

Thamiris Auxiliadora Gonçalves Martins⁽¹⁾

Cursa Mestrado pelo Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PQI/USP). Pós-Graduação (Especialização) em Engenharia de Segurança do Trabalho pela PUC-Minas /Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2018), Graduação em Engenharia Civil pela UFTM-Universidade Federal do Triângulo Mineiro (2014) e Curso Técnico em Edificações pelo CEFET/MG (2008).

Karen Espina Gomes⁽²⁾

Cursa Graduação em Engenharia Química, Faculdades Oswaldo Cruz.

Carlos Gonzalo Alvarez Rosario⁽³⁾

Pós-Doutorado (atualmente) e Doutorado (2017) pelo Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PQI/USP). Mestrado em Engenharia Civil - Hidráulica pela Universidade de São Paulo (2007). Graduação em Engenharia Industrial pela Universidad de Ibagué (1998).

Denise Crocce Romano Espinosa⁽⁴⁾

Graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo (1995). Mestrado (1998) e Doutorado (2002) em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo. Professora Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP (2009 a 2014). Atualmente, é Professora Associada do Departamento de Engenharia Química da Universidade de São Paulo.

Jorge Alberto Soares Tenório⁽⁵⁾

Professor Titular do Departamento de Engenharia Química da Universidade de São Paulo (2005). Engenheiro Metalurgista pela Universidade de São Paulo (1984). Mestrado e Doutorado em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo (1988, 1992). Professor Livre-Docente pela Escola Politécnica (1996). Sabático no Department of Materials Science and Engineering do Massachusetts Institute of Technology (2001).

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo (USP), Rua do Lago, 250 – CEP 05508-080 São Paulo, SP – Brasil, Tel.: (11)30919120, e-mail: thamirisagm@hotmail.com

RESUMO

O crescente número de usuários de equipamentos eletroeletrônicos e a diminuição do tempo de vida dos produtos tem propiciado o aumento do volume e diversidade dos resíduos de equipamentos elétricos e eletroeletrônicos. As placas de circuito impresso fazem parte dos equipamentos eletroeletrônicos e representam, em massa, de 3% a 5% destes resíduos e sua composição varia conforme sua aplicação e período de fabricação, contendo polímeros, cerâmicas e metais. Estima-se que existam de 16 a 30% de cobre (em massa) nos metais presentes em PCIs, enquanto que no minério, este valor varia de 1 a 3%. No presente estudo foi realizada a caracterização de PCIs, do tipo placa mãe, para a determinação e quantificação do cobre (Cu) presente, de forma a estudar a influência deste metal e das etapas de processamento físico das placas em processos futuros de síntese de nanopartículas. Foi realizado o processamento físico (desmantelamento, cominuição e separação magnética) e caracterização das PCIs (granulometria, análise química, ensaio de perda ao fogo e observação por Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV acoplado a um espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) e Microscópio Estéreo, para quantificação do cobre e a influência das etapas do processamento físico na sua recuperação. Na etapa de cominuição 97% das partículas possuíam dimensões abaixo de 2mm. Foram obtidas na separação magnética, respectivamente cerca de 19,70% e 30,40% de Cu na fração magnética e não-magnética. Na caracterização química em ácido nítrico menos de 1% do Cu foi lixiviado. A composição da amostra foi de cerca de 42% de metais, 29% de materiais cerâmicos e 29% de polímeros. Foram verificadas, duas camadas de cobre intercaladas com um substrato composto por fibra de vidro e resina. Constatou-se que a fibra de vidro é composta de silício e cálcio. Pode-se ver ainda que, em todo o substrato, juntamente com a fibra de vidro, existe uma resina composta por alumínio e carbono. Espera-se que, através das análises realizadas neste trabalho, a reciclagem de cobre através da síntese de nanopartículas possa ser uma alternativa viável no tratamento e recuperação de metais a partir de resíduos eletroeletrônicos.

PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem REEE, Caracterização PCI, Nanopartículas.

INTRODUÇÃO

Os equipamentos eletroeletrônicos (EEE) possuem diferentes aplicações e podem ser utilizados para os mais diversos fins. De acordo com características e aplicações em comum, é possível encontrar os aparelhos eletrônicos divididos em categorias (FEPAM, 2016): linha branca (refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar); linha marrom (monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras); linha azul (batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras) e linha verde (computadores desktop e laptops, acessórios de informática, tablets e telefones celulares).

O crescente número de usuários de equipamentos eletroeletrônicos e os rápidos avanços tecnológicos impulsionam a inovação e o desenvolvimento econômico, ambiental e social. Assim, grande parte das pessoas possui mais de um dispositivo de tecnologia de informação e comunicação, e os ciclos de substituição dos telefones celulares e dos computadores, além dos outros dispositivos e equipamentos eletroeletrônicos, estão se tornando cada vez mais curtos, reduzindo a vida útil destes EEE, aumentando o volume e diversidade de resíduos de equipamentos elétricos e eletroeletrônicos (REEE) gerados. A reciclagem destas sucatas, neste contexto, pode trazer benefícios em termos de oferta de recursos brutos, além de contribuir para a redução da poluição ambiental e dos riscos à saúde humana, relacionados à liberação de substâncias, como chumbo, o mercúrio e o cádmio, pelo descarte indiscriminado ou destinação inadequada das mesmas (MARRA et al., 2018; ZENG et al., 2017; ROSARIO et al., 2014; SANTOS et al., 2014).

As placas de circuito impresso (PCIs) fazem parte dos equipamentos eletroeletrônicos (VEIT et al., 2006), representam, em massa, de 3% a 5% dos REEE (LI et al., 2004; KAYA, 2016) e sua composição varia conforme sua aplicação e período de fabricação, contendo polímeros, cerâmicas e metais. Segundo Moraes (2011), as PCIs são constituídas, essencialmente, por três partes básicas: o substrato não condutor, ou laminado, o substrato de circuitos impressos condutores e os componentes ligados ao substrato (componentes elétricos). Os metais típicos presentes nas PCIs são cobre (Cu), estanho (Sn), chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr), zinco (Zn), níquel (Ni) e manganês (Mn) (FRANCO e BARROS, 2016; AWASTHI e LI, 2017; HADI et al., 2015). Diversos estudos, como o de Silvas (2014); Hadi et al. (2015); Yamane et al. (2011) e Franco e Barros (2016), estimam que existam de 16 a 30% de cobre (em massa) nos metais presentes em PCIs. Segundo Gerbase e Oliveira (2012), após as etapas de cominuição e classificação granulométrica (processamento mecânico das PCIs), obtém-se um concentrado com cerca de 24% de cobre, enquanto que no minério, o valor varia de 1 a 3% de cobre.

Após a recuperação do metal, é possível atribuir valor econômico a ele e reutilizá-lo na fabricação de outros produtos, por exemplo, transformando-o em nanopartículas (NPs). Mdlovu et al. (2018) recuperaram Cu da solução (resíduo) gerada a partir da fabricação de PCIs. Através do método de microemulsão, realizaram a síntese de NPs de Cu com formato esférico e diâmetros de 20 a 50nm. Yousef et al. (2018) estudaram a utilização do Cu recuperado da reciclagem de PCIs como matéria prima para a sintetizar nanopartículas de Cu. Obtiveram resultados de CuNPs com diâmetro médio de 5nm, rendimento de síntese de 84% (nanopartículas/massa de cobre recuperado) e custos de preparação quatro vezes menores que os valores comerciais de CuNPs similares.

De acordo com Blossi et al. (2016) e Jain et al. (2015), as NPs têm atraído atenção pela possibilidade de serem aplicadas em diferentes áreas, devido às suas propriedades ópticas, elétricas, mecânicas e catalíticas. Na indústria, por exemplo, as nanopartículas de cobre podem ser utilizadas para a produção de tintas antiincrustantes de barco, de hidrogénio a partir de células solares, fármacos, filtros solares, entre outros (LALAU, 2014).

No presente estudo é apresentado o processo de caracterização de PCIs, do tipo placa mãe, provenientes de computadores obsoletos. Objetiva-se a determinação e quantificação do Cu presente, de forma a estudar a influência deste metal e das etapas de processamento físico das placas em processos futuros de síntese de nanopartículas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas placas de circuito impresso, Figura 1a, livres de chumbo (*lead free*), provenientes de equipamentos eletroeletrônicos (computadores) obsoletos, de fabricantes diversos, que foram cedidas pelo CEDIR-USP (Centro de Descartes e Reuso de Resíduos de Informática da Universidade de São Paulo).

Realizou-se o processamento físico (desmantelamento, cominuição e separação magnética) e caracterização das PCIs (granulometria, análise química, ensaio de perda ao fogo e observação por Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV acoplado a um espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X-EDS e Microscópio Estéreo), para quantificação do cobre e a influência das etapas do processamento físico na sua recuperação.

O PROCESSAMENTO FÍSICO

Inicialmente, foi realizada o desmantelamento manual (figura 1b), para remoção das partes móveis como capacitores e parafusos. Cerca de 5kg de amostras foram trituradas no moinho de facas (RONE, FA2305) com grade de 9mm, 3mm e 2mm, respectivamente (figura 1c). Para a homogeneização e minimização de erros, o material resultante foi quarteado em frações de 20 ± 5 g e 10 ± 5 g em um Quarteador Johnes (figura 1d).

Para obter a separação do material triturado em porções magnéticas e não-magnéticas, cerca de 580g deste material foi introduzido em um separador magnético de tambor seco (Inbras, HFRE- $\phi 15 \times 12$ ") a 27,6rpm de velocidade de rotação do rolo magnético e 25% de vibração de energia.

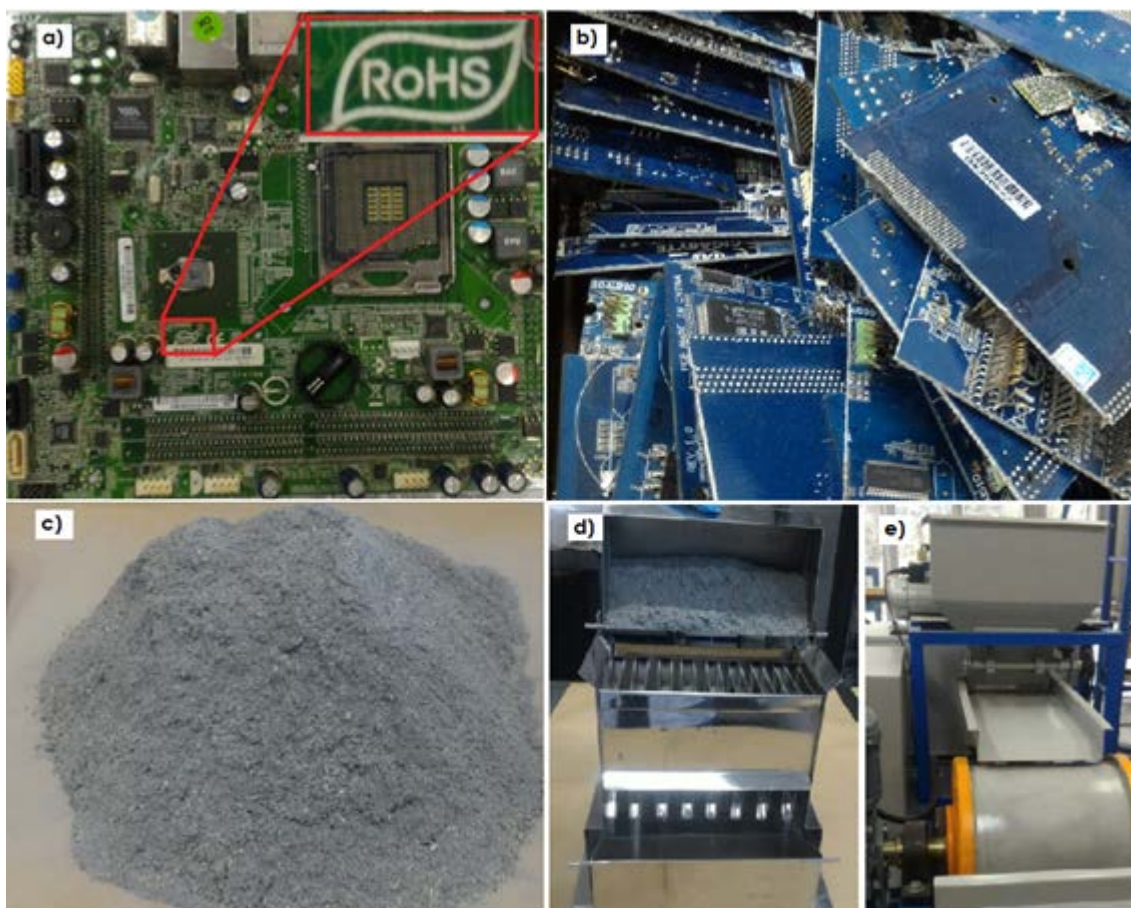


Figura 1: a) Placas de Circuito Impresso livres de Chumbo; b) Desmantelamento; c) e d) Cominuição e quarteamento; e) Separação magnética da amostra cominuída.

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para a análise granulométrica, 20g da amostra foram submetidos à vibração (com Agitador A BROZINOX), durante 15 minutos, em peneiras vibratórias de aberturas: 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm, 0,075mm e 0,038mm e inferior. Os resultados foram expressos como porcentagem de peso.

Para a caracterização química, cerca de 10g das parcelas obtidas por separação magnética foram digeridas em água régia por 24h e depois em ácido nítrico por 2h, ambas à temperatura e pressão ambiente, com relação sólido-líquido de 1:20. O licor contendo os resíduos não lixiviados resultantes de cada digestão foi filtrado a vácuo em papel filtro de 7,5µm de porosidade para separar a fração sólida da líquida. Os sólidos não solúveis, após filtração, foram submetidos à lixiviação com ácido nítrico, nas mesmas condições e razão sólido-líquido, a fim de verificar a presença de metais remanescentes no extrato lixiviado resultante da primeira digestão. Todos os extratos lixiviados foram analisados por Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado (ICP-OES), com o objetivo de verificar os metais contidos nas amostras, com ênfase no cobre.

No ensaio de perda ao fogo, as frações sólidas obtidas na filtração foram secas em forno por 24h na temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$. Posteriormente, foram transferidos para vasos cerâmicos e colocados em uma mufla com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até atingir 800°C , onde permaneceram em temperatura constante por 1 hora. Depois que a mufla foi desligada e resfriada, as amostras foram removidas e pesadas novamente para o cálculo da perda de massa (diferença entre a massa inicial e final). A perda de massa representou a quantidade de material que corresponde à fração do polímero presente na PCI. O material remanescente referiu-se à quantidade de materiais cerâmicos.

As observações por MEV-EDS (PHENOM PRO X) e Microscópio Estéreo (ZEISS STEMI 2000-C) foram realizadas na seção transversal do substrato da placa (as quais foram embebidas em resina fria e então incorporadas em uma série de pastas de água no. 320, 400, 600 e 1200).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A etapa de cominuição teve como objetivo a liberação dos materiais (metálicos, cerâmicos e poliméricos) das placas de circuito impresso e o aumento da área superficial das partículas, para facilitar a recuperação dos metais (YAMANE et al., 2011).

Na Figura 2 pode ser observada a distribuição granulométrica das partículas após a cominuição.

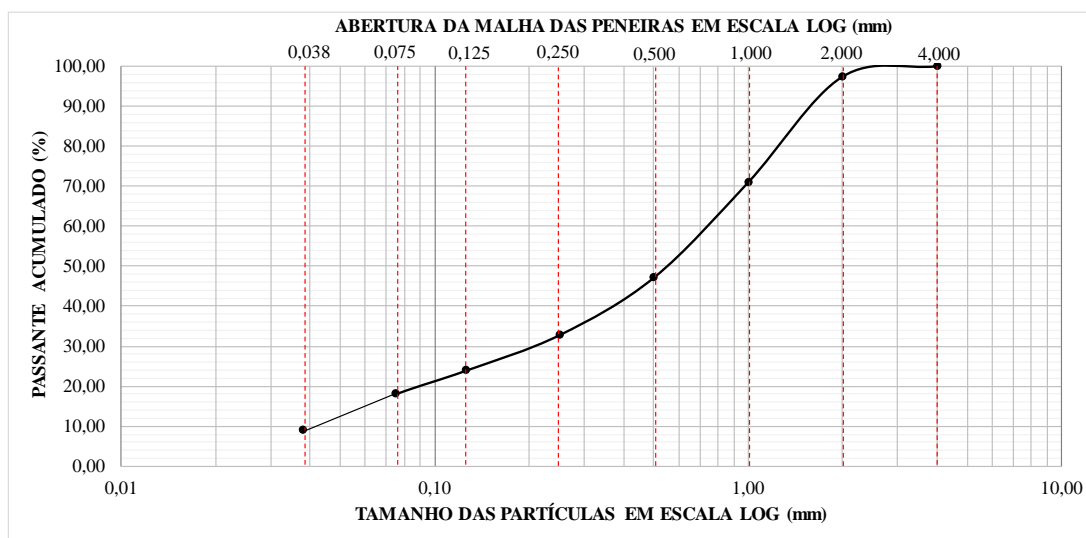


Figura 2: Curva da fração passante acumulada em função da dimensão das partículas da amostra.

Através da análise da curva granulométrica, pode ser observado que 97% das partículas apresentaram granulometria abaixo de 2mm. Segundo Zhang e Forssberg (1997), a liberação completa do cobre ocorre em uma fração granulométrica menor que 2mm, já que em partículas com granulometria acima deste valor, pode

haver o encapsulamento dos fios e pinos de cobre associados a plásticos. Por isso, pretendeu-se obter faixas granulométricas abaixo de 2mm e verificando a eficiência do processo de cominuição (SILVAS, 2014).

A separação magnética, segundo Moraes (2011), é importante para evitar a interferência do ferro (localizado na fração magnética) durante as etapas de lixiviação ácida no processo de extração hidrometalúrgico do Cu. Portanto, foi realizada a separação dos materiais em duas frações distintas (uma magnética e outra não-magnética), Figura 1e, objetivando que a maior porcentagem de concentração do cobre fosse constatada na fração não-magnética da amostra (CALDAS, 2017). Conforme os parâmetros adotados, foram constatados valores totais de concentração de Cu para a fração magnética e não-magnética, respectivamente, cerca de 19,70% e 30,40%.

Os resultados da caracterização química do Cu presente na fração magnética e não-magnética são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização química do Cu após separação magnética.

AMOSTRA	ÁGUA REGIA (% Cu)	HNO ₃ (% Cu)	LIXIVIAÇÃO TOTAL (% Cu)
NÃO -MAGNÉTICA	30,23	0,16	30,39
MAGNÉTICA	19,66	0,01	19,67

A lixiviação em ácido nítrico após a água-régia não representou uma vantagem na caracterização do Cu presente nos PCIs. Visto que para as duas frações estudadas foi lixiviado menos de 1% do Cu presente nas PCIs.

Após a digestão química, a amostra não apresentaria metais, pois os materiais insolúveis nesta etapa são compostos por materiais cerâmicos e poliméricos. Os polímeros são suscetíveis à degradação térmica, portanto, o ensaio de perda ao fogo permite determinar a massa da fração polimérica através do balanço de massa entre a diferença de massa anteriormente e após o aquecimento na mufla. O material restante, não volátil, corresponde ao material cerâmico das PCIs (CARVALHO et al., 2018).

Os resultados do ensaio de perda ao fogo são apresentados na Figura 3.

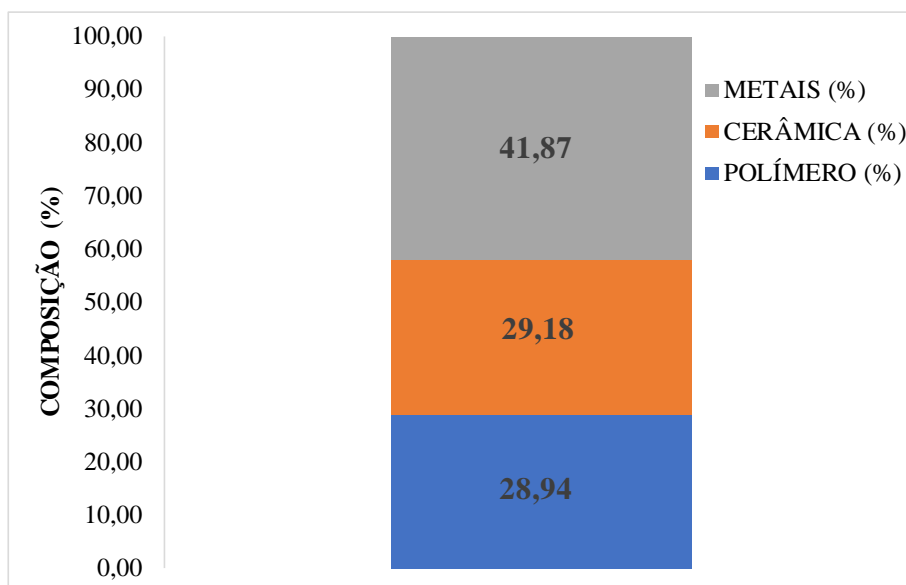


Figura 3: Composição Das PCIs-Metais, Cerâmica e Polímeros.

A amostra é composta por cerca de 42% de metais, 29% de materiais cerâmicos e 29% de polímeros. Carvalho et al. (2018) em seus estudos constatou cerca de 35%, 39% e 26%, respectivamente, para o mesmo tipo de

PCIs. Caldas (2017) constatou cerca de 30% de polímeros, 30% de materiais cerâmico e 40% de metais. A diferença entre os valores constatados pode ser justificada pelo ano de fabricação das placas estudadas, que são desconhecidos.

Para a análise de MEV-EDS, a amostragem da PCI foi selecionada visualmente, em local onde não haviam trilhas de cobre aparentes, para identificação da composição do substrato e da disposição e quantidade de camadas de Cu. As Figuras 4b e 4a apresentam, respectivamente, a amostra de PCI embutida em resina e a imagem de elétrons retro-espalhados e EDS dos principais pontos da amostragem.

Na Figura 4a, foi possível visualizar as trilhas de cobre, que formam a camada interna do substrato, assim como as fibras em formato senoidal e a área cinza escura representando, possivelmente, a resina. Através dos espectros de EDS dos pontos analisados, verifica-se que o ponto 1 refere-se a resina da parte mais externa da placa, que é composta de silício, enxofre e bário predominantemente. Os pontos 2 e 3 correspondem às camadas de cobre da PCI; o ponto 4 apresenta a resina do substrato com composição predominante de alumínio e o ponto 5 situa-se na fibra de vidro do substrato sendo composta por silício e cálcio.

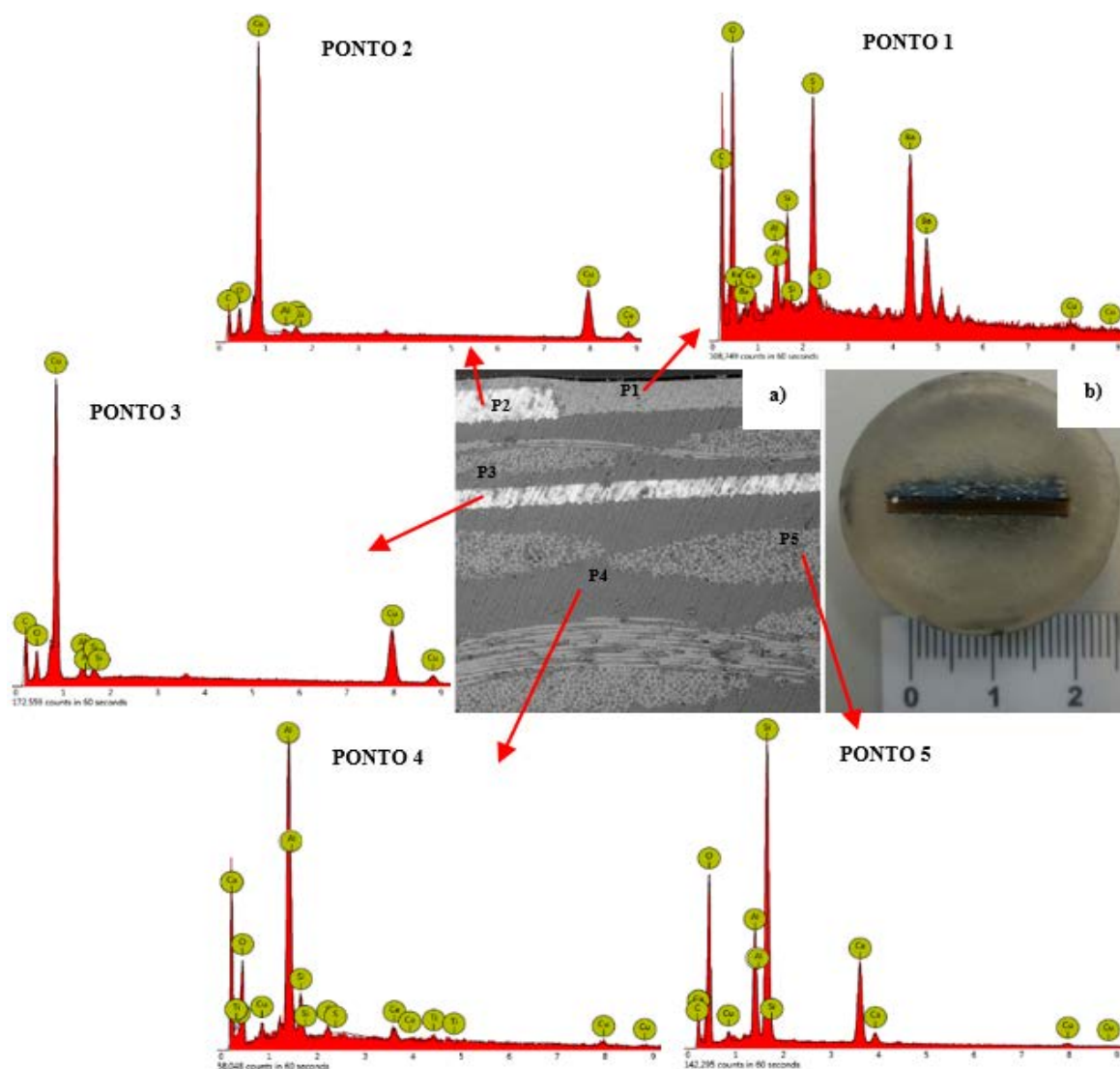


Figura 4: a) Imagem de elétrons retro-espalhados (MEV) e EDS dos pontos da amostragem; b) Amostra de PCI embutida em resina.

Nas Figuras 5a e 5b, respectivamente, é observada a imagem em Microscópio Estéreo do ponto de amostragem da placa PCI-mãe e o detalhamento onde foi realizada a análise de MEV/EDS. Foi realizado o mapeamento da área detalhada da Figura 5c para verificação da combinação dos elementos presentes em sua composição.

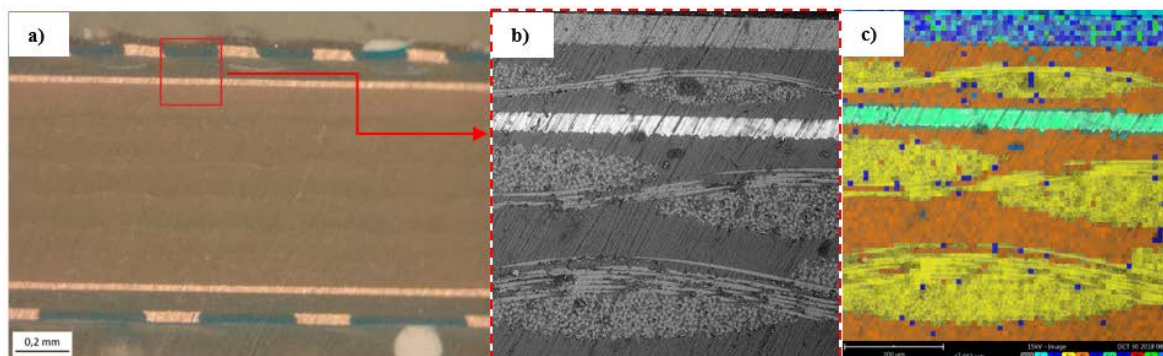


Figura 5: a) Imagem em Microscópio Estéreo do ponto de amostragem da placa; b) Região de análise de MEV/EDS; c) Mapeamento da área detalhada para verificação da combinação dos elementos presentes em sua composição.

Na Figura 6 é possível observar o mapeamento dos elementos predominantemente presentes na amostragem.

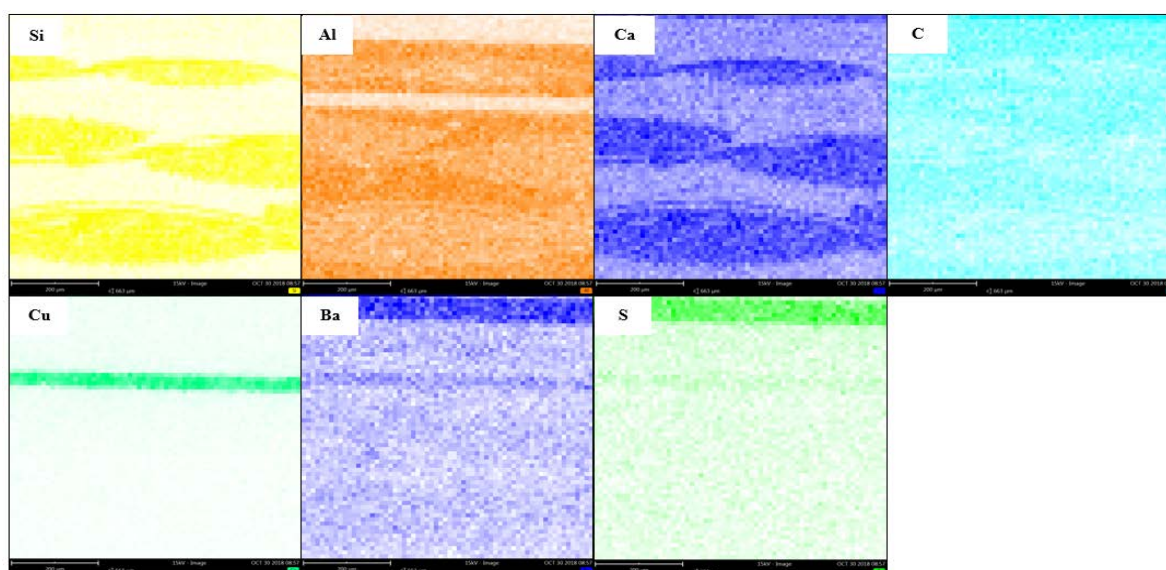


Figura 6: Mapeamento dos elementos predominantemente da amostragem.

A análise das imagens do mapeamento da Figura 6 confirma que a composição da amostragem, tanto das camadas de cobre como do substrato. Foram verificadas duas camadas de cobre intercaladas com um substrato composto por fibra de vidro e resina. Constatou-se que a fibra de vidro é composta de silício e cálcio. Pode-se ver ainda que, em todo o substrato, juntamente com a fibra de vidro, há uma resina composta por alumínio e carbono e as camadas de cobre bem definidas.

CONCLUSÕES

Após a etapa de cominuição foram constatadas cerca de 97% das partículas com granulometria abaixo de 2mm.

Através do processo de separação magnética, foi possível a obtenção duas frações: fração magnética (19,70% de Cu) que concentra ferro; e fração não-magnética (30,40% de Cu), que concentrou o cobre.

A lixiviação em ácido nítrico após a água-régia não representou vantagem na caracterização do Cu presente nos PCIs. Visto que para as duas frações estudadas foi lixiviado menos de 1% do Cu presente nas PCIs.

A composição da amostra foi de cerca de 42% de metais, 29% de materiais cerâmicos e 29% de polímeros.

Pelas análises de MEV-EDS e Microscópio Estéreo, foi realizada a observação das placas com relação as camadas de cobre. Foram verificadas duas camadas de cobre intercaladas com um substrato composto por fibra de vidro e resina. Constatou-se que a fibra de vidro é composta de silício e cálcio. Pode-se ver ainda que, em todo o substrato, juntamente com a fibra de vidro, existe uma resina composta por alumínio e carbono.

Espera-se que, através das análises realizadas neste trabalho, a reciclagem através da síntese de nanopartículas de Cu possa ser uma alternativa na recuperação de Cu presente nas PCIs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AWASTHI, A. K.; LI, J. An overview of the potential of eco-friendly hybrid strategy for metal recycling from WEEE. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 126, p. 228-239, Nov. 2016.
2. BLOSI, M.; ORTELLI, S.; COSTA, A. L.; DONDI, M.; LOLLI, A.; ANDREOLI, S.; BENITO, P.; ALBONETTI, S. Bimetallic Nanoparticles as Efficient Catalysts: Facile and Green Microwave Synthesis. *Materials (MDPI)*, p. 1-25, Jul. 2016.
3. CALDAS, M. P. K. Síntese de nanopartículas de prata a partir da reciclagem de placas de circuito impresso. São Paulo, 2017. 154p. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química, São Paulo, 2017.
4. CARVALHO, M. A. DE; ANDRADE, L. M. DE; ESPINOSA D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. *Proceedings SUM2018, Fourth Symposium on Urban Mining*, p. 21-23, Mai. 2018.
5. FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental. Diretriz Técnica para o Licenciamento Ambiental de Atividades Envolvendo Equipamentos Eletroeletrônicos, 2016. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/CENTRAL/DIRETRIZES/DT-003-2016.PDF>> Acesso em: 30 de outubro de 2018.
6. FRANCO, R. G. F.; BARROS, R. T. DE V. Revisão das técnicas utilizadas na recuperação de metais em resíduos de placas de circuito impresso (RPCI). VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Campina Grande/PB (ConGea), IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, p. 1-8, Nov. 2016.
7. GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C.R. DE. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. *Química Nova*, v. 35, n. 7, p. 1486-1492, Abr. 2012.
8. HADI, P.; XU, M.; LIN, C. S.K.; HUI, C.W.; MCKAY, G. Waste printed circuit board recycling techniques and product utilization. *Journal of Hazardous Materials*, v. 283, p. 234-243, Abril 2015.
9. JAIN, S.; JAIN, A.; KACHHAWAH, P.; DEVRA, V. Synthesis and size control of copper nanoparticles and their catalytic application. *Transactions Nonferrous Metals Society of China*, v. 25, p. 3995-4000, Jun. 2015.
10. KAYA, M. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management*, v. 57, p. 64-90, Ago. 2016.
11. LALAU, C. M. - Avaliação da toxicidade de nanopartículas de óxidos de cobre através de macrófitas da espécie *Landoltia punctata*. Florianópolis, 2014. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
12. LI, J., SHRIVASTAVA, P.; GAO, Z.; ZHANG, H. C. Printed Circuit Board Recycling Methods. *Workshop Materials on WEEE Management in Taiwan*, v. 27, p. 33-42, Jan. 2004.
13. MARRA, A.; CESARO, A.; RENE, E. R.; BELGIORNO, V.; LENS, P. N. L. Bioleaching of metals from WEEE shredding dust. *Journal of Environmental Management*, v. 210, p. 180-190, Dez. 2018.
14. MORAES, V. T. DE. Reciclagem de placas de circuito impresso de aparelhos celulares obsoletos. São Paulo, 2011. 119p. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química, São Paulo, 2011.
15. MDLOVU, N. V.; CHIANG, C. L.; LIN, K. S.; JENG, R. C. Recycling copper nanoparticles from printed circuit board waste etchants via a microemulsion process. *Journal of Cleaner Production*, p. 781-796, v. 185, Mar. 2018.
16. ROSARIO, C. G. A.; VEZZÁ, G. M.; SILVAS, F. P. C.; MORAES, V. T.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Caracterização de Placa de Circuito Impresso Proveniente de Computadores Obsoletos Visando Processamento Biohidrometalúrgico. 69º Congresso Internacional Anual da ABM. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 1-8, Jul. 2014.
17. SANTOS, C. A. F.; NEUTZLING, D. M.; NASCIMENTO, L. F. M. A. Gestão dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) e as Consequências para a Sustentabilidade: As Práticas de

- Descarte dos Usuários Organizacionais. Revista Capital Científico – Eletrônica (RCCe). v. 12. n.1, p. 17, Jan. 2014.
18. SILVAS, F. P. C. Utilização de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso. São Paulo, 2014. 144p. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química, São Paulo, 2014.
 19. VEIT, H. M.; BERNARDES, A. M.; FERREIRA, J. Z.; TENÓRIO, J. A. S.; Malfatti, C. D. F. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. Journal of Hazardous Materials, v. 137, n. 3, p. 1704-1709, Maio 2006.
 20. YAMANE, L.H.; MORAES, V. T. DE; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. Waste management (New York, N.Y.), v. 31, n. 12, p. 2553-2558, Jul. 2011.
 21. YOUSEF, S.; TATARIANTS, M.; MAKAREVICIUS, V.; LUKOŠIŪTĖ, S.; BENDIKIENE, R.; DENAFAS, G. Journal of Cleaner Production. p. 653-664, v. 185, Mar. 2018.
 22. ZENG, X.; YANG, C.; CHIANG, J. F.; LI, J. Innovating e-waste management: From macroscopic to microscopic scales. Science of the Total Environment, v. 575, p. 1-5, Abr. 2017.
 23. ZHANG, S.; FORSSBERG, E. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. Resources, Conservation and Recycling, v. 21, n.4, p. 247-269, Set.1997.