

Caracterização e beneficiamento primário de placas de circuito impresso (PCI) de telefones celulares

Characterization and primary processing of mobile phones printed circuit boards (PCB)

Theo Antonio de Jesus¹, Rui de Goes Casqueira².

Resumo

Devido ao constante avanço tecnológico, uma grande quantidade de aparelhos é descartada por obsolescência tecnológica ou defeitos. Isto acarreta a contaminação do solo e do lençol freático, além de representar perda econômica pois as PCI (placas de circuito impresso) dos telefones celulares são ricas em metais pesados e alguns metais valiosos. Com o objetivo de conhecer melhor a composição e concentração destas PCI de modo a otimizar os processos de reciclagem, foi realizada a caracterização das PCI através da digestão em água régia e da utilização das técnicas de DRx (difração de raios x) e FRx (espectrometria de fluorescência de raios x). Os resultados proporcionaram conhecimento suficiente a respeito da composição e concentração dos principais metais das PCI. A presença de ouro, prata e cobre chama a atenção para o potencial econômico destes resíduos. Estudos são necessários para desenvolver os processos mais adequados com vistas a concentrar estes metais e viabilizar sua reciclagem.

Palavras-Chave: Separação granulométrica. Sucata eletrônica. Metais. Reciclagem.

Abstract

Due to constant technological advances, many devices is ruled by technological obsolescence or defects. This leads to the contamination of soil and groundwater, and represents economic loss because the PCB (printed circuit boards) of mobile phones are rich in heavy metals and some valuable metals. In order to better understand the composition and concentration of these PCB to optimize the recycling process was performed to characterize the PCB through digestion in aqua regia and the use of XRD techniques (X-ray diffraction) and XRF (spectrometry of X-ray fluorescence). The results provided sufficient knowledge about the composition and concentration of the main metals of PCB. The presence of gold, silver and copper draws attention to the economic potential of this waste. Studies are necessary to develop the most appropriate processes in order to focus these metals and its improvement.

Keywords: Size separation. Electronic scrap. Metals. Recycling.

Como citar esse artigo. Jesus TA, Casqueira RG. Caracterização e beneficiamento primário de placas de circuito impresso (PCI) de telefones celulares Revista Teccen. 2015 Jul./Dez.; 08 (2): 53-64.

Introdução

Pouco mais da metade (52%) da população mundial vivia em áreas urbanas, em 2011, causando consideráveis impactos ao meio ambiente local, fazendo com que o gerenciamento dos resíduos sólidos seja um dos grandes desafios para os governantes e a maior preocupação para os ambientalistas (Nations, 2013). Os números divulgados sobre o assunto por entidades ambientalistas são preocupantes. Diferentes estratégias devem ser aplicadas para equacionar estes impactos, tais como a aplicação de tecnologias ambientais e o incremento de programas de reciclagem e reutilização (Christian Ludwig, 2003).

Ao alcançar o fim do seu ciclo de vida, o material usado perde valor econômico, tornando-se resíduo. De acordo com dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), cada pessoa no mundo gerou, em 2009, 1,59 tonelada de resíduo sólido. Já no Brasil, cada pessoa gerou, também em 2009, 0,29

tonelada de resíduo sólido (ABRELPE, 2012; PNUMA, 2011; United Nations, 2013).

Em relação aos resíduos coletados no Brasil em 2012, tem-se que 58% seguiram para aterros sanitários, praticamente sem alteração do cenário registrado no ano anterior. O percentual restante corresponde a 76 mil toneladas diárias que são encaminhadas para lixões ou aterros controlados, os quais pouco se diferenciam dos lixões, uma vez que ambos não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações. Quando isso acontece, além de poluir o meio ambiente, os componentes ou materiais que compõem esses resíduos estão deixando de se tornar reusáveis, recicláveis ou reaproveitáveis (ABRELPE, 2012).

O cenário atual é que novas fontes de energia e materiais estão cada vez mais escassas e difíceis de serem encontradas, assim como locais que possam ser usados para dispor resíduos a um baixo custo. Em consequência disto, a sociedade tem mostrado interesse

1. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-UFRRJ, Seropédica-RJ, Brasil.
2. Departamento de Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-UFRRJ, Seropédica-RJ, Brasil.

cada vez maior por meios de reutilização, reciclagem e reaproveitamento de materiais.

Inseridos nos resíduos sólidos estão os Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) que têm, em média, vida útil não muito longa, pois modelos mais modernos surgem a cada dia (Goosey & Kellner, 2002). A produção e consumo de EEE têm crescido muito nas últimas décadas, ao ponto de transformar o setor de EEE em um dos mais importantes da indústria nacional, com receita total de R\$ 156,7 bilhões e força de trabalho de 178.000 colaboradores no ano de 2013 (ABINEE, 2014). Tudo isso tende a gerar uma quantidade imensa de materiais obsoletos interessantes do ponto de vista econômico e preocupantes do ponto de vista ambiental.

Devido ao crescimento econômico, inovação tecnológica e expansão do mercado de EEE, há um aumento significativo da geração de resíduos eletroeletrônicos (REE), o que representa um desafio ambiental (He *et al.*, 2006; Khetriwal, Kraeuchi, & Widmer, 2009). Na região da União Europeia (UE) foram introduzidas diretrizes para os REE e para restrição de substâncias perigosas RoHS objetivando gerenciar corretamente o crescente fluxo de REE (European Commission, 2003a, 2003b). Por força destas diretrizes, as inovações significativas são feitas pelos fabricantes para eliminar resíduos (desperdício zero) no ciclo de vida dos produtos na Europa (Kumar *et al.*, 2005). A maioria dos países em desenvolvimento ainda tem de introduzir tais normas na gestão de resíduos (Nnorom & Osibanjo, 2008).

No Brasil não há método ou processamento tecnicamente viável que possa utilizar os EEE obsoletos ou purificá-los para disposição com menor dano ao meio ambiente. De um modo geral, EEE não recebem nenhum tratamento e são lançados em aterros sanitários ou lixões junto com o resíduo doméstico. Como solução para este problema, tem-se o reaproveitamento dos metais e polímeros contidos nos EEE. Assim, deixarão de ser desperdiçadas quantidades de metais e polímeros que poderão gerar receita, já que estes compostos são indispensáveis aos processos de fabricação.

A reciclagem de lixo eletrônico resulta em uma série de benefícios tais como a economia de energia e redução de contaminações, quando sucatas de ferro e aço são usados em vez de materiais virgens, ocasionando significativa economia de energia (Cui & Forssberg, 2003) (Cui & Zhang, 2008).

O processo de reciclagem de lixo eletrônico é dividido nas etapas de desmontagem, visando selecionar componentes perigosos ou valiosos para tratamento especial, a de enriquecimento, onde se usam processos mecânico e/ou metalúrgico para concentrar materiais desejáveis e a de refino onde materiais são recuperados ou purificados por meio químico, de modo a se tornarem adequados em seus usos originais (Cui & Forssberg, 2003).

Em placas de circuito impresso (PCI) de telefones celulares os metais preciosos correspondem a mais de 80% do valor do aparelho, embora represente apenas 1% do seu peso. Consequentemente, um dos principais atrativos para reciclagem de lixo eletrônico na indústria é a reciclagem de metais preciosos (Cui & Zhang, 2008).

A composição de metais nas PCI varia de acordo com o modelo e o ano de fabricação do telefone celular. Em vista disto, este trabalho tem como objetivo a caracterização destas PCI de modo a auxiliar na definição dos processos que serão utilizados, isoladamente ou em conjunto, visando à recuperação e reciclagem dos materiais que compõem um aparelho de telefone celular. Esta caracterização será realizada por meio das técnicas de DRx (difração de raios x), FRx (espectrometria de fluorescência de raios x) e pela lixiviação do material em água régia.

Materiais e Métodos

Os aparelhos de telefones celulares utilizados neste trabalho foram coletados em lojas de assistência técnica e doados por terceiros. Não foi feita a separação por marcas e modelos com o objetivo de retratar o que se encontra realmente na prática. Os processos realizados encontram-se descritos na Figura 1. As carcaças poliméricas, baterias e os outros componentes não fazem parte do escopo deste trabalho e foram armazenados para estudos futuros.

A primeira etapa do processamento consistiu no desmantelamento com objetivo de separar as PCI dos demais componentes do telefone celular que são a bateria, carcaça polimérica, visor de LCD e partes metálicas que foram armazenadas para estudos futuros.

Antes de serem encaminhadas ao processo de moagem, as PCI passaram por um britador de rolos lisos DENVER 10" x 6" para retirar as arestas metálicas e por uma picotadeira MOTOVAR AC MOTO DRIVE para reduzir suas dimensões. Este ensaio foi realizado com a cooperação do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

A moagem das PCI foi realizada em um moinho de facas com quatro lâminas móveis e duas fixas com potência de 2cv da marca M. S. MISTURA.

O material passou pelo moinho de facas até que fosse obtido diâmetro máximo de 1mm, uma vez que o grau de liberação dos metais é máximo para diâmetros menores que 2mm (Zhang & Forssberg, 1999).

Uma vez que todo o material atingiu diâmetro máximo de 1mm, foi realizada a separação em três frações (F1, F2 e F3) através de um separador da marca VIATEST com um conjunto de peneiras vibratórias cujos diâmetros de abertura eram de 1,15mm, 0,85mm

e 0,30mm.

O ensaio consistiu em adicionar 400g de material no topo do separador e promover a agitação por um período de 10min. Ao fim deste período, a amostra de cada fração foi pesada. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia (LABTEC) do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

Cada uma das três frações obtidas na separação granulométrica foi caracterizada pelas técnicas de DRx (difração de raios x) e FRx (espectrometria de fluorescência de raios x) e pela lixiviação por água régia.

A aplicação da Difração de Raios X (DRx) teve como objetivo pesquisar os principais metais presentes nas PCI. Neste ensaio foi utilizado o método do pó. Partiu-se de aproximadamente dois gramas de cada fração que foram uniformizadas de modo a formar um material fino e homogêneo. O equipamento utilizado foi um Difrátômetro da marca RIGAKU Miniflex II. Teve-se como condições de realização dos ensaios 30kV de tensão; 15A de corrente de filamento, o incremento de 0,02°, gama angular (2θ) 30-60 e o modo utilizado foi por degraus. A caracterização pela técnica de DRx foi realizada no Laboratório de Catálise do Departamento de Engenharia Química da UFRRJ.

A técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRx) foi aplicada com o objetivo de estimar as quantidades dos principais metais presentes nas PCI. Os raios X incidentes excitam os átomos constituintes da amostra, que por sua vez emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra. Esta análise foi realizada por meio da parceria com a Fábrica Carioca de Catalisadores (FCC) no Rio de Janeiro.

A lixiviação por água régia (solubilização da fração metálica) foi realizada no Laboratório de Monitoramento Ambiental do Departamento de Engenharia da UFRRJ. Este ensaio se deu através da digestão em água-régia (25% ácido nítrico PA / 75% ácido clorídrico PA) baseando-se em estudos anteriores que demonstraram alta eficiência deste agente para a solubilização de vários metais. Este experimento foi realizado a temperatura ambiente, com agitação, durante 24h, proporcionada por um agitador magnético (Lee, Rhee, & Sohn, 1997).

Os ensaios de digestão foram realizados obedecendo-se uma relação sólido/líquido (S/L) de 1/20, conforme estudos já realizados anteriormente (Zhang & Forssberg, 1999). Utilizou-se neste ensaio uma amostra de aproximadamente 10g de cada uma das frações das PCI moídas (Park & Fray, 2009; Yamane, de Moraes, Espinosa, & Tenório, 2011). Ao término da lixiviação, o sistema foi filtrado e o extrato lixiviado foi encaminhado para análise química e observou-se que o

material ficou retido no papel filtro após a lixiviação das PCI por água régia.

A análise química do extrato lixiviado foi feita através da técnica de ICP-OES, realizada por meio da parceria com o CETEM no Rio de Janeiro não tendo sido realizada em triplicata. Foram pesquisados os elementos: alumínio, ouro, prata, cobre, ferro, níquel, chumbo, estanho e zinco.

Resultados e Discussão

O desmantelamento dos telefones celulares produziu 2,38kg de PCI que foram encaminhadas para a moagem. Após esse processo foi identificada uma perda de massa de aproximadamente 4% obtendo-se 2,28kg de PCI após a moagem.

A perda física de material foi calculada pela equação 1 e pode ter sido causada, em grande parte, pelo fato de o moinho de facas utilizado comportar pequeno volume de material a cada seção de moagem. Como foram necessárias várias seções para moagem de todo o material, houve perda física de material devido ao ato de abrir e fechar várias vezes o compartimento do moinho.

$$P_f(\%) = |m_m - m_d| \times 100 / m_d \quad (1)$$

onde:

m_m – massa do material obtido com o processo de moagem

m_d – massa PCI obtida com o desmantelamento dos aparelhos de telefones celulares

P_f – perda física do processo de moagem

O material oriundo do processo de moagem foi separado em três frações através do separador granulométrico: F1: $d < 0,30\text{mm}$; F2: $0,30 < d < 0,85\text{mm}$ e F3: $0,85 < d < 1,15\text{mm}$ onde d representa o diâmetro de abertura da peneira utilizada no ensaio.

Os resultados obtidos após o ensaio de separação granulométrica estão representados na Tabela 1. A massa retida corresponde à massa das partículas que possuem diâmetro maior que o da abertura de cada peneira.

Tabela 1. Massa obtida através da separação granulométrica.

Frações	d (mm)	Massa retida (kg)	% Retido
F1	$d < 0,30$	0,23	10,95
F2	$0,30 < d < 0,85$	1,72	81,90
F3	$0,85 < d < 1,15$	0,15	7,14
m total		2,10	

A equação 2 foi utilizada para o cálculo da fração percentual retida que representa a massa retida em relação à massa total.

$$\%m_r = \frac{m_r \times 100}{m_f} \quad (2)$$

onde:

m_r – massa da amostra retida

m_t – massa total das três frações

Houve perda física de 0,18kg (2,28-2,10) em relação ao material oriundo do processo de moagem, que representa o valor de 7,78%. Esta perda foi calculada pela equação 3 e se deu em virtude do baixo diâmetro da fração F1, o que faz com que as partículas desta fração, por terem baixo peso, sejam de difícil manuseio.

$$P_f(\%) = |m_{moa} - m_{fra}| \times 100 / m_{moa} \quad (3)$$

onde:

m_{moa} – massa material oriundo processo de moagem

m_{fra} – massa total das três frações obtidas na separação granulométrica

Observou-se que o material moído se concentrou nas frações mais grosseiras. Este resultado está dentro do esperado, uma vez que as PCI são materiais de difícil moagem, devido ao seu elevado conteúdo metálico, o que torna difícil a obtenção de maiores quantidades nas menores frações.

Cada uma das três frações (F1, F2, F3) oriundas do processo de separação granulométrica foi submetida aos ensaios de caracterização de Difração de Raios X (DRx), Fluorescência de Raios X (FRx) e lixiviação por água régia.

Para a identificação dos picos de difração foi utilizada a base de dados com as fichas de identificação das espécies JCPDS (*Joint Commiteeon Powder Diffraction Standards*). As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os difratogramas correspondentes a cada uma das granulometrias analisadas contendo a identificação dos principais elementos presentes.

Observou-se na Figura 2 vários picos de difração de raios X, o que sinalizou a presença de vários metais. O pequeno diâmetro da fração F1 ajudou na difração dos raios X, uma vez que não houve o mascaramento dos metais por materiais não-metálicos. O cobre apresentou dois picos de difração muito acentuados, o que indicou a presença em maior quantidade quando comparado aos demais elementos desta amostra.

O difratograma da fração F2 representado na Figura 3 mostrou a mesma tendência de picos de difração dos raios X, quando comparado ao da fração F1.

A presença dos mesmos metais foi observada. O maior diâmetro da fração F2 ocasionou algum mascaramento dos metais, o que pode ser observado por alguns picos com menor intensidade. Como aconteceu na fração F1, o cobre apresentou dois grandes picos de difração sinalizando a sua maior quantidade frente os demais elementos.

A Figura 4 mostrou dois grandes picos de difração representando o cobre. Isto indicou a maior presença deste elemento nessa fração. Observou-se picos muito pequenos para os elementos ferro, níquel e chumbo. Esta ausência de picos consideráveis não indica a ausência de outros metais. Devido ao maior diâmetro da fração F3, há um mascaramento mais acentuado dos metais pelos materiais não-metálicos impedindo a difração dos raios X.

Observando os difratogramas obtidos para as três frações F1, F2 e F3, verificou-se que os picos de difração das espécies identificadas apresentaram intensidade crescente à medida que diminuiu o diâmetro das partículas das frações analisadas. Isto pode ser explicado pelo fato de nas partículas maiores pode ter havido um mascaramento dos metais dificultando a difração dos raios X. Este fato comprovou a influência da granulometria das amostras na caracterização por difração dos raios X.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os metais mais relevantes na análise por FRx realizada nas frações oriundas da separação granulométrica.

Tabela 2. Concentração (% m/m) frações separação granulométrica por FRx.

	F1	F2	F3
Ag	0,28	0,18	ND
Al	12,84	12,21	10,37
Au	0,05	0,07	0,09
Ca	11,92	10,53	6,88
Cu	21,32	26,83	39,73
Fe	2,03	1,46	0,54
Ni	1,16	1,19	1,42
Pb	0,57	0,42	0,19
Sn	2,41	1,72	0,69
Zn	0,18	0,16	0,14

Os resultados mostrados na Tabela 2 indicaram a tendência de os metais, com exceção do cobre, se concentrarem na fração mais fina. Quanto menor o diâmetro das partículas de cada fração, mais expostos estarão os metais. Logo, fica mais propício para os raios X incidirem excitarem os átomos constituintes dos metais. Haverá emissão de linhas espectrais com

energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra.

O cobre, como se apresenta em quantidade muito maior que os demais elementos, fica menos susceptível ao fenômeno de mascaramento pelos materiais não-metálicos ficando mais exposto à incidência dos raios X. A concentração do cobre aumentou conforme o aumento do diâmetro da partícula. Isto pode ser melhor observado através da Figura 5. Pode-se avaliar pelos resultados, que a moagem seguida da separação granulométrica é suficiente para concentrar quase 40% do cobre na fração mais grosseira.

Nos experimentos de lixiviação em água régia, foi considerado material não-metálico (polímeros e cerâmicos) o que não foi digerido em água régia, constituindo, assim, o filtrado. As massas de material filtrado para cada uma das frações foram:

F1 = 8,302g; F2 = 3,125g e F3 = 2,017g.

Considerando a massa inicial de 10g, a Figura 6 apresenta os percentuais de materiais metálicos e não-metálicos em cada uma das frações oriundas da separação granulométrica. Nota-se que o percentual de material metálico aumenta com o aumento da granulometria da amostra. A presença de metais nas PCI as torna materiais de difícil moagem, o que explica, de certo modo, a maior concentração de material metálico nas frações mais grosseiras. Os materiais não-metálicos, mais frágeis, atingem diâmetros menores, se concentrando nas frações mais finas.

Vale destacar que a moagem seguida de separação granulométrica é suficiente para concentrar quase 80% do material metálico na fração mais grosseira. O material lixiviado pela água régia foi encaminhado à análise química onde foi feita a pesquisa dos metais alumínio, ouro, prata, cobre, ferro, níquel, chumbo, estanho e zinco. O resultado desta análise está mostrado na Tabela 3.

Os resultados mostrados na Tabela 3 indicaram quantidades de cobre bem superiores aos demais elementos. Em virtude de seu alto valor, a presença embora pequena de metais preciosos (ouro e prata) pode tornar a reciclagem destes resíduos economicamente muito interessante. A moagem, seguida da separação granulométrica, concentrou até 50% de cobre na fração mais grosseira. Além disso, a presença de chumbo, que é um metal traço, torna o processo de reciclagem necessário para proteção ao ambiente.

A caracterização das frações oriundas da separação granulométrica não mostrou um padrão de comportamento para os elementos nos três diferentes tamanhos das frações. A construção de um padrão depende da liberação dos metais. A Figura 7 mostra os percentuais do elemento cobre nas três frações oriundas da separação granulométrica. Observa-se que sua concentração aumenta nas frações mais grosseiras.

Os valores de concentração de cobre mostrados nas Tabelas 2 e 3 revelaram que o mesmo se concentrou na fração mais grossa (F3) antes e após a lixiviação. O mesmo comportamento foi comprovado para outros metais (Au, Ni e Zn). Essa liberação dos metais pode tornar o processo mais atraente nos aspectos econômico e ambiental, viabilizando e tornando o processo sustentável. Era esperado que a fração mais fina (F1) apresentasse maiores teores dos metais, quando comparada às frações mais grossas (F2 e F3). Contudo isso não foi observado, alguns metais (Cu, Ni, Au e Zn) apresentaram concentrações percentuais crescentes com a granulometria. Outros metais (Ag, Al, Fe, Pb e Sn) apresentaram tendência oposta. A justificativa pode se encontrar na fonte dos metais nas PCI, alguns estão mais disponíveis para o processo de moagem e outros metais estão menos disponíveis, atuando nos componentes eletrônicos internos dos circuitos. Dessa forma, a liberação dos metais ou dos óxidos metálicos, também é uma função, além do grau de moagem, da ocorrência do metal na PCI.

Considerações Finais

As três técnicas utilizadas para a caracterização das PCI mostraram resultados bastante satisfatórios, uma vez que proporcionaram conhecimento a respeito da presença dos principais metais bem como suas concentrações.

Uma melhor avaliação das condições definidas no ensaio teria sido possível através da realização das análises químicas em triplicata, uma vez que forneceria mais segurança e confiabilidade, além de propiciar o alcance das melhores condições operacionais.

A detecção da presença de chumbo chama a atenção para a periculosidade deste tipo de material, sinalizando a necessidade de um tratamento adequado para o seu descarte.

Tabela 3. Concentração (% m/m) dos metais presentes nas frações oriundas da separação granulométrica.

%	Al	Au	Ag	Cu	Fe	Ni	Pb	Sn	Zn
F1	0,59	0,08	0,21	31,0	0,75	1,25	0,73	3,4	0,19
F2	1,14	0,08	0,16	45,8	1,07	1,55	0,73	4,4	0,34
F3	0,61	0,10	0,02	50,0	0,71	1,04	0,25	1,67	0,51

A reciclagem das PCI mostra grande potencial econômico devido às presenças de ouro, prata e cobre. Embora em pequenas quantidades, ouro e prata possuem um valor de mercado elevado.

Uma vez que se conhecem a composição e a concentração dos principais metais nas PCI, estudos devem ser realizados de modo a selecionar os processos que concentrem estes metais de modo a viabilizar sua reciclagem.

Referências

ABINEE. (2014). Avaliação setorial. Retrieved May 20, 2014, from (<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon11.htm>)

ABRELPE. (2012). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil, 116. Retrieved from http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm

Christian Ludwig, S. S. (2003). Municipal Solid Waste Management. (S.-Germany, Ed.).

Cui, J., & Forssberg, E. (2003). Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 99(3), 243–263. [http://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00061-X](http://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00061-X)

Cui, J., & Zhang, L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2-3), 228–56. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>

European Commission. (2003a). Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council. Retrieved May 19, 2014, from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0096>

European Commission. (2003b). Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment. Retrieved May 19, 2014, from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0095>

Goosey, M., & Kellner, R. (2002). A Scoping Study End-of-Life Printed Circuit Boards. Environmental Working Group, (August), 2. Retrieved from http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB_Study.pdf

He, W., Li, G., Ma, X., Wang, H., Huang, J., Xu, M., & Huang, C. (2006). WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 502–12. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.060>

Khatriwal, D. S., Kraeuchi, P., & Widmer, R. (2009). Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration - learning from the Swiss experience. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 153–65. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.08.019>

Kumar, V., Bee, D. J., Shirodkar, P. S., Tumkor, S., Bettig, B. P., & Sutherland, J. W. (2005). Towards Sustainable “Product and Material Flow” Cycles: Identifying Barriers to Achieving Product Multi-Use and Zero Waste. In *Energy Conversion and Resources* (Vol. 2005, pp. 433–442). ASME. <http://doi.org/10.1115/IMECE2005-81347>

Lee, C. K., Rhee, K. I., & Sohn, H. J. (1997). Recovery of gold from electronic scrap by hydrometallurgical processes. *Chawon Risaikring*, 6(3), 36–40.

Nations, U. (2013). World Population Policy. New York. Retrieved from <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/policy/world-population-policies-2013.shtml>

Nnorom, I. C., & Osibanjo, O. (2008). Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(6), 843–858. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.01.004>

Park, Y. J., & Fray, D. J. (2009). Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2-3), 1152–8. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.043>

PNUMA, O. (2011). Economia verde e desenvolvimento sustentável. Retrieved from www.unep.org/greeneconomy/

United Nations, D. of E. and S. A. (2013). World Population Prospects, The 2012 Revision, DVD Edition.

Yamane, L. H., de Moraes, V. T., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2011). Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management* (New York, N.Y.), 31(12), 2553–2558. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.006>

Zhang, S., & Forssberg, E. (1999). Intelligent Liberation and classification of electronic scrap. *Powder Technology*, 105(1-3), 295–301. [http://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00151-5](http://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00151-5)

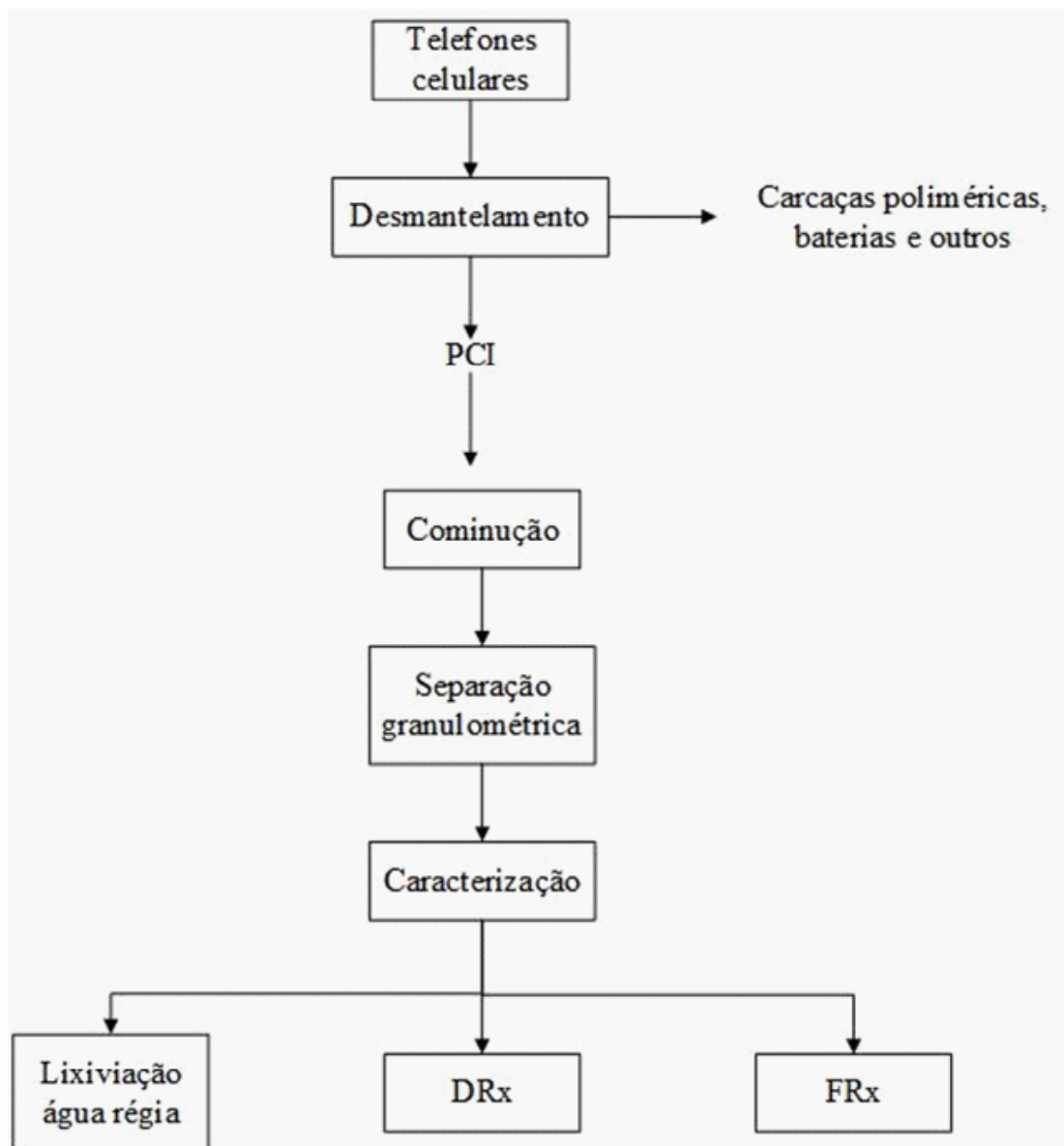


Figura 1. Fluxograma do processo de caracterização.

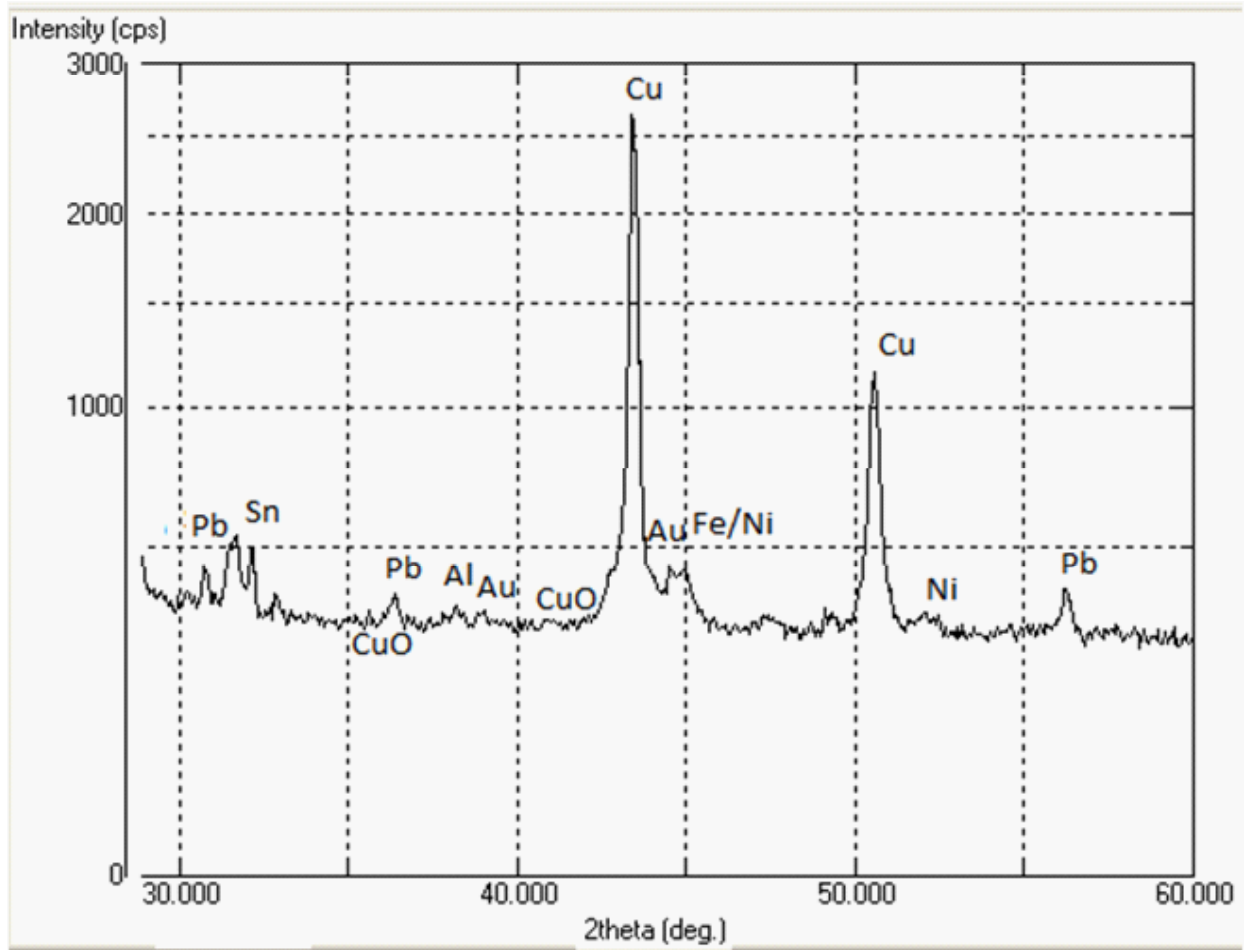


Figura 2. Difratoograma da fração F1 oriunda da separação granulométrica.

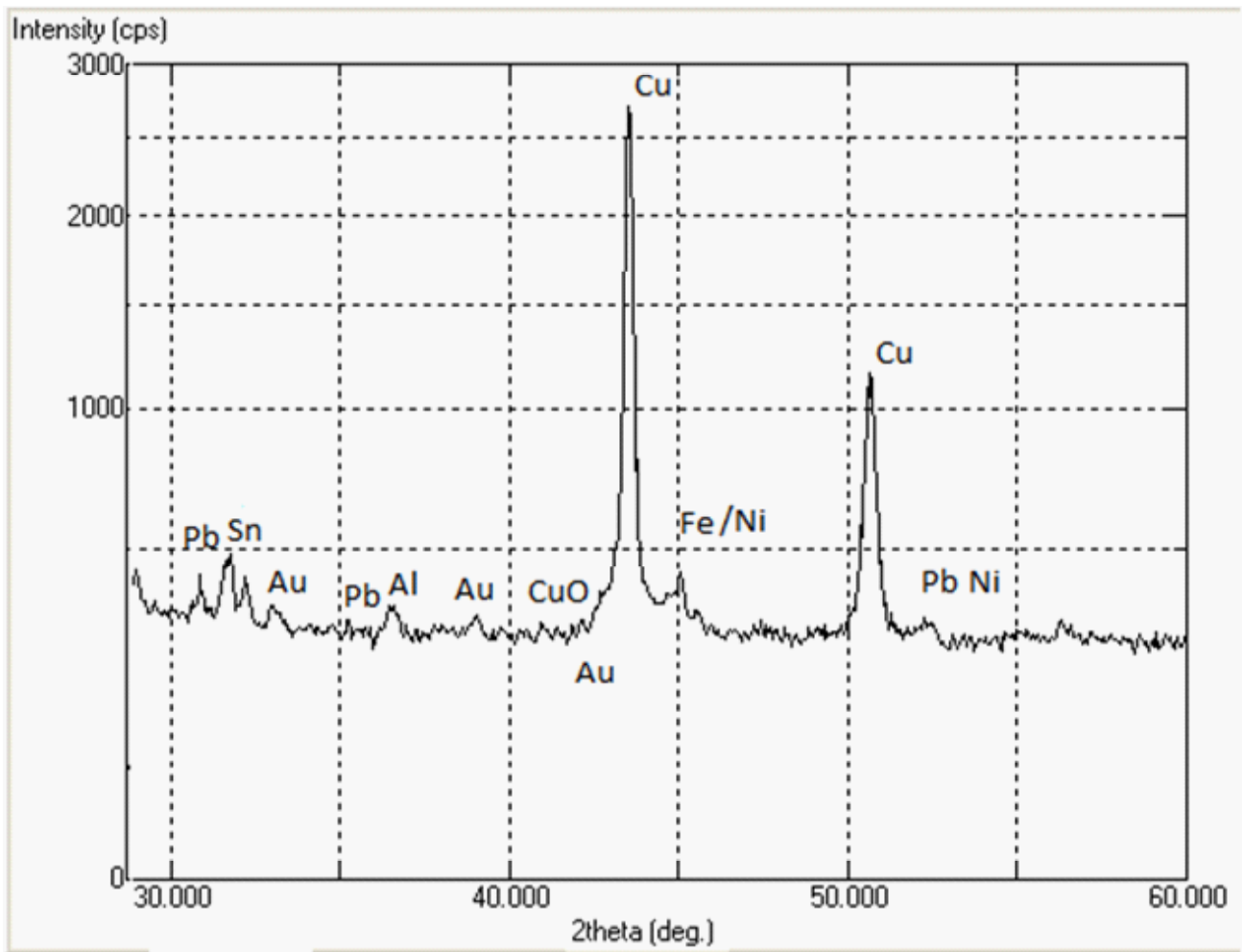


Figura 3. Difratoograma da fração F2 oriunda da separação granulométrica.

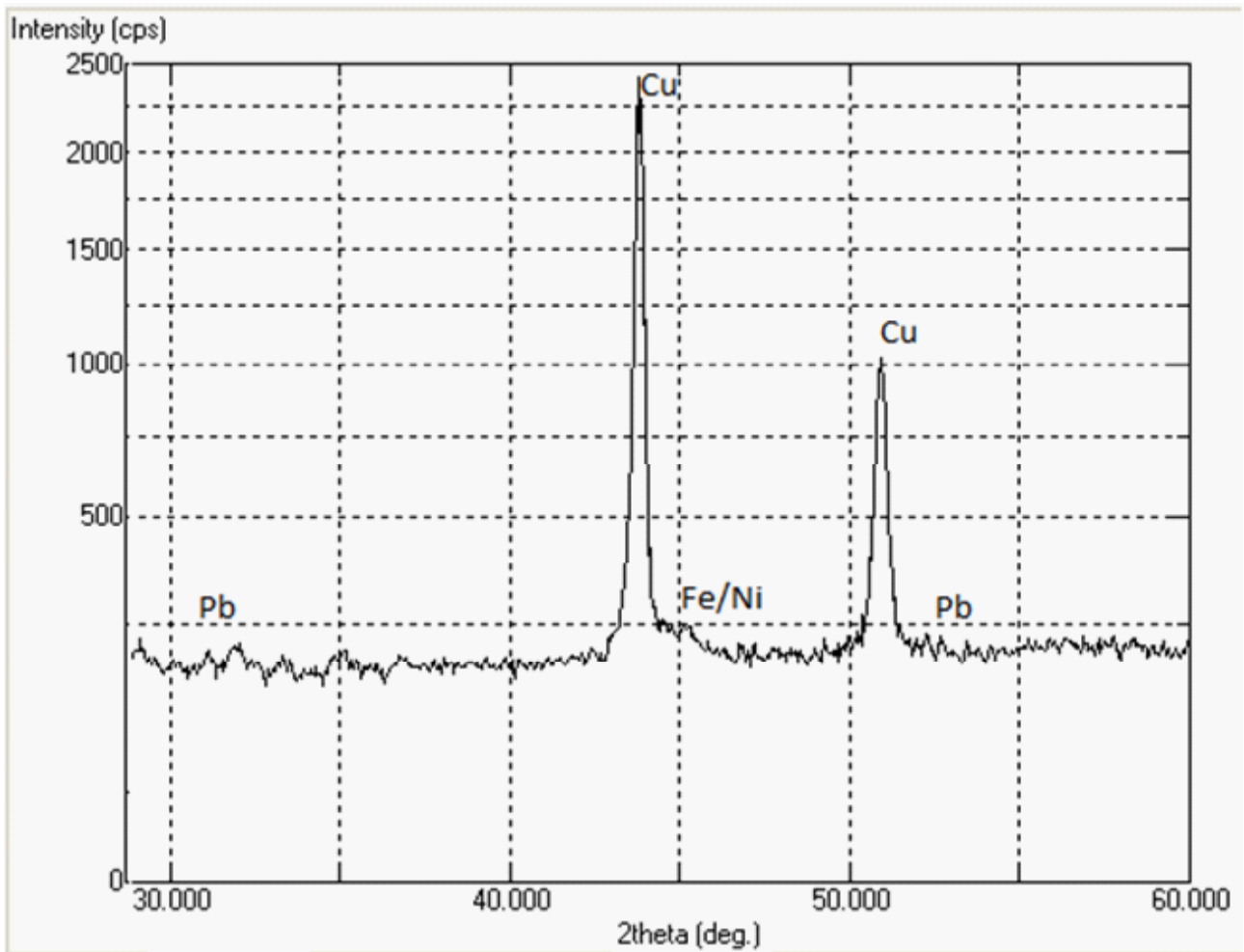


Figura 4. Difratoograma da fração F3 oriunda da separação granulométrica.

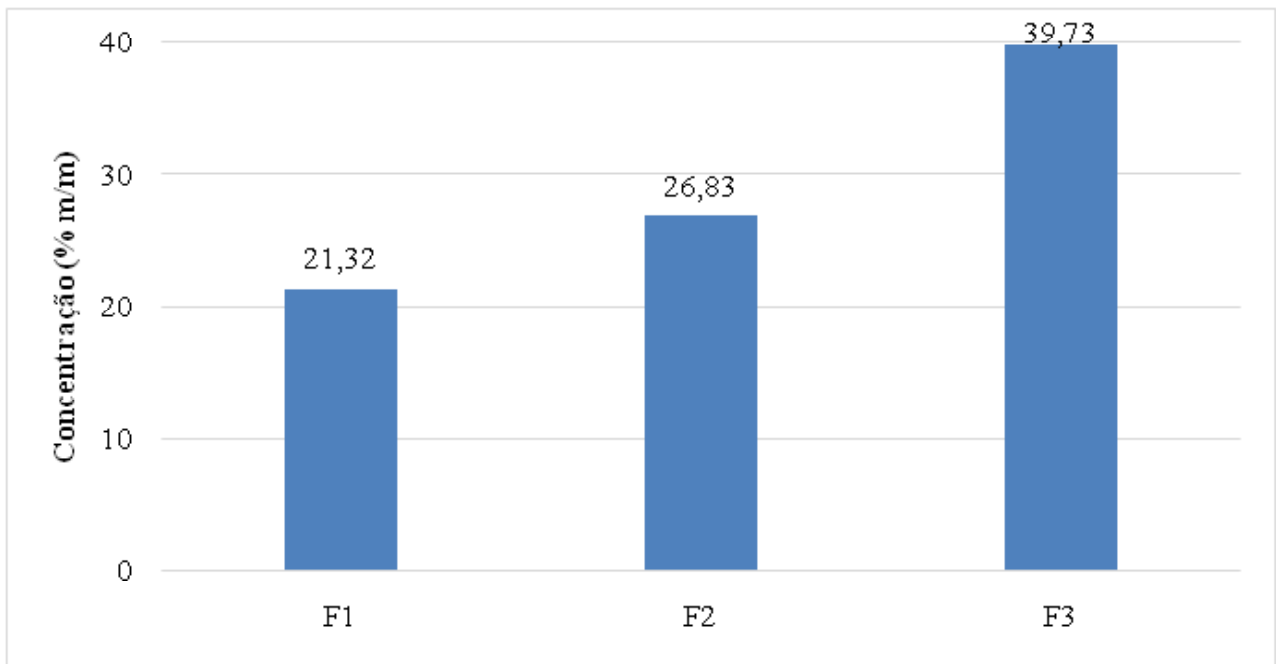


Figura 5. Concentração (% m/m) de cobre nas frações caracterizadas por FRx.

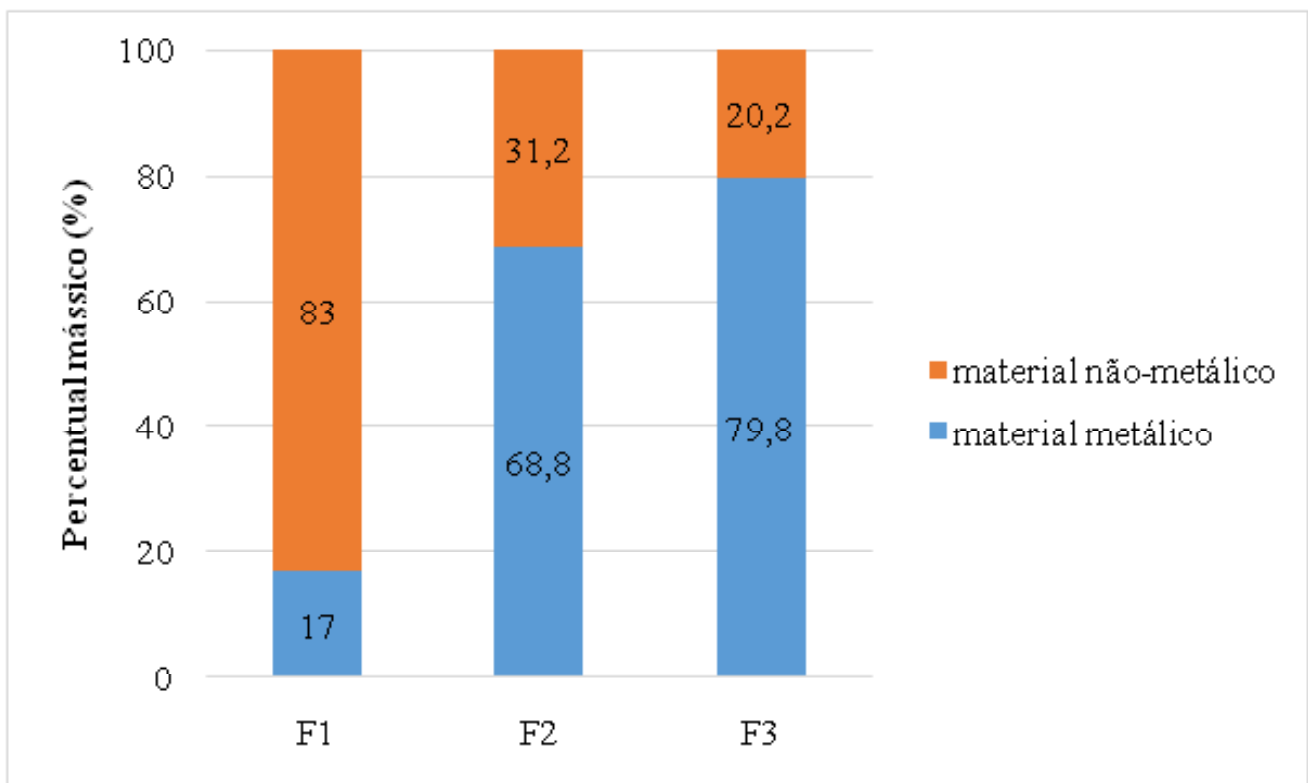


Figura 6. Percentual mássico de materiais metálicos e não-metálicos após a separação granulométrica.

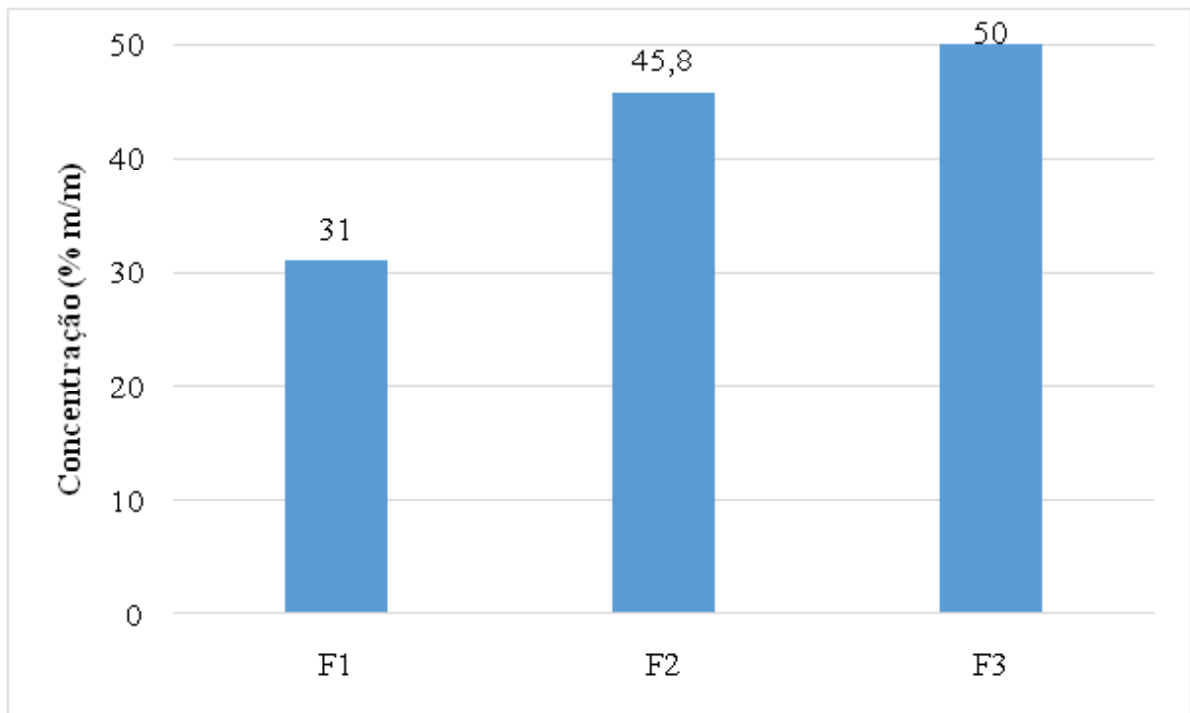


Figura 7. Concentração (% m/m) de cobre nas frações caracterizadas por lixiviação em água régia.