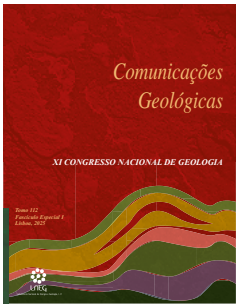
Comunicações Geológicas

Comunicações Geológicas (2025) 112, Especial I, 285-288
ISSN: 0873-948X; **e-ISSN**: 1647-581X

Separação de resíduos de cobre e plástico por processos gravíticos e flutuação por espumas

Separation of copper and plastic waste by gravity processes and froth flotation



F. A. Pita[1*]

DOI: https://doi.org/10.34637/60es-cr78
Recebido em 28/09/2023 / Aceite em 04/01/2024
Publicado online em abril de 2025
© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Artigo original
Original article

Resumo: A produção mundial de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE) tem aumentado acentuadamente nas últimas décadas. Uma grande variedade de metais, plásticos e outras substâncias estão contidas nos REEE. Este trabalho tem como objetivo estudar a separação do cobre e do plástico dos resíduos de cabos elétricos por processos gravíticos (jigagem e mesa vibratória) e por flutuação por espumas. Os resíduos de cabos elétricos foram previamente triturados, apresentando tamanho inferior a 2 mm. Foi possível enriquecer o teor em cobre de 49,7% na alimentação para cerca de 98% no produto obtido na separação por jiga e em mesa, com recuperação de cobre de aproximadamente 98%. Embora a flutuação por espumas tenha apresentado menor eficiência de separação que os outros dois métodos, também permitiu obter bons resultados, um produto com teor em cobre de 95% e uma recuperação de cobre de 95%.

Palavras-chave: cabo eléctrico, cobre, jigagem, mesa vibratória, flutuação por espumas.

Abstract: The worldwide production of waste electrical and electronic equipment (WEEE) has increased sharply in recent decades. A wide range of metals, plastics and other substances are contained in WEEE. This work aims to study the separation of copper and plastic of the electrical cable waste by jigging, shaking table and froth flotation. Waste electrical cable was previously crushed to a size of less than 2 mm. It was possible to enrich the copper content from 49,7% in the feed to about 98% in the product in a jigging separation and table shaking with over about 98% recovery of copper. Although froth flotation showed lower separation efficiency than the other two methods, it allowed obtaining a concentrate with copper content of 95% at copper recovery of 95%.

Keywords: electric cable, copper, jigging, shaking table, froth flotation.

[1] Centro de Geociências (CGEO), Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Rua Silvio Lima, 303-790, Coimbra, Portugal.

[*] Autor correspondente / Corresponding author: fpita@ci.uc.pt

1. Introdução

Nas últimas décadas a produção mundial de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) tem aumentado acentuadamente, tendo atingido o valor de 57,4 Mt em 2021 (Roy *et al*., 2022). Estes resíduos incluem grande variedade de equipamentos em fim de vida, como computadores, telemóveis, electrodomésticos e televisões. Embora sejam considerados resíduos eles são uma enorme fonte de recursos, pois contém muitos metais, desde metais ferrosos a metais preciosos e metais de terras raras. Apesar de terem um grande potencial para serem valorizados, em 2021 apenas cerca de 18% dos REEE produzidos mundialmente foram recolhidos e reciclados. A reciclagem de metais dos REEE tem vantagens significativas, como a preservação dos recursos naturais, menor consumo de energia, diminuição de resíduos depositados em aterro e seus impactes no meio ambiente. O cobre é um dos principais metais existente nos REEE, sendo também um dos metais mais reciclados.

A produção mineira mundial de cobre tem aumentado cerca de 3% ao ano, atingindo 21,2 Mt em 2021, sendo o Chile o maior produtor (5,6 Mt), seguindo-se-lhe o Peru (2,4 Mt) (ICSG, 2022). A produção mundial de cobre refinado atingiu o seu máximo em 2021, com 24,8 Mt, sendo de 4,1 Mt a contribuição da reciclagem de produtos em fim de vida, denominada produção secundária. Em resultado das suas propriedades, maleável, dúctil, excelente condutor de calor e electricidade, baixa reatividade química e baixa resistência à corrosão, o cobre tem múltiplas utilizações. Os seus principais usos são: equipamentos (32%), construção civil (28%), infra-estrutura (16%), transporte (12%) e indústria (12%) (ICSG, 2022).

A reciclagem de metais dos REEE requer a separação e recuperação dos metais existentes, a sua separação entre si e a separação de outros constituintes materiais ali existentes. Neste sentido, nos últimos anos têm sido realizados estudos sobre a aplicação de métodos de separação amplamente usados na indústria mineira. Esses incluem a aplicação de métodos gravíticos (He *et al*., 2015; Sarvar *et al*., 2015; Pita e Castilho, 2018), magnético (Veit *et al*., 2005, Yamane *et al*., 2011), electrostático (Jiang *et al*., 2009; Ruan e Xu, 2016) e flutuação por espumas (Das *et al*., 2009; Ogunniyi *et al*., 2009; Gallegos *et al*., 2014).

No presente estudo pretende-se separar o cobre do material isolante (plástico) de resíduos de cabos eléctricos por processo gravítico, em jiga e em mesa, e por processo de flutuação por espumas. Os processos gravíticos baseiam-se na diferença de densidade dos materiais a separar e a flutuação por espumas baseia-se no seu diferente grau de hidrofobicidade.

Na jigagem a separação é realizada num leito pulsátil, constituído por uma mistura de sólidos-água num vaso de fundo perfurado (crivo ou rede), através do qual se estabelecem correntes verticais de água, alternadamente ascendentes e descendentes. Por acção daquelas correntes ocorre a estratificação vertical das partículas em função da sua densidade. As partículas mais densas ocupam os estratos inferiores e ficam retidas no interior da célula de jigagem enquanto que as partículas de menor densidade ocupam os estratos superiores, saindo da célula de jigagem por transbordo.

A mesa de separação consiste num tabuleiro (mesa) rectangular

em posição quase horizontal, sendo-lhe comunicado um movimento vibratório paralelo ao seu eixo maior. Perpendicularmente a esta direcção a superfície da mesa é inclinada e corre uma fina toalha de água. A superfície da mesa é provida de "riffles" que se orientam paralelamente à direcção dos impulsos, tendo por objectivo permitir a estratificação vertical das partículas em função da sua densidade. A alimentação entra no topo da mesa e e em resultado da vibração e da água de lavagem as partículas mais densas, ocupando os estratos inferiores e saem no topo longitudinal da mesa e as partículas menos densas, constituindo os estratos superiores, são arrastadas pela água de lavagem e saem no topo transversal da mesa.

A flutuação por espumas é um processo físico-químico que se baseia na adesão selectiva das partículas para com o ar (hidrófobas) ou para com a água (hidrófilas). A separação por flutuação por espumas ocorre num recipiente (célula), onde é introduzida a polpa constituída por água e mistura de partículas a separar, sendo posteriormente injetado bolhas de ar que irão colidir com as partículas. As partículas hidrófobas tenderão a ligar-se às bolhas de ar e a flutuar na superfície da polpa, enquanto que a partículas hidrófilas não se ligam ás bolhas de ar e afundam na célula.

2. Materiais e métodos

Foi usado cabo eléctrico, previamente triturado, com calibre inferior a 2 mm, em que o cobre e o plástico estão completamente libertos (Figura 1). A densidade do cobre é de 8,84 g/cm^3 e a densidade do plástico é de 1,34 g/cm^3. O teor em cobre é de 40,8% e em plástico é de 59,2%. A caraterização granulométrica e a determinação do teor em cobre e plástico de cada lote permitiu verificar que a maioria das partículas de cobre tem tamanho inferior a 0,5 mm (88,7% em peso), enquanto que a maioria das partículas de plástico tem calibre superior a 0,5 mm (84,5% em peso) (Tabela 1). No lote mais grosseiro (1,4-2 mm), que representa 18% do peso do material, o teor em cobre é de apenas 0,35% (Tabela 1). Uma simples operação de crivagem, com corte a 1,4 mm permitiu separar a fração grosseira (1,4-2 mm), constituída fundamentalmente por plástico. Assim, apenas o material com calibre inferior a 1,4 mm, apresentando um teor em cobre de 49,7% e contendo 99,8% do cobre total, foi submetido aos três processos de separação.

Figura 1. Mistura resíduos cobre/plástico.

Figure 1. Mixture of copper/plastic waste.

Tabela 1. Distribuição granulométrica e mássica do cobre e do plástico.

Table 1. Granulometric and mass distribution of copper and plastic.

Calibre (mm)	Peso (%)	Teor (%)		Distribuição (%)	
		Cobre	Plástico	Cobre	Plástico
< 0,25	13,9	79,6	20,4	27,2	4,8
0,25-0,35	14,1	80,6	19,4	27,8	4,6
0,35-0,5	17,3	79,1	20,9	33,6	6,1
0,5-0,7	11,5	25,1	74,9	7,1	14,5
0,7-1,0	12,1	10,3	89,7	3,0	18,3
1,0-1,4	13,1	3,3	96,7	1,1	21,3
1,4-2,0	18,0	0,4	99,6	0,2	30,3
Total	100	40,8	59,2	100	100

Os testes de jigagem foram realizados em uma jiga de laboratório Denver, com seção retangular de 10x15 cm e profundidade 10 cm. Em cada ensaio usou-se 1,5 kg da mistura cobre/plástico. Para investigar o efeito do caudal de água na separação da mistura, foram realizados testes com três caudais de água: 2, 3 e 4 L/min.

Os testes de separação em mesa foram realizados numa mesa de laboratório Wilfley, com formato retangular de 1,25 m de comprimento e 0,55 m de largura. A separação na mesa vibratória é condicionada por vários parâmetros operacionais (inclinação da mesa, caudal da água de lavagem, frequência e amplitude do movimento da mesa). Foi analisada influência a inclinação da mesa (4º, 5,5º e 7º) e o caudal da água de lavagem (3, 4,5 e 6 L min). Em cada teste foram utilizados 2,5 kg de material.

Os testes de flutuação por espumas foram realizados numa célula Denver com capacidade de 3 dm^3. Em cada teste usou-se 50 g de material que foi condicionado durante 5 minutos com sulfeto de sódio, como agente depressor do cobre, e posteriormente com metil isobutil carbinol (MIBC), como espumante, durante 2 minutos, seguindo-se a flutuação durante 6 minutos.

O controlo dos ensaios de separação pelos três processos foi realizado a partir da recuperação e do teor em cobre e em plástico no flutuado e no afundado, determinados após a separação manual e pesagem do cobre e do plástico presente naqueles dois produtos.

3. Resultados e discussão

Nos três processos variaram-se alguns dos parâmetros que influenciam a sua qualidade de separação de cada um deles. Na jigagem analisou-se o efeito do caudal de água; na mesa analisou-se o efeito do caudal da água de lavagem e da inclinação da mesa; na flutuação por espumas analisou-se o efeito do tipo e concentração de depressor de cobre. Na Tabela 2 apresentam-se os melhores resultados obtidos em cada um dos três processos de separação.

Tabela 2. Resultados da separação por jiga, mesa e flutuação por espumas.

Table 2. Results of separation by jigging, table and froth flotation.

Tamanho (mm)	Afundado		Flutuado		Eficiência Separação (%)
	Recuperação Cu (%)	Teor	Cobre	Plástico	
Jiga	97,8	97,9	98,0	97,8	95,8
Mesa	96,6	97,5	97,6	96,7	94,2
Flutuação	95,0	95,0	95,1	95,1	90,1

Na jigagem a recuperação do cobre no afundado diminuiu com o aumento do caudal de água, mas a recuperação de plástico no flutuado aumentou com esse caudal. A separação de melhor qualidade, com uma eficiência de separação (ES) de 95,8%, foi obtida para um caudal intermédio (3L/min), obtendo-se um afundado com um teor em cobre de 97,9% e uma recuperação de cobre de 97,8% (Tabela 2). No flutuado foi recuperado 98% do plástico.

Na mesa a recuperação do cobre no afundado diminuiu com o aumento do caudal de água de lavagem e com o aumento da inclinação da mesa. O plástico teve um comportamento oposto, a recuperação de plástico no flutuado aumentou com o aumento do caudal de água e com a inclinação da mesa. A separação de melhor qualidade foi obtida para valores intermédios do caudal de água de lavagem (4,5 L/min) e da inclinação da mesa (5,5°). Nestas condições obteve-se um concentrado com um teor em cobre de 97,5% e uma recuperação de 96,6%, sendo a eficiência de separação de 94,2% (Tabela 2).

A realização prévia de testes de flutuação por espumas na ausência de depressores, apenas na presença de espumante (MIBC), permitiu verificar que o plástico é naturalmente hidrófobo, sendo todo recolhido no flutuado, mas também algum cobre é recolhido conjuntamente com o plástico no flutuado. Assim, como o cobre apresentou algum comportamento hidrófobo, foi necessário testar alguns reagentes molhantes do cobre de modo a promover a sua depressão e consequente recolha no afundado. Testes com cinco potenciais agentes molhantes do cobre (dicloridrato de etilenodiamina, amido, metabissulfito de sódio, ácido meso-2,3-dimercaptosuccínico e sulfeto de sódio), permitiram verificar que estes dois últimos promoveram as separações mais selectivas, levando à depressão de quase todo o cobre e tendo muito pouca influência na flutuabilidade do plástico. O meso-2,3-dimercaptosuccínico e o sulfeto de sódio conduziram a resultados similares. Para uma concentração de sulfeto de sódio de 10^{-1} mg/L, obteve-se um afundado com um teor em cobre de 95% e uma recuperação de cobre de cerca de 95%, e um flutuado com teor em plástico de 95,1% e uma recuperação de plástico de 95,1% (Tabela 2), a que corresponde uma eficiência de separação de 90,1%, ligeiramente inferior à obtida na jiga e na mesa. A recuperação de cobre no afundado da flutuação por espumas foi ligeiramente menor do que a recuperação de cobre no afundado da jiga e da mesa e a recuperação de plástico no flutuado da flutuação por espumas também foi ligeiramente menor que a recuperação do plástico do flutuado da jiga e da mesa (Tabela 2).

Uma vez que o tamanho das partículas é um parâmetro importante em qualquer processo de separação, foi analisada a sua influência nos três métodos. Na Tabela 3 apresentam-se os resultados da separação pelos três processos para seis frações granulométricas. A sua análise permite verificar que o efeito do tamanho das partículas na jigagem é muito pequeno. A recuperação do cobre no afundado é apenas ligeiramente menor para a fração fina, e a recuperação de plástico no flutuado diminui ligeiramente com aumento do calibre das partículas. Este comportamento resulta de durante a expansão do leito de jigagem, as partículas mais finas de cobre e de plástico serem mais facilmente elevadas no leito de jigagems, sendo maior a sua recuperação no flutuado. Para as três frações mais finas, o afundado é um produto quase puro em cobre e para as três frações mais grosseiras o flutuado é um produto quase puro em plástico. Para as seis frações a eficiência de separação (ES) na jigagem é semelhante, apresentando elevado valor, próximo dos 96%.

Na mesa a qualidade de separação melhorou ligeiramente com o aumento do tamanho das partículas. A fração mais grosseira apresenta uma eficiência de separação de 97,5% e a fração mais fina apresenta uma eficiência de separação de 87,5% (Tabela 3). Estes valores resultam da recuperação do cobre no afundado ser menor para a fração mais fina e também ser menor a recuperação do plástico da fração fina no flutuado. Para as três frações grosseiras o flutuado é um produto quase puro em plástico.

Tabela 3. Resultados da separação por jigagem, mesa e flutuação por espumas para seis frações granulométricas.

Table 3.- Results of separation by jigging, table and froh flotation for six particle size fractions.

	Tamanho (mm)	Afundado		Flutuado		ES (%)
		Recuperação Cu (%)	Teor Cu (%)	Recuperação Plástico (%)	Teor Plás (%)	
Jigagem	<0,25	96,2	99,8	99,4	87,1	95,6
	+0,25-0,35	98,1	99,7	98,9	92,5	96,9
	+0,35-0,5	98,7	99,6	98,6	95,2	97,2
	+0,5-0,7	98,5	93,9	97,9	99,5	96,4
	+0,7-1,0	98,4	82,7	97,7	99,8	96,0
	+1,0-1,4	98,3	58,0	97,6	99,9	95,9
Mesa	<0,25	94,0	98,3	93,5	79,9	87,5
	+0,25-0,35	97,3	98,6	94,4	89,2	91,7
	+0,35-0,5	97,8	98,7	95,1	92,1	92,9
	+0,5-0,7	97,7	90,5	96,6	99,2	94,2
	+0,7-1,0	97,8	90,6	98,8	99,8	96,7
	+1,0-1,4	98,1	85,1	99,4	99,9	97,5
Flutuação	<0,25	90,4	100,0	100,0	72,8	90,4
	+0,25-0,35	95,6	99,6	98,4	84,4	94,0
	+0,35-0,5	97,0	99,3	97,3	89,6	94,3
	+0,5-0,7	98,0	89,7	96,2	99,3	93,2
	+0,7-1,0	99,4	69,2	94,9	99,9	94,4
	+1,0-1,4	100,0	29,9	92,1	100,0	92,1

Na flutuação por espumas a fração fina e grosseira apresentam qualidade da separação ligeiramente menor. A fração fina e a mais grosseira apresentam piores resultados, pois a flutuação do cobre da fração fina foi significativa (9,6%), e a recuperação do plástico no afundado para a fração grosseira foi também significativa (7,9%). A menor recuperação de cobre no afundado na fração fina resulta das partículas finas serem mais facilmente arrastadas. A menor recuperação do plástico no flutuado nas frações mais grosseiras resulta do maior peso destas partículas, sendo necessário a ligação de um maior número de bolhas de ar de modo a promover a sua flutuação. As frações de tamanho intermédio apresentam eficiência de separação semelhante, aproximadamente 94%. Para as três frações mais finas, o afundado apresentou um produto quase puro em cobre, enquanto que para as três frações grosseiras o flutuado é um produto quase puro em plástico. Para a fração mais grosseira o afundado apresentou baixo teor de cobre, pois a recuperação de plástico no afundado foi significativa (7,9%) e o teor em cobre nessa fração granulométrica da alimentação é muito pequeno (3,3%).

A mesa e a jiga conduziram a separações com eficiência de separação ligeiramente maior do que a flutuação por espumas. Este comportamento é mais evidente para as frações grosseiras. Para as frações de tamanho intermédio, a flutuação apresentou eficiência de separação semelhante à mesa vibratória, mas ligeiramente inferior à da jigagem.

4. Conclusões

Neste estudo, mistura de cobre/plástico proveniente de resíduos de cabos eléctrico, com um teor em cobre de 49,7% e com com tamanho inferior a 1,4 mm, foram submetidos a separação gravítica em jiga e em mesa vibratória e a separação por flutuação por espumas.

A separação em jiga e em mesa vibratória conduziram a resultados ligeiramente melhores do que a flutuação por espumas. Na jigagem e na mesa obteve-se uma eficiência de separação de cerca de 95%. Em ambos os processos foi possível obter um produto (afundado) com um teor em cobre de 97% e recuperação de cobre de 97%, e obter um produto com um teor em plástico de 98% e recuperação de plástico de 98%.

Na flutuação por espumas foi necessário usar sulfeto de sódio como depressor do cobre, pois este apresentava algum comportamento hidrófobo, sendo parte dele recuperado conjuntamente com o plástico no flutuado. Embora a flutuação por espumas tenha conduzido a separações de menor qualidade do que os outros dois métodos, ela também conduziu a separações de qualidade razoável, com uma eficiência de separação relativamente elevada (90,1%).

Na separação em jiga a influência do tamanho das partículas foi mínima, mas na mesa a qualidade de separação melhorou ligeiramente com o aumento do tamanho das partículas, sendo máxima a eficiência de separação (97,5%) para a fração grosseira.

Na separação por flutuação por espumas obtiveram-se piores resultados para a fração fina e para a fração mais grosseira, com uma eficiência de separação de 90% e de 92%, respectivamente.

Nos três métodos, para as três frações finas obteve-se um produto quase puro em cobre, e para as três frações grosseiras obteve-se um produto quase puro em plástico.

Apesar da flutuação por espumas apresentar menor qualidade de separação, os três métodos mostram potencialidades para serem usados na separação de mistura de cobre com plástico.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto UIDB/00073/2020.

Referências

Das, A., Vidyadhar, A., Mehrotra, S.P., 2009. A novel flowsheet for the recovery of metal values from waste printed circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling*, **53**: 464-469.

Gallegos-Acevedo, P.M., Espinoza-Cuadra, J., Olivera-Ponce, J.M., 2014. Conventional Flotation Techniques to Separate Metallic and Nonmetallic Fractions from Waste Printed Circuit Boards with Particles Nonconventional Size. *Journal of Mining Science,* **50**: 974-981.

He, J.F., Duan, C.L., He, Y.Q., Zhang, H.J., 2015. Recovery of valuable metal concentrate from waste printed circuit boards by a physical beneficiation technology. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **12**: 2603-2612.

ICSG, International Copper Study Group, 2022. The World Copper Factbook 2022.

Jiang, W., Jia, L., Zhen-ming, X., 2009. A new two-roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board. *Journal of Hazardous Materials*, **161**: 257-262.

Ogunniyi, I.O., Vermaak, M.K.G., 2009. Investigation of froth flotation for beneficiation of printed circuit board comminution fines. *Minerals Engineering*, **22**: 378-385.

Pita, F., Castilho, A., 2018. Separation of copper from electric cable waste based on mineral processing methods: A Case Study. *Minerals*, **8**: 517.

Roy, H., Rahman, T., Suhan, B.K., Al-Mamun, R., Haque, S., Islam, S., 2022. A comprehensive review on hazardous aspects and management strategies of electronic waste: Bangladesh perspectives. *Heliyon*, **8:** e09802.

Ruan J., Xu, Z., 2016. Constructing environment-friendly return road of metals from e-waste: Combination of physical separation technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **54**: 745-760.

Sarvar, M., Salarirad, M., Shabani, M., 2015. Characterization and mechanical separation of metals from computer printed circuit boards (PCBs) based on mineral processing methods. *Waste Management*, **45**: 246-257.

Yamane, L.H., Moraes, V.T., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.A., 2011. Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Managemrnt*, **31**: 2553-2558.

Veit, H.M., Diehl, T.R., Salami, A.P., Rodrigues, J.S., Bernardes, A.M., Tenório, J.A.S., 2005. Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap. *Waste Management*, **25**: 67-74.