



RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS DE CABOS COAXIAIS UTILIZANDO SEPARADOR ELETROSTÁTICO DO TIPO PLACA

THIAGO R. MARTINS ^{1*}, DANIEL A. BERTUOL ¹, EDUARDO H. TANABE ¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química,
Laboratório de Processos Ambientais - LAPAM

*e-mail: thitiorthitao@hotmail.com

RESUMO – O desenvolvimento tecnológico tem levado a crescente geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, incluindo cabos. Este trabalho trata da utilização de uma configuração menos usual de separador eletrostático na separação e reciclagem de cabos coaxiais. Primeiramente, os cabos foram cominuídos e peneirados. Posteriormente, eles foram submetidos à separação eletrostática em separador do tipo placa, sendo avaliados os parâmetros de ângulo do eletrodo de placa e ângulo do defletor. Os melhores valores encontrados nestes parâmetros foram 50° para o ângulo da placa e -7,5° para o ângulo do defletor, alcançando pureza de 90.86% e eficiência de recuperação de 88.65% para o aço cobreado. Os resultados demonstraram que a configuração de separador eletrostático do tipo placa foi bem-sucedida na recuperação de materiais de cabos coaxiais, contribuindo para um melhor entendimento acerca desta configuração e auxiliando no possível uso desta configuração na recuperação de materiais de outros tipos de resíduos.

INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) é um grande problema da sociedade atual. A estimativa de geração de REEE para 2022 é de 59,4 milhões de toneladas métricas, com crescimentos ainda maiores projetados para os anos posteriores (Forti *et al.*, 2020). Inseridos neste contexto se encontram os cabos, responsáveis pelo transporte de dados e eletricidade (Li *et al.*, 2017).

Apesar da variedade que existe disponível na atualidade, os cabos usualmente apresentam em sua composição um centro, composto de materiais condutores (responsável por transmitir os dados e a eletricidade), e no mínimo uma camada de material não-condutor (responsável por isolar e proteger o centro) (Suresh *et al.*, 2017). Alguns dos materiais condutores utilizados nos cabos incluem o cobre e o alumínio, enquanto as camadas não-condutoras incluem materiais poliméricos

como o cloreto de polivinila (PVC) e o polietileno (PE) (Suresh *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2020). Devido à presença de materiais de natureza tão diferente em sua composição, os quais podem ser de grande valor ou até mesmo apresentar grandes riscos ao meio ambiente, os cabos têm apresentado diversos estudos relacionados à sua reciclagem (de Araújo *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2016).

As principais técnicas utilizadas na reciclagem de cabos incluem processamento mecânico, tratamento químico e incineração (Li *et al.*, 2017). O processamento mecânico se destaca perante as demais por possibilitar a diminuição dos cabos até tamanho particulado seguida de separação de acordo com diferenças nas propriedades físicas dos materiais presentes. Uma destas propriedades físicas é a condutividade, nome dado à capacidade de um material de conduzir eletricidade. A técnica que possibilita a separação de materiais com diferentes condutividades é denominada separação eletrostática (Araújo *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2017).

A separação eletrostática é decorrente da passagem de uma mistura de particulados por um campo elétrico estabelecido entre dois eletrodos: um aterrado e outro eletrostático (Djillali *et al.*, 2021). A configuração mais usual apresenta um rolo como eletrodo aterrado; contudo, uma outra configuração de relevância apresenta uma placa como eletrodo aterrado. Nesta configuração, as partículas deslizam através da placa, que retira a carga das mesmas por estar aterrada e possibilita que as partículas condutoras sejam atraídas pelo eletrodo eletrostático através do mecanismo de indução (Silveira *et al.*, 2017). Para aumentar a eficiência de separação, é possível utilizar adicionalmente um eletrodo de ionização, que adere as partículas não-condutoras à placa através do mecanismo de bombardeamento iônico (Younes *et al.*, 2009). Com auxílio destes mecanismos, as partículas condutoras são separadas das partículas não-condutoras.

A literatura apresenta diversos estudos em relação a separação eletrostática na reciclagem de cabos (Djillali *et al.*, 2021; Bedeković e Trbović, 2020; Salama *et al.*, 2018). No entanto, a maioria dos trabalhos que abordam esta técnica utilizam o separador eletrostático do tipo rolo para tal finalidade. Estudos com separadores do tipo placa são escassos, ainda mais no caso de cabos coaxiais, que apresentam diferentes camadas concêntricas de materiais condutores e não-condutores, dificultando a separação (Martins *et al.*, 2020). Devido à natureza dos materiais que compõem os cabos, estudos relativos à sua reciclagem são importantes, tanto por razões ambientais quanto por razões econômicas. Ambientalmente o descarte destes materiais é prevenido, enquanto economicamente é possível a reinserção destes materiais na cadeia produtiva (Djillali *et al.*, 2021; Bedeković e Trbović, 2020).

Portanto, este trabalho teve por objetivo a reciclagem de cabos utilizando a separação eletrostática com separador do tipo placa. Os cabos utilizados foram inicialmente cominuídos e peneirados, sendo posteriormente submetidos à separação eletrostática com separador do tipo placa. Os parâmetros avaliados na separação eletrostática foram o ângulo do eletrodo de placa e o ângulo do defletor.

MATERIAIS E MÉTODOS

Cabos Coaxiais

Os cabos coaxiais do tipo RGC-59 foram obtidos em uma empresa de Santa Maria – RS, Brasil. Uma caracterização prévia deste material apresentou em sua composição alumínio, aço cobreado, PVC, PE e poliéster aluminizado (Martins *et al.*, 2020).

Processamento Mecânico

Os cabos coaxiais foram submetidos a processamento mecânico conforme descrito na Figura 1.

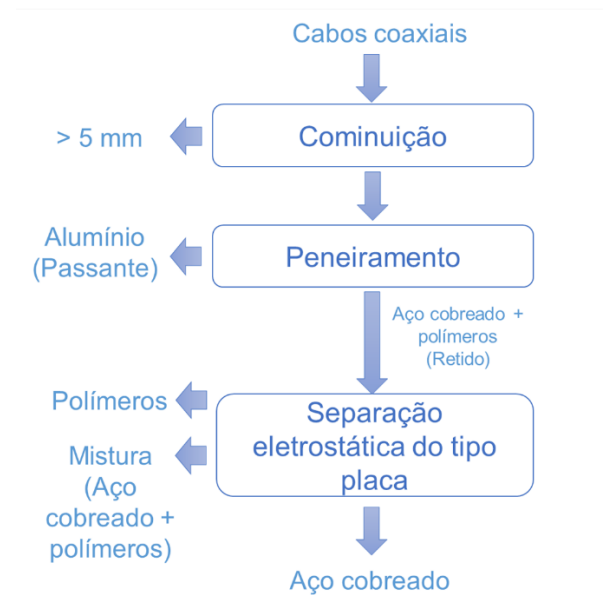


Figura 1: Fluxograma do processo de separação dos cabos coaxiais

Inicialmente, os cabos foram cominuídos a tamanho particulado em um moinho de facas (Modelo N-150, RONE) com malha de saída de abertura 5 mm. Após a cominuição, os cabos particulados foram peneirados em uma peneira vibratória (Modelo VP-01, BERTEL) por 10 min, com peneiras de Tyler 100 e 28, para obter o alumínio na fração passante, devido ao menor diâmetro apresentado em relação às outras partículas (Martins *et al.*, 2020).

Após peneiramento, a fração retida foi submetida à separação eletrostática no separador do tipo placa (Modelo EPS 14/01S, INBRAS), conforme representado na Figura 2. Nesta configuração, as partículas de cabos

passaram através de um campo elétrico gerado entre o eletrodo eletrostático e o eletrodo de placa. Depois da separação, as partículas foram coletadas em coletores destinados à fração condutora e fração não-condutora.

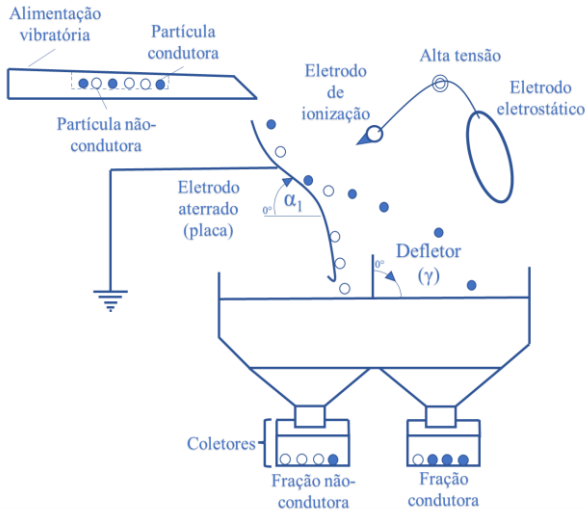


Figura 2: Representação do funcionamento do separador eletrostático do tipo placa.

Os parâmetros avaliados na separação eletrostática foram o ângulo do eletrodo de placa (α_1 , avaliado em 45° , 50° e 55°) e o ângulo do defletor (γ , avaliado em $-7,5^\circ$, 0° e $7,5^\circ$). Os parâmetros fixados na separação eletrostática foram: tensão (30 kV), alimentação vibratória (30% de sua capacidade total), distância do eletrodo eletrostático (15 cm), ângulo do eletrodo eletrostático (50°), distância do eletrodo de ionização (11 cm) e ângulo do eletrodo de ionização (60°). Estes parâmetros foram fixados conforme Richard *et al.* (2017). Adicionalmente, os experimentos foram conduzidos na faixa de temperatura de $22-25^\circ\text{C}$, com umidade relativa do ar na faixa de 40-50%. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

A pureza e a eficiência de recuperação na separação eletrostática foram calculadas de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente:

$$Pu (\%) = \frac{m_{\text{metal}}}{m_{\text{total}}} \quad (1)$$

$$Re (\%) = \frac{m_{\text{metal}}}{m_{\text{metal-total}}} \quad (2)$$

em que Pu é a pureza, Re é a eficiência de recuperação, m_{metal} é a massa do metal presente na fração de interesse (g), m_{total} é a massa total de materiais na fração de interesse (g) e $m_{\text{metal-total}}$ é a massa de metal total em todas as frações advindas da operação (g).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ângulo do eletrodo de placa (α_1)

O ângulo do eletrodo de placa é um parâmetro importante na separação eletrostática por definir a velocidade em que as partículas realizarão sua trajetória através do campo elétrico gerado entre os eletrodos. Os resultados referentes à avaliação do ângulo do eletrodo de placa estão apresentados na Figura 3, em termos de pureza e eficiência de recuperação de aço cobreado.

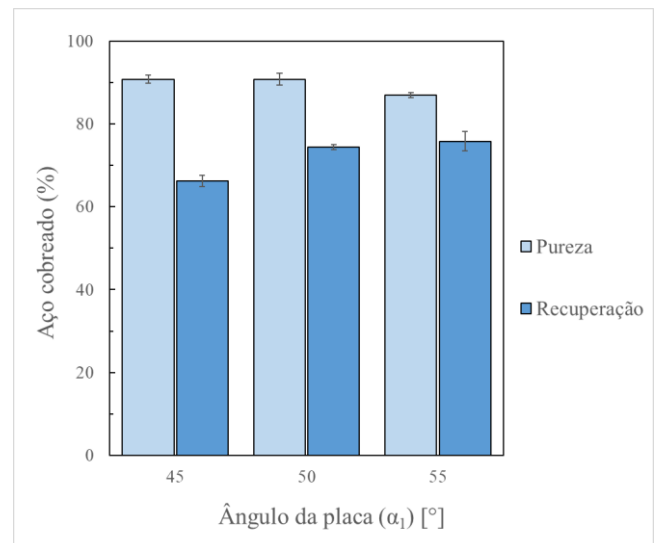


Figura 3: Efeito do ângulo da placa na pureza e recuperação de aço cobreado com separador do tipo placa ($\gamma = 0^\circ$)

Um ângulo de 45° possibilitou a maior pureza alcançada, com $90,82 \pm 0,63$ wt.%, seguido de 50° e 55° ($90,79 \pm 1,07$ wt.% e $86,95 \pm 0,59$ wt.%, respectivamente). Anteriormente, o melhor valor de ângulo de placa para separação de materiais provenientes de cabos elétricos segundo Richard *et al.* foi 55° (Richard *et al.*, 2017). Este comportamento

distinto pode ser creditado à natureza diferente dos materiais separados, visto que Richard *et al.* separaram fios rígidos e flexíveis que compunham cabos elétricos, diferentes dos cabos coaxiais aqui testados. Segundo os autores, valores menores do que 55° não promoviam velocidade suficiente para as partículas deslizarem através da placa, enquanto valores maiores acarretavam em partículas deslizando com velocidades muito altas, inviabilizando sua atração pelo eletrodo eletrostático. Uma lógica similar pode ser aplicada aos menores valores testados neste estudo (45° e 50°): valores menores que esta faixa não acarretavam em velocidades suficientes para ocorrer o deslize das partículas na placa, enquanto valores maiores acarretavam em partículas muito velozes com pouca influência dos mecanismos de indução e bombardeamento iônico (Richard *et al.*, 2017).

Em termos de eficiência de recuperação, o ângulo do eletrodo de placa apresentou melhores resultados em 55° , seguido de 50° e 45° ($75,79 \pm 2,35$ wt.%, $74,39 \pm 0,59$ wt.% e $66,30 \pm 1,34$ wt.%, respectivamente). Estes resultados indicam que mais partículas condutoras caíram no coletor destinado à fração condutora em maiores ângulos do eletrodo de placa, uma vez que maiores ângulos acarretam em maiores velocidades das partículas. Como desvantagem partículas não-condutoras também caem em maior quantidade no coletor destinado à fração condutora, o que diminui a pureza (Richard *et al.*, 2017; Vlad *et al.*, 2000). Por esta razão, em conjunto com os resultados da pureza o valor intermediário testado (50°) foi escolhido para os experimentos subsequentes, por obter valores adequados de pureza e eficiência de recuperação.

Ângulo do defletor (γ)

O ângulo do defletor é um parâmetro importante na separação eletrostática por se tratar de um obstáculo para as partículas, afetando suas trajetórias e, consequentemente, influenciando a separação de acordo com sua posição (Bedecković e Trbović, 2020). Os resultados para este parâmetro estão apresentados na Figura 4, em termo de pureza e eficiência de recuperação do aço cobreado.

A pureza de aço cobreado obtida foi similar em todos os ângulos de defletor

testados, como maior valor obtido para $-7,5^\circ$, sendo próximo aos valores de 0° e $7,5^\circ$ ($90,86 \pm 1,02$ wt.%, $90,79 \pm 1,07$ wt.% e $90,46 \pm 1,01$ wt.%, respectivamente). Estes resultados demonstram que o ângulo do defletor não apresentou grande influência na pureza do aço cobreado.

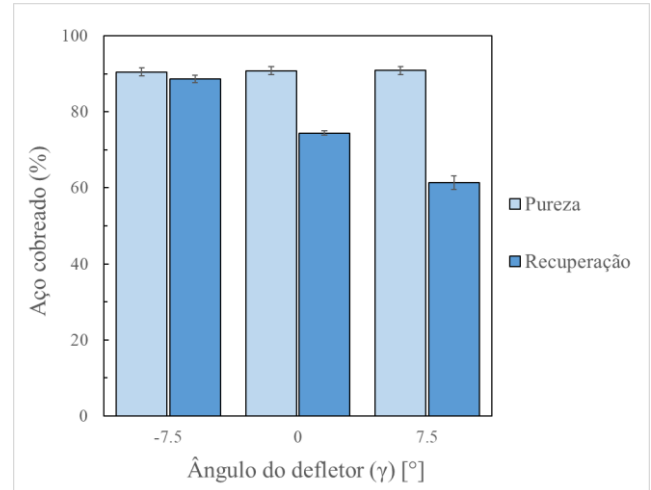


Figura 4: Efeito do ângulo do defletor na pureza e recuperação de aço cobreado com separador do tipo placa ($\alpha_1 = 50^\circ$)

Contudo, em termos de eficiência de recuperação, é possível observar uma tendência de aumento com a diminuição do ângulo do defletor, com o maior valor obtido em $-7,5^\circ$ ($88,65 \pm 0,94$ wt.%) e o menor obtido em $7,5^\circ$ ($61,31 \pm 1,77$ wt.%). Este comportamento pode ser atribuído a mais partículas condutoras caindo no coletor destinado à fração condutora quando o ângulo é menor. Com o aumento do ângulo, o número de partículas condutoras caindo neste coletor diminui, diminuindo a recuperação (Bedecković e Trbović, 2020). Portanto, estes resultados indicam que um ângulo de defletor de $-7,5^\circ$ apresenta altos valores de pureza e eficiência de recuperação, sendo o mais indicado para ser utilizado na separação eletrostática de cabos coaxiais com separador do tipo placa, em conjunto com um ângulo de eletrodo de 50° .

Através dos valores obtidos de pureza e eficiência de recuperação com os dois parâmetros testados é possível concluir a viabilidade de utilizar a configuração do tipo placa na separação de cabos coaxiais. Estes resultados possibilitam também o estudo e uso desta configuração para outros tipos de resíduos eletroeletrônicos.

CONCLUSÕES

Os resultados da separação eletrostática de cabos coaxiais demonstraram que é possível obter aço cobreado com consideráveis valores de pureza e eficiência de recuperação utilizando esta configuração.

Os parâmetros avaliados de ângulo do eletrodo de placa e ângulo do defletor foram definidos como 50° e $-7,5^\circ$, respectivamente. Com estes parâmetros foi possível alcançar uma pureza de aço cobreado de 90,86%, em conjunto com 88,65% de eficiência de recuperação. Estes valores demonstraram a viabilidade de utilizar esta configuração menos usual de separador eletrostático.

Pode-se concluir que a separação eletrostática com eletrodo do tipo placa consiste de uma alternativa potencial para a reciclagem de cabos coaxiais. Adicionalmente, este estudo demonstra a possibilidade de utilizar esta configuração para reciclagem de outros tipos de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos

NOMENCLATURA

PE – polietileno;
 Pu – pureza (%);
 PVC – cloreto de polivinila;
 Re – eficiência de recuperação (%);
 REEE – resíduos de equipamentos eletroeletrônicos;
 α_1 – ângulo do eletrodo de placa;
 γ – ângulo do defletor

REFERÊNCIAS

- BEDEKOVIĆ, G.; TRBOVIĆ, R. (2020), Electrostatic separation of aluminium from residue of electric cables recycling process, *Waste Management* Vol. 108, p. 21–27.
- DE ARAÚJO, M.C.P.B.; CHAVES, A.P.; ESPINOSA, D.C.R.; *et al.* (2008), Electronic scraps - Recovering of valuable materials from parallel wire cables. *Waste Management*, Vol. 28, p. 2177–2182.
- DJILLALI, A.; FETHI, B.M.; TILMATINE, A. (2021), Electrostatic separation of particles used as complement to mechanical recycling plant of industrial waste. *International Journal of Environmental Studies*, p. 61–1711.
- FORTI, V.; BALDÉ, C.P.; KUEHR, R.; BEL, G. (2020), The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam.
- LI, L.; LIU, G.; PAN, D.; WANG, W.; WU, Y.; ZUO, T. (2017), Overview of the recycling technology for copper-containing cables, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 126, p.132-140.
- MARTINS, T.R.; MROZINSKI, N.S.; BERTUOL, D.A.; *et al.* (2020) Recovery of copper and aluminium from coaxial cable wastes using comparative mechanical processes analysis. *Environmental Technology*, Vol. 197, p. 1–13.
- RICHARD, G.; TOUHAMI, S.; ZEGHLOUL, T.; *et al.* (2017), Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator, *Waste Management*, Vol. 60, p.112–122.
- SALAMA, A.; RICHARD, G.; MEDLES, K.; *et al.* (2018), Distinct recovery of copper and aluminum from waste electric wires using a roll-type electrostatic separator. *Waste Management*, Vol. 76, p.207–216.
- SILVEIRA, A.V.M.; SANTANA, M.P.; TANABE, E.H.; *et al.* (2017), Recovery of valuable materials from spent lithium ion batteries using electrostatic separation. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 169, p. 91–98.
- SURESH, S.S.; MOHANTY, S.; NAYAK, S.K. (2017), Composition analysis and characterization of waste polyvinyl chloride (PVC) recovered from data

- cables. Waste Management, Vol. 60, p.100–111.
- VLAD, S.; IUGA, A.; DASCALESCU L. (2000), Modelling of conducting particle behaviour in plate-type electrostatic separators. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 33, p. 127–133.
- XIAO, S.; XIONG, W.; WANG, L.; *et al.* (2016), The Treatment Technology of Recycling Scrap Wire and Cable, Vol. 500–503.
- YOUNES, M.; TILMATINE, A.; MEDLES, K.; *et al.* (2009), Numerical Modeling of Insulating Particles Trajectories in Roll-type Corona-Electrostatic Separators. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, p. 629–634.