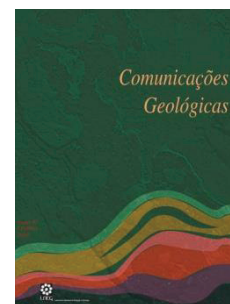


Separação de plásticos para reciclagem – uso de métodos mineiros

Separation of plastics for recycling – use of mining methods

F. Pita^{1*}, A. Castilho¹



Artigo original
Original article

Recebido em 28/02/2018 / Aceite em 16/12/2019

Publicado em agosto de 2020

© 2020 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Resumo: Embora os plásticos sejam muito bons para utilizar, eles são maus de reciclar porque são difíceis de separar entre si. Este trabalho tem por objectivo estudar a influência da concentração de três agentes molhantes/depressores (ácido tânico, saponina e lignosulfonato de sódio) na flutuabilidade de seis plásticos e comparar a separação por flutuação por espumas e por jigagem de cinco misturas de bi-componentes de plásticos: PS/PMMA, PS/PET-S, PS/PET-D, PS/PVC-M e PS/PVC-D. Excluindo a separação por flutuação da mistura PS/PMMA, a eficiência de separação das cinco misturas pelos dois métodos foi superior a 70%. Para os dois processos de separação a mistura PS/PVC conduziu aos melhores resultados, obtendo-se máxima eficiência de separação para a flutuação (90,3%). A separação gravítica por jigagem, embora dependa da diferença de densidade dos plásticos, é fortemente condicionada pela forma das partículas.

Palavras chave: Plásticos, flutuação por espumas, jigagem.

Abstract: Although plastics are very good to use, they are bad to recycle because they are difficult to separate from each other. In this work the separation by jigging and froth flotation, methods widely used in the mineral processing, of five bi-component plastics mixtures (PS/PMMA, PS/PET-S, PS/PET-D, PS/PVC-M and PS/PVC-D) were performed. Also it was studied the influence of the wetting agents' concentration on plastics floatability. Excluding the flotation separation of the PS/PMMA mixture, the separation efficiency of the five mixtures by the two methods was greater than 70%. For the two separation processes the PS/PVC mixture led to the best results, obtaining maximum separation efficiency for the froth flotation (90.3%). Gravity separation by jigging although depending on the difference of the plastics density is strongly conditioned by the shape of the particles.

Keywords: Plastics, froth flotation, jigging.

¹ Universidade de Coimbra, Centro de Geociências, Departamento Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra, Portugal.

* Autor correspondente/corresponding author: fpita@dct.uc.pt

1. Introdução

A produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) é condicionada por vários fatores, como número de habitantes, hábitos públicos e grau de desenvolvimento socioeconómico. Em Portugal, até 2009, verificou-se um aumento da produção de RSU a uma taxa de

aproximadamente 3% ao ano, tendo-se verificado nesse ano uma captação de 1,42 kg/ano, correspondendo uma produção anual de 5,5 milhões de toneladas de RSU. Nos anos seguintes observou-se uma diminuição da produção de RSU em resultado da crise económica e financeira mundial, com consequentes alterações nos padrões de consumo e, por conseguinte, na produção de resíduos. A produção média europeia de resíduos tem-se mantido mais ou constante ao longo dos últimos anos. Em 2017, a produção de RSU per capita em Portugal foi de 1,32 kg/dia, valor similar à média europeia (1,33 kg/dia), mas inferior à captação máxima atingida na Dinamarca (2,14 kg/dia) e muito acima do valor mínimo atingido na Roménia (0,75 kg/dia).

A gestão correcta dos RSU é uma das principais preocupações ambientais das entidades públicas, havendo a preocupação da sua valorização, minimizando a quantidade de RSU a depositar em aterro sanitário. Na união europeia, em 2017, a taxa média de reciclagem de materiais foi 29,6% (2005 - 20,3%); a taxa de média de compostagem foi 16,7% (2005 - 11,4%); a taxa média de incineração foi de 27,0% (2005 - 19%) e a taxa média de deposição aterro foi 23,3% (2005 - 42,8%). Também em Portugal tem vindo a diminuir a deposição de RSU em aterro. Em 2016, a taxa de reciclagem foi de 14,4%, a valorização orgânica foi de 16,7%, a incineração foi de 19,4% e a deposição em aterro foi de 44,7%, valor ainda muito superior à média na união europeia.

Nas últimas décadas, o aumento do consumo de plásticos, em resultado da sua versatilidade e excelentes propriedades, tornaram-no num dos principais constituintes dos RSU, representando cerca de 11% do seu peso. Em 2016, apesar da importância da reciclagem, apenas 31,1% dos resíduos de plásticos pós-consumo na Europa foram reciclados e 41,6% foram recuperados através da incineração com recuperação energética, sendo a deposição em aterro ainda uma importante forma de eliminação dos resíduos de plásticos (cerca de 27,3%) (PlasticsEurope, 2018). Em Portugal, no mesmo ano, 32,3% dos resíduos de plásticos foram reciclados, 30,5% foram valorizados energeticamente e 37,2% foram depositados em aterro.

Os plásticos para serem reciclados têm de ser separados dos restantes constituintes, e têm também de ser separados entre si, o que constitui uma dificuldade acrescida. Com o objetivo de separar os plásticos entre si, têm vindo a ser desenvolvidos estudos com

vista à aplicação de métodos de separação amplamente utilizados na indústria mineira, particularmente a flutuação por espumas, que se baseia na hidrofobicidade das partículas, e métodos gravíticos, que se baseiam na diferença de densidade das partículas (Tsunekawa *et al.*, 2005; Burat *et al.*, 2009; Abbasi *et al.*, 2010; Carvalho *et al.*, 2012).

Este estudo tem como objetivo comparar a separação de misturas de plásticos pelo processo de flutuação por espumas e por jigagem (método gravítico).

2. Materiais e métodos

Utilizaram-se seis tipos de plástico: Poliestireno (PS), Polimetilmetacrilato (PMMA), Polietileno tereftalato (PET-S), Polietileno tereftalato (PET-D), Policloreto de vinilo (PVC-M) e Policloreto de vinilo (PVC-D), cujas densidades são as seguintes: PS: 1,047 g/cm³; PMMA: 1,204 g/cm³; PET-S: 1,372 g/cm³; PET-D: 1,364 g/cm³; PVC-M: 1,326 g/cm³ e PVC-D: 1,209 g/cm³. As partículas utilizadas tinham tamanhos entre 1 e 5,6 mm. As partículas de PMMA, PS e PVC-D tinham forma mais regular e as partículas dos dois PETs tinham forma mais lamelar.

A separação por flutuação por espumas e por jigagem foram realizadas sobre as seguintes misturas bi-componente: PS/PMMA, PS/PET-S, PS/PET-D, PS/PVC-M e PS/PVC-D, contribuindo cada plástico com 50% do peso.

Os ensaios de flutuação por espumas foram realizados numa célula Denver com uma capacidade de 3 dm³ e usou-se o ácido tânico, saponina e lignossulfonato de sódio como depressores (molhantes) dos plásticos, e o metil isobutil carbinol (30x10⁻³ g/L) como espumante. Numa primeira fase, foram realizados ensaios de flutuação a diferentes concentrações dos agentes depressores sobre cada um dos seis plásticos. Numa segunda fase, realizaram-se ensaios de flutuação para as misturas bi-componente de plásticos, sob a concentração de depressor que conduziu a separações mais efectivas.

Os ensaios de jigagem foram realizados numa jiga Denver com secção rectangular (10x15x10 cm), e pretendia-se que o PS, plástico menos denso, saísse por transbordo, constituindo o flutuado, e os outros plásticos constituíssem o afundado.

O controlo dos ensaios de separação foi realizado a partir da recuperação e do teor de cada tipo de plástico no flutuado e no afundado, determinados após a separação manual e pesagem dos dois tipos de plásticos presentes no flutuado e afundado, pois eles apresentam cores e formas diferentes.

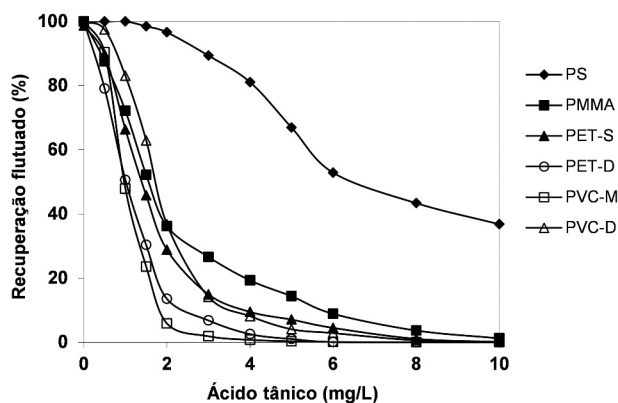


Figura 1. Flutuabilidade dos seis plásticos *versus* concentração de ácido tânico (MIBC: 30x10⁻³ g/L).

Figure 1. Floatability of six plastics *versus* tannic acid concentration (MIBC: 30x10⁻³ g/L).

3. Resultados e discussão

A recuperação no flutuado dos seis plásticos diminuiu com o aumento da concentração dos três agentes molhantes (Figs. 1-3). Comportamento similar foi observado por Basarová *et al.* (2005) e Wang *et al.* (2014). Verifica-se que todos os plásticos são naturalmente hidrofóbicos porque, na ausência de agente molhante, a recuperação do flutuado foi de cerca de 100% (Figs. 1-3). O ácido tânico é o agente molhante mais forte, pois a depressão dos plásticos ocorre para muito menor concentrações deste reagente do que dos outros dois agentes.

Na presença de ácido tânico o PS apresenta a maior flutuabilidade e os outros cinco plásticos apresentam variação similar da flutuabilidade, sendo deprimidos para uma baixa concentração de ácido tânico (Fig. 1). O PET-D e PVC-M apresentam a menor flutuabilidade. A diferença de flutuabilidade entre o PS e os outros cinco plásticos pode ser reforçada com a adição apropriada de ácido tânico. A diferença máxima na recuperação de PS e dos outros cinco plásticos no flutuado é obtida para concentrações de ácido tânico entre 2x10⁻³ g/L e 3x10⁻³ g/L.

A saponina teve um efeito molhante mais forte sobre o PVC-M e menos intenso sobre o PS, PMMA e PET-D, apresentando estes plásticos maior flutuabilidade (Fig. 2). A maior diferença de flutuabilidade entre o PVC-M e os outros plásticos é obtida para uma concentração de saponina entre 10x10⁻³ g/L e 30x10⁻³ g/L.

A depressão de plásticos com lignossulfonato de sódio só pode ser alcançada com altas concentrações (Fig. 3). Na presença deste agente molhante o PVC-M e PVC-D são os plásticos com menor flutuabilidade. O lignossulfonato de sódio é mais efectivo na depressão do PS do que os outros dois reagentes. A maior diferença de flutuabilidade entre o PVC-M e os outros plásticos é obtida para concentrações de lignossulfonato de sódio entre 100x10⁻³ g/L e 300x10⁻³ g/L.

Em face destes resultados, os ensaios de flutuação sobre misturas bi-componentes de plásticos visaram a flutuação do PS e a depressão dos restantes plásticos na presença de ácido tânico, tendo-se usado uma concentração de ácido tânico de 2x10⁻³ g/L. A recuperação e o teor de cada um dos dois plásticos no flutuado e afundado dos dois processos de separação das cinco misturas e a eficiência de separação são apresentados na tabela 1.

A jigagem permitiu obter afundados com elevado teor no plástico “denso” porque os ensaios foram conduzidos de modo a obter um afundado o mais expurgado possível de PS, pois este plástico tem menor densidade que os outros cinco. Assim, a

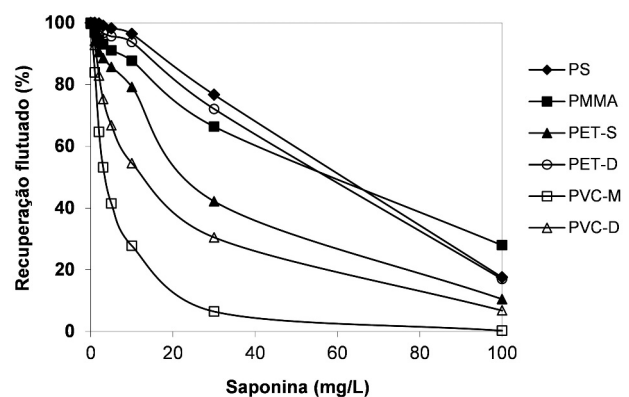


Figura 2. Flutuabilidade dos seis plásticos *versus* concentração de saponina (MIBC: 30x10⁻³ g/L).

Figure 2. Floatability of six plastics *versus* saponin concentration (MIBC: 30x10⁻³ g/L).

recuperação do PS no flutuado foi de aproximadamente 100%. A jigagem conduziu a melhores resultados para as misturas

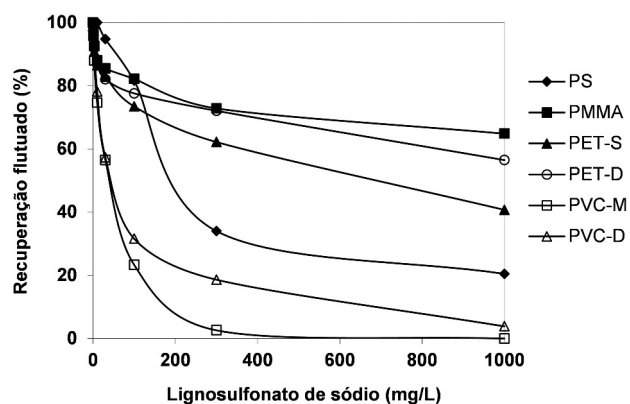


Figura 3. Flutuabilidade dos seis plásticos *versus* concentração de lignossulfonato de sódio (MIBC: 30×10^{-3} g/L).

Figure 3. Floatability of six plastics *versus* sodium lignosulfonate concentration (MIBC: 30×10^{-3} g/L).

PS/PMMA e PS/PVC-M, no entanto a flutuação conduziu a melhores resultados para as misturas PS/PET-D e PS/PVC-M. Para a mistura PS/PET-S, os dois métodos conduziram a separações com semelhante qualidade, traduzido numa eficiência de separação de 72%.

Os melhores resultados foram obtidos para a mistura PS/PVC-M, conseguindo-se uma eficiência de separação de 90,3% na flutuação por espumas e uma eficiência de separação de 85,1% na jigagem. Na flutuação a elevada eficiência de separação resultou do PVC-M apresentar o menor grau de fluatibilidade, sendo facilmente deprimido na presença de ácido tânico e na jigagem os bons resultados resultaram do PVC-M apresentar elevada densidade e as suas partículas não terem uma forma lamelar, afundando com relativa facilidade no leito de jigagem. Nesta mistura, obteve-se por jigagem um afundado quase puro em PVC-M (99,5%) e na flutuação obteve-se um afundado com um teor de 95,8% em PVC-M e um flutuado com um teor de 94,5% em PS.

Uma vez que a jigagem é um processo gravítico, que se baseia na diferença de densidade dos materiais a separar, neste processo esperavam-se os melhores resultados para as misturas de PS com os dois PETs e os piores resultados para as misturas PS/PMMA e PS/PVC-D, pois os dois PETs são os plásticos mais densos. Porém,

Tabela 1. Resultados da separação por flutuação e por jigagem das misturas de PS com os outros cinco plásticos.

Table 1. Results of the flotation and jig tests separation on the mixtures of PS with other five plastics.

| Mistura | Ensaio | FLUTUADO | | AFUNDADO | | Eficiência separação (ES) (%) |
|---------|-----------|--------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------------------------|
| | | Recuperação PS (%) | Teor PS (%) | Recuperação PMMA (%) | Teor PMMA (%) | |
| PS/PMMA | Flutuação | 96,32 | 72,95 | 64,28 | 94,58 | 60,60 |
| | Jigagem | 99,61 | 86,05 | 83,05 | 99,55 | 82,66 |
| PS/PETS | Flutuação | 95,32 | 80,39 | 76,75 | 94,25 | 72,07 |
| | Jigagem | 99,58 | 78,16 | 72,70 | 99,35 | 72,28 |
| PS/PETD | Flutuação | 94,50 | 86,34 | 85,05 | 93,93 | 79,55 |
| | Jigagem | 99,50 | 79,00 | 71,55 | 99,16 | 71,05 |
| PS/PVCM | Flutuação | 95,89 | 94,46 | 94,38 | 95,83 | 90,27 |
| | Jigagem | 99,52 | 87,33 | 85,56 | 99,45 | 85,08 |
| PS/PVCD | Flutuação | 96,52 | 80,31 | 76,34 | 95,64 | 72,86 |
| | Jigagem | 99,44 | 81,95 | 78,67 | 98,91 | 78,11 |

Nota: a recuperação do plástico P1 (RP1) no flutuado (por exemplo) é a razão entre o peso do plástico P1 no flutuado e o peso do plástico P1 na alimentação; o teor do plástico P1 no flutuado (por exemplo) é definido pela razão entre o peso do plástico P1 no flutuado e a soma dos pesos dos plásticos P1+P2 no flutuado; a eficiência de separação é definida pela expressão $\eta = RP1 - RP2$, onde RP1 é a recuperação do plástico 1 no flutuado e RP2 é a recuperação do plástico 2 no flutuado.

as misturas PS/PET-S e PS/PET-D apresentam os piores resultados na jigagem. Este comportamento resulta da forma lamelar das partículas dos dois PETs, conferindo-lhe maior dificuldade em penetrar no leito de jigagem, saindo mais facilmente por transbordo, e gerando flutuados menos puros em PS.

A separação por flutuação da mistura PS/PMMA conduziu aos piores resultados, observando-se uma eficiência de separação de apenas 60,6%. Embora o PMMA apresente menor flutuabilidade do que o PS ele apresenta maior flutuabilidade que os restantes quatro plásticos.

4. Conclusões

A qualidade da separação operada na flutuação por espumas e na jigagem depende do tipo de mistura de plásticos. Jigagens mais eficientes são obtidas quando as partículas dos plásticos menos densos têm forma lamelar e as partículas dos plásticos mais densos têm forma regular. A flutuabilidade dos seis plásticos diminui com o aumento da concentração dos três agentes molhantes. O ácido tânico é o agente molhante mais forte. Na presença de ácido tânico, o PS apresenta maior flutuabilidade e os outros plásticos apresentam flutuabilidade similar entre si.

A qualidade da separação das cinco misturas de plásticos é razoável, sendo maior a eficiência de separação da mistura PS/PVC-M pelos dois processos de separação, sendo máxima a da flutuação (90,3%). A jigagem e a flutuação por espumas têm potencialidades para poderem ser utilizados como métodos de separação de plásticos.

Agradecimentos

É reconhecido o apoio financeiro da FCT-MEC através de fundos nacionais e, quando aplicável, cofinanciado pelo FEDER no âmbito da parceria PT2020, através do projeto de pesquisa UID/Multi/00073/2013 do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra.

Referências

- Abbasi, A., Salarirad, M. M., Ghasemi, I., 2010. Selective Separation of PVC from PET/PVC Mixture Using Flotation by Tannic Acid Depressant. *Iranian Polymer Journal*, **19**(7): 483-489.
- Basarová, P., Bartovská L., Korinek, K., Horn D., 2005. The influence of flotation agent concentration on the wettability and flotability of polystyrene. *Journal of Colloid and Interface Science*, **286**: 333-338.
- Burat, F., Güney, A., Kangal, M. O., 2009. Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method. *Waste Management*, **29**: 1807-1813.
- Carvalho, M. T., Ferreira, C., Santos, L. R., Paiva, M. C., 2012. Optimization of froth flotation procedure for poly (ethylene terephthalate) recycling industry. *Polymer Engineering and Science*, **52**: 157-164.
- PlasticsEurope, 2018. *Plastics - the Facts 2017. An analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. Brussels, Belgium, 43. < <http://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/plastics-facts-2017>.
- Wang, H., Wang, C. Q., Fu, J. G., Gu, G. H., 2014. Flotability and flotation separation of polymer materials modulated by wetting agents. *Waste Management*, **34**: 309-315.
- Tsunekawa, T., Naoi, B., Ogawa, S., Hori, K., Hiroyoshi, N., Ito, M., Hirajima, T., 2005. Jig Separation of Plastics from Scrapped Copy Machines. *International Journal of Mineral Processing*, **76**: 67-74.