

Separação gravítica de mistura de plásticos

Gravitic separation of plastics mixture

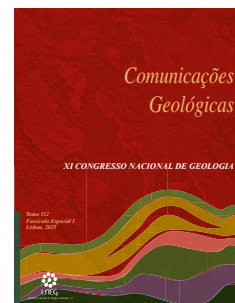
F. A. Pita^{1*}

DOI: <https://doi.org/10.34637/s16z-0w07>

Recebido em 28/09/2023 / Aceite em 16/02/2024

Publicado online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original
Original article

Resumo: Os resíduos de plásticos são dos principais problemas ambientais, sendo a reciclagem a solução mais correta. Este trabalho tem como objetivo a separação de uma mistura de quatro plásticos: poliestireno (PS), polimetil-metacrilato (PMMA), policloreto vinilo (PVC) e polietileno tereftalato (PET) por meio denso (soluções de cloreto de sódio e de nitrato de amónio) e por flutuação por espumas. A separação em meio denso permitiu a separação perfeita do plástico menos denso (PS) dos plásticos de densidade intermédia (PMMA e PVC) e do plástico de maior densidade (PET). A separação em meio denso também permitiu a separação seletiva dos plásticos de densidade intermédia (PMMA e PVC) do plástico de maior densidade (PET). Como o PMMA e o PVC possuem densidade semelhante, a separação foi realizada por flutuação por espumas, utilizando lignosulfonato de sódio como agente molhante seletivo do PVC, obtendo-se um afundado enriquecido em PVC e um flutuado enriquecido em PMMA.

Palavras-chave: plásticos, separação, meio denso, flutuação por espumas.

Abstract: Plastic waste is one of the main environmental problems, with recycling being the most correct solution. This work aims to study the separation of a mixture of four plastics: polystyrene (PS), polymethyl methacrylate (PMMA), polyvinyl chloride (PVC) and polyethylene terephthalate (PET) by sink-float and froth flotation. In sink-float separation, aqueous sodium chloride solution and aqueous ammonium nitrate solution were used. Sink-float method allowed almost perfect separation of less dense plastic (PS) from intermediate density plastics (PMMA and PVC) and from high density plastic (PET), obtaining an almost pure PS float, containing only some PVC. Sink-float also allowed selective separation of intermediate density plastics (PMMA and PVC) from high density plastics (PET). As PMMA and PVC have similar density, their separation was carried out by froth flotation, using sodium lignosulphonate as a selective wetting agent of PVC, allowing a separation efficiency of about 85%.

Keywords: plastics, separation, sink-float, froth flotation

1. Introdução

Os plásticos, em resultado do seu baixo preço, versatilidade e excelentes propriedades, são um dos materiais mais presentes no nosso quotidiano. A sua produção mundial tem aumentado continuamente, atingindo 391 milhões de toneladas em 2021, valor que contrasta com as cerca de 1,5 milhões de toneladas produzidas em 1950 (PlasticsEurope, 2022). Em resultado do aumento do seu consumo, também a produção de resíduos de plásticos tem aumentado. Nas últimas duas décadas a produção de resíduos de plásticos mais que duplicou, passando de 155 milhões de toneladas em 2000 para 381 milhões de toneladas em 2021. Os plásticos são um dos principais constituintes dos resíduos sólidos urbanos, representando 12% do seu peso e cerca de 25% do seu volume (OECD, 2022). O acentuado aumento da produção de resíduos de plásticos deve-se não apenas ao aumento do consumo mas também ao facto de cerca de dois terços dos plásticos terem uma vida relativamente curta (OECD, 2022). Apesar das múltiplas utilizações dos plásticos e da sua contribuição para a qualidade de vida, o abandono de grande parte dos resíduos de plásticos e os milhões de toneladas de resíduos que anualmente se acumulam nos oceanos têm conferido aos plásticos uma reputação negativa, começando a haver forte pressão pública e publicação de legislação que restringe o seu uso.

Os resíduos de plásticos devem ser encarados não como algo sem qualquer valor, mas sim como um recurso, devendo ser utilizados como matéria-prima para a produção de novos produtos. Apesar da importância da sua reciclagem, em 2020 apenas cerca de 9% dos resíduos plásticos mundiais foram reciclados, enquanto que 19% foram incinerados, cerca de 50% foram depositados em aterro sanitário e os restantes 22% foram descartados em lixeiras não controladas, queimados a céu aberto ou abandonados no meio ambiente (OECD, 2022). Na União Europeia, em 2020, 35% dos resíduos de plástico foram reciclados, 42% incinerados e 23% depositados em aterros. Em Portugal, no mesmo ano, 32% foram reciclados, 35% foram incinerados com recuperação de energia e 33% foram depositados em aterro sanitário (PlasticsEurope, 2022).

Embora a reciclagem dos resíduos de plásticos seja a solução ambiental e economicamente mais correta, trata-se de uma operação desafiante, pois eles têm de ser separados dos outros tipos de resíduos e também os vários tipos de plásticos têm de ser separados entre si. Separar misturas plásticas não é uma tarefa fácil, pois existem muitos tipos de plásticos e a maioria deles possui propriedades semelhantes.

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

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

Nas últimas décadas têm sido realizados estudos sobre a possibilidade de separar misturas de plásticos através de métodos usados no tratamento de minérios. Desses métodos, salienta-se a separação gravítica (Yuan *et al.*, 2015; Quinn *et al.*, 2016; Fu *et al.*, 2017; Bauer *et al.*, 2018; Quelal *et al.*, 2022), que se baseia na diferente densidade dos plásticos, e a flutuação por espumas que se baseia na diferente hidrofobicidade dos plásticos (Shen *et al.*, 1999; Carvalho *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2015; Pita e Castilho, 2017; Wang *et al.*, 2019).

Neste trabalho analisou-se a separação de uma mistura de quatro plásticos granulados (PS, PMMA, PVC e PET) pela combinação do método de meio denso (gravítico) e da flutuação por espumas. A separação por flutuação por espumas foi usada quando a separação por meio denso foi ineficaz.

2. Materiais e métodos

Utilizaram-se quatro tipos de plásticos granulados, com calibre entre 1,0 mm e 5,6 mm, fornecidos por duas empresas portuguesas de reciclagem: poliestireno (PS, preto), polimetil-metacrilato (PMMA, branco), polietileno tereftalato (PET, transparente) e policloreto de vinilo (PVC, verde claro) Micronipol. Eles têm as seguintes densidades: PS:1,047g/cm³; PMMA:1,204g/cm³; PVC:1,209g/cm³ e PET:1,364g/cm³. Os plásticos para além de terem cores diferentes também têm forma ligeiramente diferente. As partículas de PMMA e de PS apresentam forma regular e as partículas de PVC e de PET apresentam forma lamelar.

A separação em meio denso é eficiente quando os plásticos têm diferença de densidade significativa. De acordo com a densidade dos plásticos é expectável que a separação em meio denso permita separar o PS dos outros três plásticos e também permita separar o PET do PMMA e do PVC. No entanto é expectável que aquele método não seja adequado para separar o PMMA do PVC, pois estes dois plásticos têm densidade semelhante.

Na separação em meio denso foram utilizados dois meios de separação: solução aquosa de cloreto de sódio, cuja densidade máxima obtida foi de 1,203g/cm³ e solução aquosa de nitrato de amónio cuja densidade máxima obtida foi de 1,380g/cm³. Na separação em meio denso os plásticos foram colocados num meio (solução aquosa) de densidade intermédia, onde os plásticos com densidade superior à densidade do meio afundaram e se separaram dos menos densos, que flutuaram. Estes testes de separação foram realizados num copo de vidro com capacidade de 1 dm³, e em cada teste foram utilizados 10 g de plástico. Tiveram a duração de 2 minutos (tempo necessário para que o plástico mais denso afundasse no meio denso). Após 2 minutos, o flutuado e o afundado foram recolhidos manualmente. Antes dos testes de separação por meio denso, os plásticos foram misturados com água da torneira em um agitador durante 5 minutos para que eles ficassem completamente humedecidos, atenuando assim a possibilidade de ligação de microbolhas de ar aos plásticos, pois estes são naturalmente hidrófobos.

Numa primeira fase foram realizados testes em meio denso sobre amostras de plástico monocomponente em soluções com diferentes densidades. Numa segunda fase realizaram-se ensaios de separação em meio denso para a mistura dos quatro plásticos, sob a densidade do meio denso que conduziu a separações mais seletivas.

Os testes de flutuação por espumas foram realizados numa célula Denver com capacidade de 3 dm³. Em cada teste usou-se 40 g da mistura PMMA/PVC, em proporções iguais, e foi condicionado durante 5 minutos com lignossulfonato de sódio (agente molhante) e posteriormente condicionado com metil isobutil carbinol (30x10⁻³ g/L) como agente espumante, durante 2 minutos, seguindo-se a flutuação durante 6 minutos.

Após os testes de separação em meio denso e por flutuação por espumas os produtos flutuado e afundado foram lavados com água corrente, secos e pesados. O controlo dos ensaios de separação de

mistura de plásticos 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 tipos de plásticos presentes no flutuado e afundado, pois eles apresentam cores e forma diferentes.

3. Resultados e discussão

Nas Figuras 1 e 2 representa-se o efeito da densidade do meio denso de solução aquosa de cloreto de sódio e de solução aquosa de nitrato de amónio, respectivamente, na recuperação dos quatro plásticos no flutuado. Nos dois meios de separação observa-se que a recuperação no flutuado dos quatro plásticos aumenta com o aumento da densidade do meio denso.

Quando se usou apenas água (densidade = 1,0g/cm³), algum PS flutuou. Embora o PS tenha uma densidade ligeiramente superior a 1,0g/cm³, a flutuação de algum PS resulta de poderem existir partículas com densidade inferior a 1,0g/cm³ ou de ocorrer ligação de microbolhas de ar a algumas partículas de PS sendo responsáveis pela sua flutuação. Quando se usou apenas água o PVC, PMMA e PET afundaram.

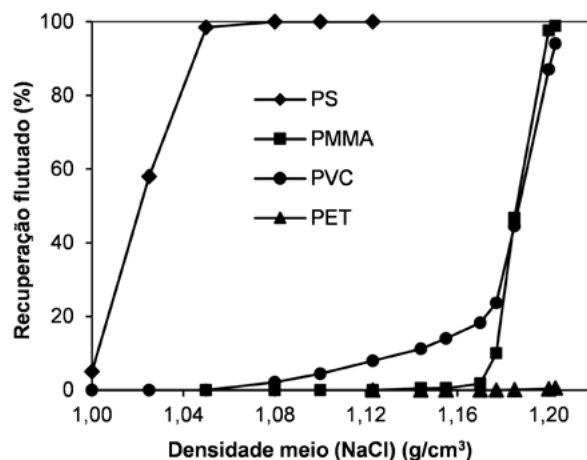


Figura 1. Influência da densidade da solução de cloreto de sódio na recuperação no flutuado dos quatro plásticos.

Figure 1. Influence of density of sodium chloride solution on floated recovery of four plastics.

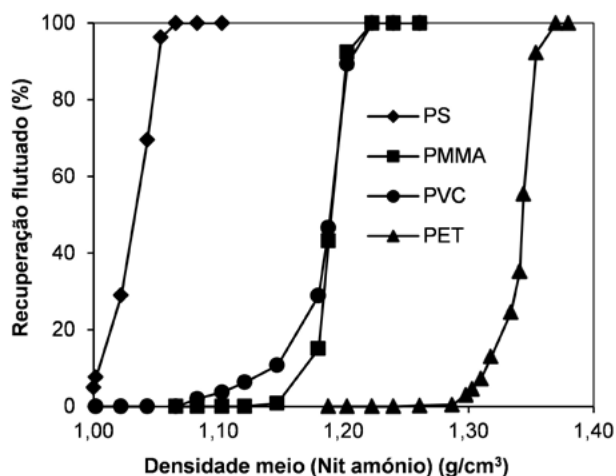


Figura 2. Influência da densidade da solução de nitrato de amónio na recuperação no flutuado dos quatro plásticos.

Figure 2. Influence of density of ammonium nitrate water solution on floated recovery of four plastics.

Nos dois meios densos o PS teve um maior aumento da flutuabilidade quando aumentou a densidade do meio denso em comparação com os outros três plásticos. Para um meio denso com uma densidade superior a $1,05\text{g/cm}^3$ todo o PS flutuou e para um meio denso com uma densidade superior a $1,205\text{g/cm}^3$ todo o PMMA e PVC flutuaram.

Para o PS e PMMA a recuperação no flutuado aumenta acentuadamente com a variação da densidade do meio, mas para o PVC o aumento da recuperação no flutuado é mais gradual.

Para a faixa de densidades avaliada com solução de cloreto de sódio, a recuperação no flutuado do plástico mais denso (PET) é nula, pois este plástico tem uma densidade claramente superior à densidade máxima do meio denso com cloreto de sódio ($1,203\text{g/cm}^3$).

Nos plásticos menos homogêneos, caso do PVC, há uma variação menos drástica da recuperação no flutuado versus densidade do meio, sendo este plástico mais difícil de separar. A hidrofobicidade dos plásticos também influencia a recuperação no flutuado, pois pode ocorrer a ligação de microbolhas a esses plásticos, condicionando o seu comportamento.

A solução de nitrato de amónio conduziu a uma melhor avaliação do comportamento do plástico mais denso (PET) do que a solução de cloreto de sódio, pois ela permitiu obter um meio com uma densidade máxima de $1,380\text{g/cm}^3$, ligeiramente superior à densidade daquele plástico. Para uma densidade de $1,380\text{g/cm}^3$, a recuperação no flutuado dos quatro plásticos foi de 100% (Figura 2). Na solução de nitrato de amónio o comportamento do PS, PMMA e PVC é semelhante ao observado para a solução de cloreto de sódio. No entanto, a recuperação no flutuado daqueles três plásticos na solução de nitrato de amónio é ligeiramente menor do que na solução de cloreto de sódio. Por exemplo, num meio com densidade de $1,025\text{g/cm}^3$ em solução com cloreto de sódio a recuperação de PS no flutuado foi de 54,2% e em solução de nitrato de amónio a recuperação de PS no flutuado foi de 40,5%. Para um meio com densidade de $1,080\text{g/cm}^3$ em solução com cloreto de sódio a recuperação de PVC no flutuado foi de 31,5% e em solução de nitrato de amónio a recuperação de PVC no flutuado foi de 28,9%. Embora os plásticos tenham sido previamente lavados, é provável que a formação de microbolhas de ar e sua ligação às partículas de plásticos quando se utilizou cloreto de sódio sejam responsáveis pela maior recuperação no flutuado nesta solução.

A partir daqueles resultados pode-se admitir que o uso de solução com densidade de aproximadamente $1,10\text{g/cm}^3$ permita separar com sucesso o PS dos outros três plásticos e que o uso de solução com densidade de aproximadamente $1,25\text{g/cm}^3$ permita separar o PET do PMMA e do PVC.

Como o PMMA e o PVC têm densidade semelhante, não é possível a separação da mistura destes dois plásticos pelo método gravítico, sendo testada a sua separação pelo processo de flutuação por espumas. Uma vez que os plásticos são naturalmente hidrófobos, para a separação daquela mistura pelo processo de flutuação por espumas, foram realizados testes de flutuação por espumas usando-se lignossulfonato de sódio como agente molhante. Numa primeira fase realizaram-se ensaios de flutuação sobre amostras de plástico monocomponente a diferentes concentrações de lignossulfonato de sódio (Figura 3). Na ausência de lignossulfonato de sódio a recuperação dos dois plásticos no flutuado foi de 100%, consequência da sua hidrofobicidade natural. Na presença de lignossulfonato de sódio o PVC apresenta menor flutuabilidade do que o PMMA. A recuperação no flutuado dos dois plásticos diminui com o aumento da concentração do lignossulfonato de sódio, sendo essa diminuição muito mais acentuada para o PVC. Deste modo pode considerar-se que o lignossulfonato de sódio apresenta um efeito molhante

seletivo no PVC. Assim, numa segunda fase realizaram-se ensaios de flutuação para separar a mistura bi-componente PMMA/PVC na presença de lignossulfonato de sódio. Nestes usou-se lignossulfonato de sódio com uma concentração de 300mg/dm^3 , pois esta permitiu uma separação mais seletiva.

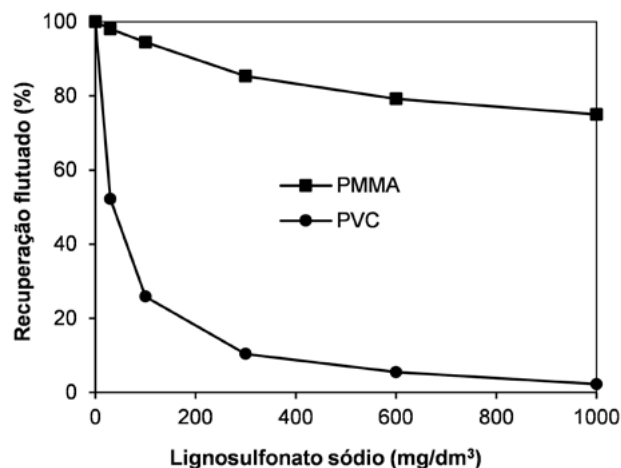


Figura 3. Flutuabilidade dos dois plásticos versus concentração de lignossulfonato de sódio.

Figure 3. Floatability of two plastics versus sodium lignosulfonate concentration.

Em face das propriedades dos quatro plásticos e do seu comportamento nos dois processos de separação, na Figura 4 representa-se a sequência de operações de separação a que a mistura dos quatro plásticos (PS+PMMA+PVC+PET) foi sujeita de modo a obter produtos enriquecidos em cada um dos quatro plásticos.

Inicialmente a mistura dos quatro plásticos foi sujeita a uma operação de separação em meio denso de solução de cloreto de sódio com densidade de $1,08\text{g/cm}^3$ (Figura 4). Nesta operação a separação do PS foi quase perfeita, todo o PS flutuou e todo o PMMA e PET afundou, mas 3,4% do PVC flutuou juntamente com o PS. Assim, foi possível obter um flutuado quase puro em PS, com um teor em PS de 96,7% e 3,3% de PVC. A posterior separação do afundado da separação em solução de cloreto de sódio (PMMA+PVC+PET) num meio denso de nitrato de amónio com densidade de $1,23\text{g/cm}^3$, permitiu uma separação perfeita dos plásticos de densidade intermédia (PMMA e PVC) do plástico de maior densidade (PET), pois todo o PMMA e PVC flutuou e todo o PET afundou. Assim, obteve-se um afundado puro de PET e um flutuado com um teor de 50,9% em PMMA e de 49,1% em PVC.

Estes resultados permitem verificar que o sucesso da separação em meio denso daquelas misturas de plásticos depende da diferença de densidade dos plásticos e da densidade do meio denso. Este método não exigiu grande diferença de densidade entre os plásticos da mistura. A densidade ideal do meio deve ser apenas ligeiramente superior à densidade do plástico menos denso. A separação melhora quando o plástico a flutuar tem maior hidrofobicidade do que o plástico a afundar.

A separação do flutuado resultante da separação em meio denso com nitrato de amónio (mistura PMMA/PVC) foi realizada por flutuação por espumas, usando-se lignossulfonato de sódio como agente molhante seletivo do PVC, com uma concentração de 300mg/dm^3 . Observou-se uma separação de razoável qualidade daqueles dois plásticos, com uma eficiência de separação de aproximadamente 75%. A recuperação de PMMA no flutuado foi de

85,3% e a recuperação no afundado do PVC foi de 89,1%, obtendo-se um flutuado com um de 89,0% em PMMA e um afundado com um teor em PVC de 85,4% (Figura 4).

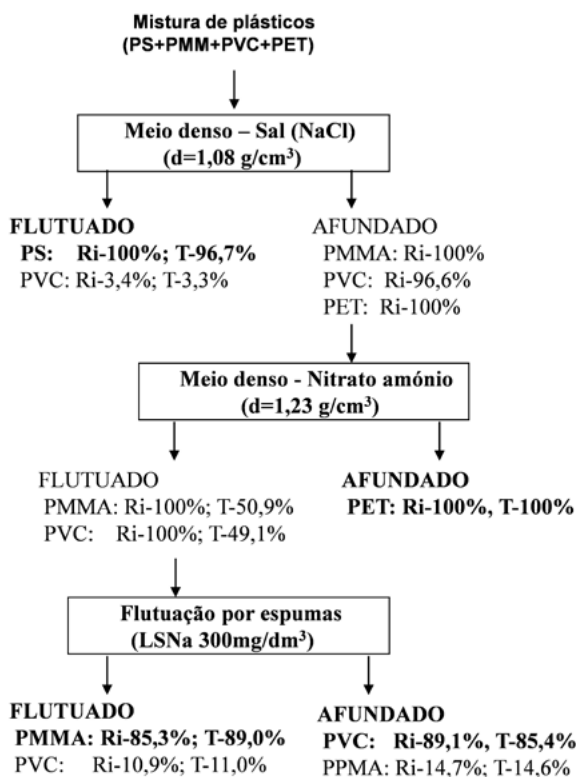


Figura 4. Fluxograma de separação da mistura dos quatro plásticos por meios densos e por flutuação por espumas.

Figure 4. Flowchart of separation of the mixture of four plastics by dense media and by froth flotation.

4. Conclusões

Os resultados obtidos mostram que a separação em meio denso e por flutuação por espumas, métodos de separação amplamente usados no tratamento de minérios, têm potencial para serem usados na separação de misturas de plásticos.

A combinação da separação por meio denso e por flutuação por espumas de uma mistura de quatro plásticos (PS+PMMA+PVC+PET) permitiu obter produtos quase puros daqueles plásticos.

O sucesso da separação em meio denso depende da diferença de densidade dos plásticos e da densidade do meio de separação. A aplicação da separação em meio denso não requer grande diferença de densidade entre os plásticos. A densidade ideal do meio deve ser apenas ligeiramente superior à densidade do plástico menos denso. O

uso de lignosulfonato de sódio como agente molhante seletivo do PVC permitiu separar com razoável qualidade a mistura PPMA/PVC por flutuação por espumas.

Embora alguns plásticos apresentem densidade similar e todos sejam naturalmente hidrófobos, os resultados obtidos mostram que a combinação da separação em meio denso e por flutuação por espumas, com uso de agente molhante seletivo, tem potencial para separar misturas de plásticos.

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

- Bauer, M., Lehner, M., Schwabl, D., Flachberger, H., Kranzinger, L., Pomberger, R., Hofer, W., 2018. Sink–float density separation of post-consumer plastics for feedstock recycling. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **20**: 1781-1791.
- Carvalho, M. T., Durão, F., Ferreira, C., 2010. Separation of packaging plastics by froth flotation in a continuous pilot plant. *Waste Management*, **30**: 2209-2215.
- Fu S, Fang Y, Yuan H, Tan W, Dong Y., 2017. Effect of the medium's density on the hydrocyclonic separation of waste plastics with different densities. *Waste Management*, **67**: 27–31.
- OECD, 2022. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options, OECD Publishing, Paris
- PlasticsEurope, 2022. Plastics - the facts 2022. An analysis of european plastics production, demand and waste data. Brussels, Belgium.
- Pita, F., Castilho, A., 2017. Separation of plastics by froth flotation. The role of size, shape and density of the particles. *Waste Management*, **60**: 91-99.
- Quelal, W. M., Martí B. V., Gisbert, A. F., 2022. Separation of virgin plastic polymers and post-consumer mixed plastic waste by sinking-flotation technique. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**: 1364-1374.
- Quinn, B., Murphy, F., Ewins, C., 2016. Validation of density separation for the rapid recovery of microplastics from sediment. *Analytical Methods*, **9**: 1491-1498.
- Shen, H., Pugh, R.J., Forssberg, E., 1999. A Review of plastics recycling and the flotation of plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, **25**: 85-109.
- Wang, C. Q., Wang, H., Fu, J. G., Liu, Y. N., 2015. Flotation separation of waste plastics for recycling - A review, *Waste Management*, **41**: 28-38.
- Wang, H., Zhang, Y., Wang, C., 2019. Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling - a review. *Separation and Purification Technology*, **226**: 75-94.
- Yuan, H., Fu, S., Tan, W., He, J., Wu, K., 2015. Study on the hydrocyclonic separation of waste plastics with different density. *Waste Management*, **45**: 108-111.