USO DO POLICLORETO DE ALUMÍNIO PARA REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICOS DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO

Letícia da Silva Cabral [1]
Engenheira Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista (ICT/Unesp – São José dos Campos/SP). Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental na área de concentração de Saneamento no Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista (ICT/Unesp – São José dos Campos/SP).
Adriano Gonçalves dos Reis[1]
Engenheiro Químico pela Faculdade de Engenharia Química de Lorena (EEL/USP). Mestre e Doutor em Ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Pós-doutorado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Livre Docente em Operações Unitárias Aplicadas ao Saneamento pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Professor Associado do Departamento de Engenharia Ambiental no Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista (ICT/UNESP – São José dos Campos/SP).

Endereço[1]**:** Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 – Eugênio de Melo – São José dos Campos – São Paulo – CEP: 12247-016 – Brasil - Tel.: +55 (12) 3947-9700 – e-mail: leticia.cabral@unesp.br

RESUMO

O resíduo plástico que é descartado inadequadamente pode sofrer degradação no meio ambiente fazendo com que micropartículas desse resíduo sejam transportadas por longas distâncias através de fenômenos hidrodinâmicos. Esses detritos são classificados como microplásticos (MP) e apresentam diâmetro variando entre 0,1 µm e 5,0 mm, sendo nanoplásticos quando menor que 0,1 µm. Os MP apresentam capacidade de adsorção de outros contaminantes em sua superfície, tornando-se um excelente transportador de substâncias tóxicas. Estudos indicam que o MP está presente no corpo humano, nos mais diversos compartimentos ambientais e na água tratada para abastecimento. Este trabalho analisa a remoção de microplástico de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com o uso do coagulante PAC e do floculante PAM em diferentes dosagens em ciclo completo (coagulação-floculação-sedimentação). A correlação da concentração do PEAD em suspensão e a turbidez foi de R^2 = 0,9636, portando a análise da turbidez foi usada para mensurar a eficiência de remoção do MP. Em dosagens de 50 mg/L do coagulante PAC e de 2,0 mg/L do floculante PAM, a turbidez residual média foi de 1,5 unT (vs = 2 cm/min), 0,3 unT (vs = 0,47 cm/min) e 0,2 unT (vs = 0,23 cm/min).

PALAVRAS-CHAVE: microplástico, polietileno, coagulação-floculação

INTRODUÇÃO

O plástico é um material multifuncional, usado na grande maioria dos produtos consumidos atualmente. Em 2021, foram produzidas 390 milhões de toneladas de plástico, 4% a mais do que em 2020 (Plastics, 2022). O plástico é um tipo de material sintético composto por moléculas orgânicas, também conhecido como polímero, macromolécula composta por inúmeros monômeros (Michaeli, 1995). O primeiro polímero sintético foi criado em 1909 e, desde então, com a descoberta de outros plásticos, a multiplicidade de seu uso viabilizou inúmeras soluções, produtos, economias e facilidades, gerando uma boa impressão da nova solução (Soares, 2020).

Após a segunda revolução industrial e com o aumento progressivo da industrialização, houve um aumento do crescimento populacional e do consumo desse tipo de material (Michaeli, 1995). O plástico passou a ser um material de fácil acesso, útil e recorrente em todos os âmbitos da rotina das pessoas. Essa nova realidade ocasionou também uma maior geração desse tipo de resíduo e sua presença no lixo doméstico se tornou cada vez maior (Michaeli, 1995).

Devido a ações mecânicas, foto-oxidação e biodegradação dos resíduos plásticos ao longo do tempo e seu transporte por longas distâncias em consequência da corrente marítima e de fenômenos hidrodinâmicos (Cole, 2011), micro e nano partículas deste material estão se tornando um poluente emergente. Os chamados microplásticos foram definidos pela primeira vez por Thompson *et al*. Em 2004 como micropartículas de

plástico menores que 20,0 µm. Estudos atuais apresentam diâmetro variando entre 0,1 µm e 5,0 mm para microplásticos e menor que 0,1 µm para nanoplásticos (Shen, 2020).

O microplásticos podem ser classificados como primários ou secundários, a variar de acordo com a sua fonte de emissão, que têm se mostrado cada vez mais diversa. Os microplásticos primários são aqueles fabricados em tamanho microscópico para um determinado fim, enquanto os microplásticos secundários são aqueles gerados a partir da degradação de outro produto deste material (Cole, 2011).

Dentre as fontes geradoras desse poluente, temos: as partículas liberadas através da lavagem doméstica de roupas e tecidos feitos à partir de fibras sintéticas (Pirc, 2016); o uso de produtos de higiene pessoal e cosméticos, como esfoliantes que contém microesferas de plástico em sua composição (Fendall, 2009); a decomposição de resíduos plásticos descartados (Tong, 2022); a deposição atmosférica nos ambientes aquáticos de águas pluviais contaminadas; e a água e outra bebidas engarrafadas em garrafas plásticas (Oßmann *et al*, 2018).

Esse poluente emergente pode ser encontrado em todos os ecossistemas aquáticos, tanto lóticos, como exemplo mares, rios e córregos e lênticos como lagos (Cole, 2011) e, por consequência, nos organismos da biota marinha, como no sistema digestivo dos peixes e, inclusive, em órgãos e na placenta de animais mamíferos marinhos (Skaf, 2020). Devido à bioacumulação ao longo da cadeia trófica, o ser humano consome o microplástico diariamente através da ingestão de animais marinhos via cadeia alimentar (Ma, 2019a), além do consumo de água potável contaminada (Shen, 2020). Os MPs já foram encontrados em diversos órgãos do corpo humano, como pulmão, cérebro, útero, placenta, coração (Yang, 2023) e, inclusive em fluidos corporais, como no sangue e no leite materno (Ragusa *et al*, 2022).

Um estudo avaliou a presença de microplásticos no leite materno com o uso da espectroscopia Raman. Das 34 mães amostradas, 26 delas tiveram presença de MP detectada em seu leite (Ragusa *et al*, 2022), indicando que os seres humanos estão ingerindo este poluente desde os seus primeiros dias de vida. A composição do microplástico encontrado era majoritariamente de polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC) e polipropileno (PP), com tamanhos variando de 2,0 a 12,0 µm (Ragusa *et al*, 2022). As mulheres foram analisadas quanto aos seus hábitos de consumo e higiene, mas não foi possível encontrar nenhuma relação significativa, sugerindo que a exposição humana a este tipo de partícula é inevitável devido à sua presença onipresente no meio em que vivemos.

No meio ambiente, um estudo recente de Wang et al (2023) detectou microplásticos hidrofílicos transportados pelo ar em grandes altitudes e seu papel na formação de nuvens. As amostras foram obtidas nos cumes das montanhas do Japão a 1300 a 3776 metros de altitude por meio de imagens de reflexão total atenuadas e espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier. Nove tipos de MP foram detectados, incluindo polietileno, polipropileno, tereftalato de polietileno, polimetilmetacrilato, poliamida 6, policarbonato, copolímero de etileno-propileno ou liga de polietileno-polipropileno, poliuretano e resina epóxi. Os microplásticos estavam fragmentados, e com diâmetros variando de 7,1 a 94,6 µm. Microplásticos contendo grupos hidrofílicos, como grupos carbonila e/ou hidroxila, eram abundantes, sugerindo que eles poderiam ter atuado como núcleos de condensação de nuvens de gelo e água. Com isso, os autores sugerem que as nuvens de microplásticos de alta altitude influenciam a formação de nuvens e, por sua vez, podem modificar o clima (Wang *et al*, 2023).

Quando presentes na água, os microplásticos podem causar sérios problemas em consequência de suas características. Essas micropartículas de plástico possuem uma grande superfície específica e alta hidrofobicidade. Assim, tornam-se excelentes transportadores de substâncias orgânicas toxicas, como os Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs), assim como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e metais pesados como Zn, Cu, Pb, Ag (Ma, 2019a), Fe, Al, e TiO2 (Ma, 2019a) que são adsorvidos pela superfície dos microplasticos, bem como antibióticos, pireno, tilosina, sulfametoxazol, almíscares sintéticos e metais como Cd e Co (Zhou, 2021).

Além disso, os microplásticos, principalmente os de densidade próxima à da água, flutuam sobre a superfície, prejudicando a passagem de luz e, consequentemente, a sobrevivência de organismos aquáticos dependentes da luz solar (Ma, 2019a). Por serem partículas muito pequenas, podem ser confundidas com alimento pela biota marinha. Esse consumo de microplásticos causa perda da eficiência alimentar, bem como intoxicação pelas substâncias adsorvidas na superfície das partículas, podendo, inclusive, alterar a expressão gênica de peixes (Ma, 2019a). Além de afetar o sistema gástrico, esse contaminante pode afetar os sistemas linfático e circulatório dos mamíferos podem ser transportados aos fetos através da placenta, causando respostas imunológicas nos recém- nascidos (Skaf, 2020).

Visto a problemática apresentada, é essencial remover o MP da água a ser consumida pelo ser humano. Os processos tradicionais de tratamento de água incluem coagulação, floculação, sedimentação e filtração granular rápida (Bittencourt, 2014). O tratamento de água convencional não utiliza de uma etapa focada na remoção destas micro e nanopartículas. Através de uma revisão sistemática de diversos estudos publicados até o momento, Shen *et al*. (2020) demonstra que ainda há inconclusões à respeito do tema, pois os resultados publicados variam em eficiência de remoção numa escala muito abrangente.

Diversos estudos estão sendo realizados em laboratório a fim de compreender a eficiência de remoção deste poluente testando-se diversos coagulantes em ciclo completo para tal análise. Um estudo recente de Pivokonsky *et al*. (2018), comparou a remoção de microplásticos através de amostras de três plantas de tratamento de água, que utilizavam diferentes etapas de tratamento, sendo coagulação/floculação e filtração granular rápida (areia), coagulação/floculação e filtração granular rápida (areia) seguida de filtração granular rápida (carvão), e coagulação/floculação e granular rápida (areia) seguida de adsorção por carvão ativado. A concentração de microplástico diminuiu em 70%, 81% e 83% para cada método utilizado respectivamente. Apesar de terem sido identificados 12 tipos diferentes de plástico na composição, a maioria dos MPs (>70%) era composta por PET (tereftalato de polietileno), PP (polipropileno) e PE (polietileno).

Outros estudos recentes avaliaram a eficiência de diferentes coagulantes na remoção de microplástico da água via tratamento completo. No estudo de Zhou *et al*. (2021), a eficiência e o mecanismo de remoção do poliestireno (PS) e polietileno (PE) com o uso dos coagulantes PAC e FeCl3 foram comparados. Utilizando o método de tratamento de água de abastecimento via ciclo completo, o estudo variou as dosagens dos coagulantes entre 30 mg/L à 180 mg/L. Os resultados mostraram que o PAC foi melhor que o FeCl3 na eficiência de remoção de ambos os tipos de MP em uma dosagem de 90 mg/L, atingindo remoção com eficiência de 29,70% de PE e 77,83% de PS.

Outro estudo recente de Skaf *et al*. (2020) avaliou a eficiência de remoção de MP derivados de polietileno e poliéster através da diminuição da turbidez. Os experimentos também foram realizados via ciclo completo de tratamento de água e o coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio. A coagulação utilizando o coagulante em concentrações entre 5 e 10 mg/L reduziu a turbidez da água a valores menores que 1,0 UNT a partir de soluções contendo 5 mg/L de MP com turbidez inicial de 16 UNT. Os autores indicam que a presença de 20 mg/L de surfactante em solução tenha deslocado o potencial zeta das micropartículas, mas que isso não prejudicou a coagulação do MP em doses baixas do coagulante. Para doses mais altas, todas as soluções mostraram uma tendência de aumento gradual da turbidez. Evidências de fotos de flocos e medições de potencial zeta apontam para a floculação de varredura como o mecanismo dominante para remoção do MP para as condições do estudo.

Em Li *et al*. (2022), a remoção do Polietileno (PE) foi testada utilizando-se 40 mg/L do coagulante hidróxido de magnésio e adicionando-se 5 mg/L do floculante poliacrilamida aniônica (PAM). A eficiência de remoção atingiu 85%. Além disso, a taxa de sedimentação dos flocos com o tamanho médio de 57,19 µm atingiu 4,8 × 10-3 m/s. Através da análise do potencial zeta e das propriedades dos flocos, o estudo sugere que os principais mecanismos de coagulação foram os de ponte de adsorção e varredura.

Considerando, portanto, a necessidade e importância de estudos que avaliem e demonstrem a eficiência da remoção de micro partículas plásticas da água, o presente estudo tem como objetivo analisar a eficiência da remoção de partículas de microplástico de Polietileno de Alta Densidade adicionado em amostras de água após as etapas de coagulação, floculação e sedimentação com o uso do coagulante cloreto de polialumínio (PAC).

OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é analisar a eficiência de remoção de microplástico de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com o uso do coagulante policloreto de alumínio (PAC) e do floculante poliacrilamida aniônica (PAM) em diferentes dosagens em ciclo completo (coagulação-floculação-sedimentação) em ensaios de *Jar test.*

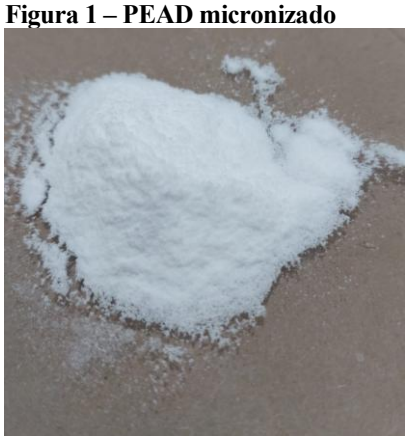
METODOLOGIA UTILIZADA

POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

O microplástico utilizado foi o Polietileno de Alta Densidade (PEAD). É um polímero micronizado com granulometria padronizada em 95% passante em peneira 80 mesh, o que corresponde a 95% da amostra ter

granulomentria de menor do que 177,0 µm. O material possui aparência de pó branco e fino (Figura 1) e especificações de acordo com a Tabela 1. O material foi fornecido pela empresa Resinpó Indústria e Comércio Ltda.

Figura 1 – PEAD micronizado



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 1 - Propriedades do Material PEAD RP 1820/180 fornecido pela Resinpó

Ensaios	Unidade	Método	Valores Típicos
Índice de Fluidez (190ºC / 2,16kg)	g/10 min	ASTM D 1238	35,0
Densidade	g/cm^3	ASTM D 792	0,958
Resistência à Tração na Ruptura	MPa	ASTM D 638*	28
Módulo de Flexão Secante 1%	MPa	ASTM D 638*	1200
Dureza Shore D	-	ASTM D 2240	65
Resistência ao Impacto IZOD	J/m	ASTM D 256	25
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa	ºC	ASTM D 648	69
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N	ºC	ASTM D 1525	127

velocidade de teste: 50 mm/min

Fonte: Ficha Técnica Resinpó Indústria e Comércio Ltda.

ÁGUA DE ESTUDO

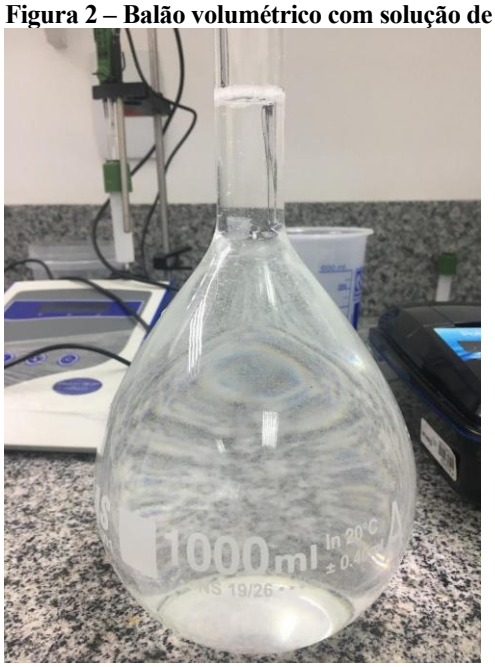
A água utilizada no estudo foi coletada nas torneiras do Laboratório de Saneamento e Hidráulica do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista no campus de São José dos Campos (ICT-UNESP/SJC), localizado no Parque Tecnológico da cidade. A água foi coletada antes da realização de cada ensaio durante os experimentos.

CURVA DE CALIBRAÇÃO: TURBIDEZ X CONCENTRAÇÃO DE PEAD

A curva de calibração foi elaborada de acordo com os parâmetros turbidez (UNT) e a concentração do microplástico de PEAD (mg/L). O PEAD em pó foi adicionado na água de estudo. Com o uso de uma balança analítica e um béquer, mensurou-se 200 miligramas do material. Adicionou-se 01 gota (20,4 mg) do surfactante Extran aniônico para aumentar a molhabilidade das micropartículas e 10 mililitros de água da torneira. Agitou-se até que mistura atingisse homogeneidade.

A mistura foi diluída em um balão volumétrico até completar 01 Litro de solução (Figura 2). Com concentração inicial de 200 mg/L, a solução foi diluída em concentrações de 100, 50, 25, 12,5, 6,25 e 0,00 mg/L.

Figura 2 – Balão volumétrico com solução de água e microplástico



Fonte: elaborado pela autora.

A turbidez das amostras com concentrações 200, 100, 50, 25, 12,5, 6,25 e 0,00 mg/L foram mensuradas através do turbidímetro AP2000 da PoliControl. As concentrações foram realizadas em duplicata e a medição da turbidez foi realizada em triplicata.

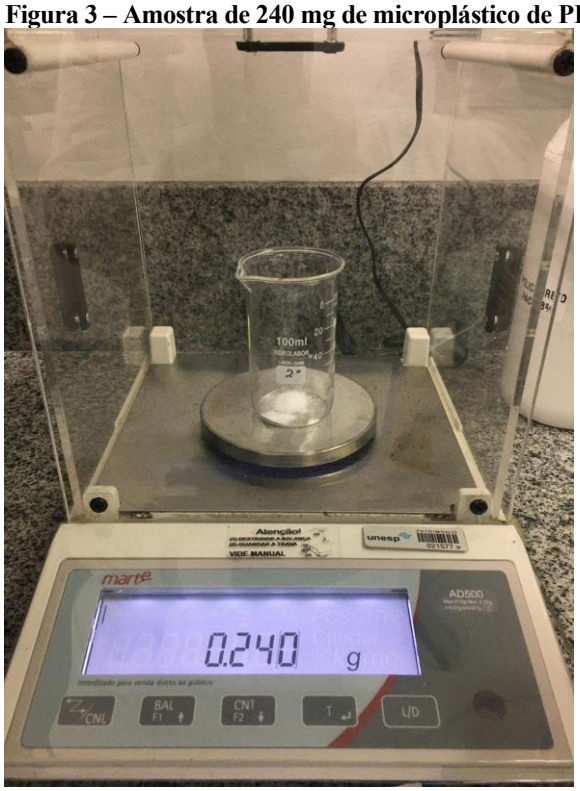
A partir dos dados obtidos, calculou-se a média e o desvio padrão dos resultados e construiu-se a curva de calibração da turbidez das amostras x concentração de PEAD em pó.

ENSAIO EM *JAR TEST*

A remoção do MP foi avaliada através de ensaios em *Jar Test*. O ensaio consiste nas etapas de coagulação, floculação e sedimentação, que são comumente aplicadas nas Estações de Tratamento de Água (ETAs). Os testes foram realizados em um *Jar Test* da marca PoliControl modelo FlocControl III de 6 jarros. A turbidez da água de estudo foi ajustada com o PEAD em pó.

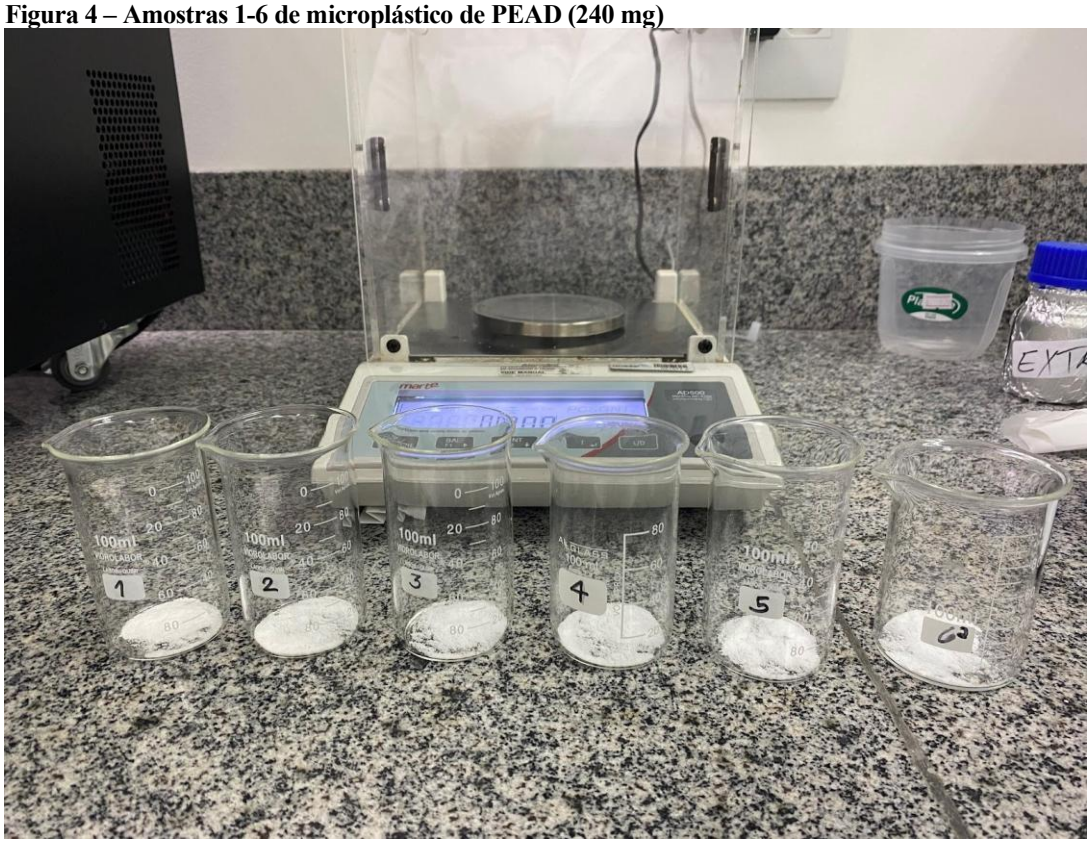
Na etapa de preparação, anterior ao início do experimento, com o auxílio de uma balança analítica (Figura 3) foram pesados em um béquer 6 amostras com 240 mg/L de PEAD (Figura 4) para posteriormente serem adicionados em cada jarro (120 mg/L). A turbidez média da água sintética foi de 24,9 UNT e a massa de PEAD foi determinada a partir do ensaio da curva de calibração. Em cada uma das amostras, adicionou-se uma gota do surfactante Extran aniônico e molhou-se as partículas com o auxílio de um bastão de vidro (Figura 5).

Figura 3 – Amostra de 240 mg de microplástico de PEAD



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 4 – Amostras 1-6 de microplástico de PEAD (240 mg)



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 5 – PEAD com surfactante: seco (à esqueda), com água sem agitação (centro), com água após agitação (à direita)



Fonte: elaborado pela autora.

Na etapa do teste em *Jar Test* (Figura 6), o jarro 1 foi usado como controle do experimento, portanto não houve adição do coagulante. Nos jarros 2 a 6, houve adição do MP, do coagulante e da base NaOH para ajuste do pH.

Figura 6 – *Jar Test* preparado para início do experimento



Fonte: elaborado pela autora.

A coagulação foi realizada com o coagulante PAC variando as dosagens de 0 a 50 mg/L. A mistura rápida foi realizada num gradiente de velocidade médio de 1000 s^{-1} por 25 segundos. O pH foi ajustado para um valor de 7,0, utilizando NaOH 0,1M, devido ao melhor desempenho do coagulante nessa faixa de pH.

O floculante utilizado foi a poliacrilamida aniônico (PAM) nas dosagens de 0 a 3 mg/L. A poliacrilamida tem aparência sólido granulado branco e densidade aparente aproximada de 0,60 g/cm3. Com o auxílio de uma balança analítica, preparou-se uma solução a 0,04% (0,04 g de PAM + 99,96 g de água desmineralizada) (Figura7). A solução foi agitada no agitador magnético por cerca de 20 minutos até atingir uma consistência viscosa (Figura 8). A floculação foi realizada num gradiente de velocidade médio de 60, 40 e 20 s-1 por 7 minutos em cada velocidade (21 minutos ao total).

Figura 7 – Preparação da solução de PAM 0,04%



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 8 – Solução de PAM no agitador magnético



Fonte: elaborado pela autora.

As velocidades de sedimentação avaliadas foram de 2 cm/min (3,5 minutos), 0,47 cm/min (15 minutos) e 0,23 cm/min (30 minutos). Após o término de cada velocidade de sedimentação, retirou-se uma amostra de cada jarro

para análise da eficiência de remoção de microplástico. A turbidez foi mensurada através do turbidímetro AP2000 da PoliControl em triplicata.

Os parâmetros de caracterização da água descritos na Tabela 2 foram avaliados de acordo com as metodologias recomendadas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). Os equipamentos utilizados para a avaliação de cada parâmetro estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Metodologia e equipamento utilizado para cada parâmetro avaliado

Parâmetro	Metodologia ALPHA/ Equipamento
Valor de pH e temperatura	4500=H+ / pHmetro Tecnofon mPA 210
Turbidez	2130B / nefelômetro Policontrol AP2000

Fonte: elaborado pela autora.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

CURVA DE CALIBRAÇÃO CONCENTRAÇÃO PEAD X TURBIDEZ

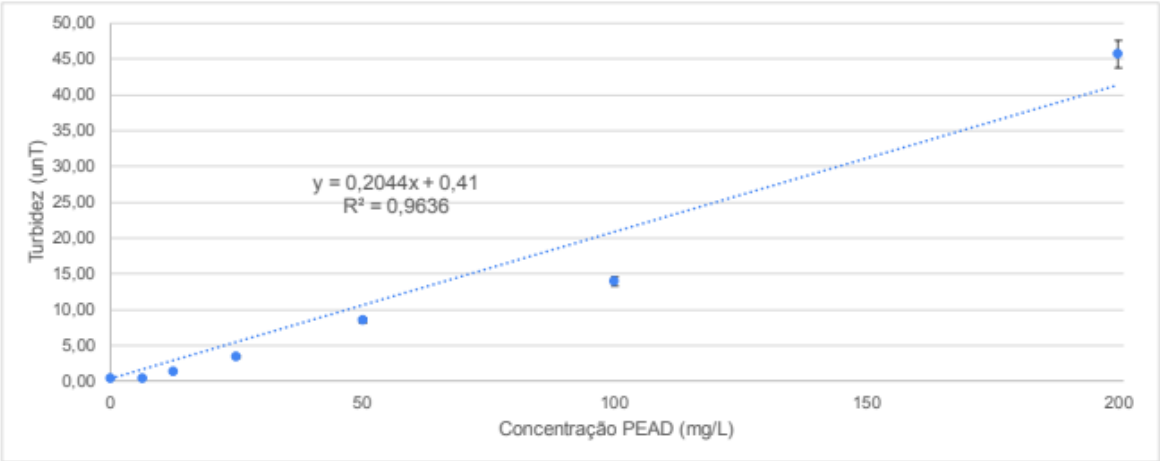
A Figura 9 apresenta a curva de calibração da turbidez (unT) em função da concentração de PEAD em mg/L. De acordo com a Figura 9, a turbidez apresentou uma boa correlação (R2 = 0,9636) com a concentração de PEAD. Com isso, foi determinado a equação da reta através da Equação 1, que correlacionado os dois parâmetros

$$T = 0{,}2044\,(C) + 0{,}41 \qquad \text{equação (1)}$$

onde, T corresponde a turbidez em unT e C à concentração de PVC em mg/L.

A partir do ensaio, decidiu-se trabalhar com a concentração de 120 mg/L de PEAD nos ensaios de *Jar Test*, que corresponde a uma turbidez média de 24,9 unT, utilizando a Equação 1.

Figura 9 - Curva de calibração da turbidez (unT) em função da concentração de PEAD em mg/L



Fonte: elaborado pela autora.

REMOÇÃO DE TURBIDEZ EM FUNÇÃO DAS DOSAGENS DE COAGULANTES PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

Durante os ensaios de *Jar Test* para remoção do PEAD foram encontradas algumas dificuldades devido a flotação do microplástico, visto que o mesmo possui densidade 0,958 g/cm3 (Tabela 1), ou seja, inferior à da água na temperatura de estudo (22°C), que é de 0,9978 g/cm3.

.

Sendo assim, ao final do tempo de sedimentação, os microplásticos flotavam ao invés de sedimentarem. Na Figura 10 é possível perceber a flotação do PEAD após adição 0, 10, 20, 30, 40 e 50 mg/L de PAC, respectivamente nos jarros de 1 a 6 do *Jar Test.*

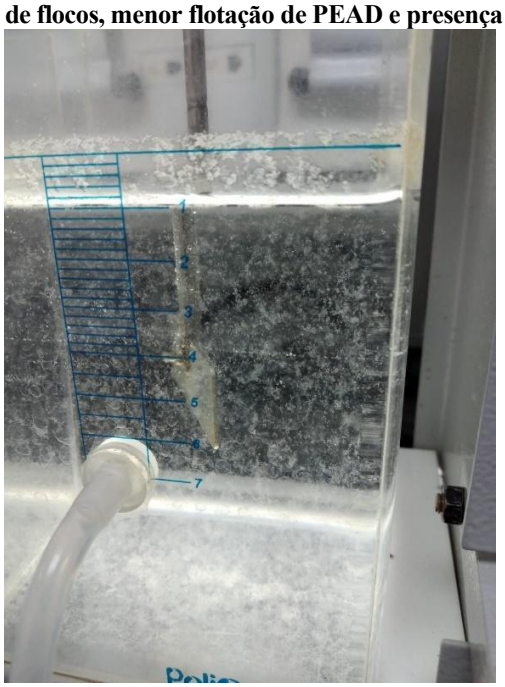
Figura 10 – Ensaio com 120 mg/L de PEAD com adição de PAC nas dosagens de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 mg/L, respectivamente nos jarros de 1 a 6 do *Jar Test* – Flotação do PEAD



Fonte: elaborado pela autora.

Portanto, amostrar pelos pontos convencionais de amostragem não seria representativo, pois o PEAD poderia ter flotado ao invés de sedimentado, e o mesmo não teria sido removido da água. A literatura (Ma *et al*. 2019a; Ma *et al*. 2019b) reporta nestes casos para que seja coletado a amostra da superfície através do uso de uma seringa para contabilizar o quanto de PEAD flotou. Mas, não foi possível fazer esta coleta do PEAD flotado na superfície, porque o MP repelia a qualquer objeto colocado em contato com a água. Como trabalho futuro recomenda-se desenvolver uma técnica para esta coleta.

Figura 11 – Ensaio com 120 mg/L de PEAD com adição de PAC na dosagem de 50 mg/L (jarro 6) – formação de flocos, menor flotação de PEAD e presença de material sedimentado.

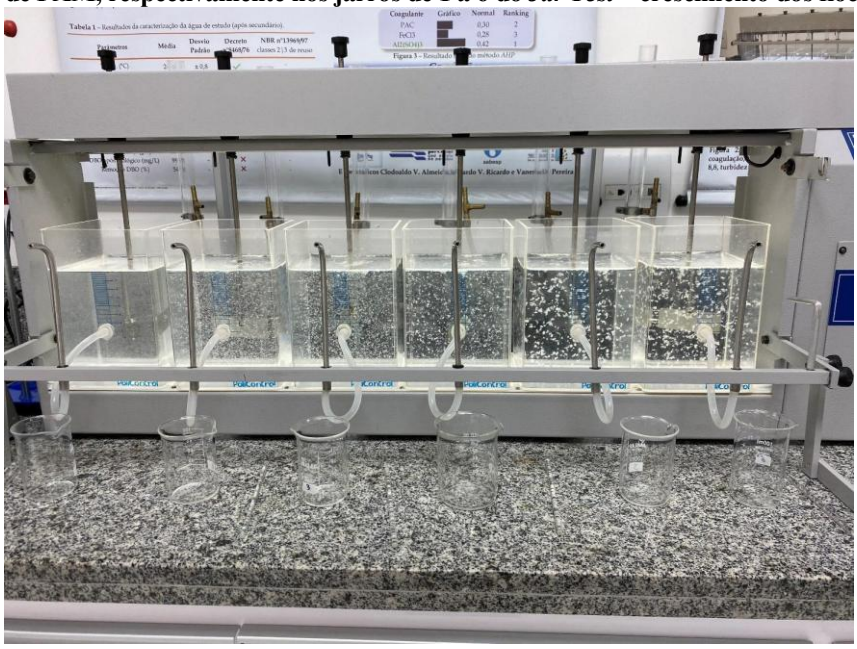


Fonte: elaborado pela autora.

Em razão da redução da turbidez nessa concentração do coagulante, para a próxima etapa do estudo foi utilizada a dosagem de 50 mg/L de PAC e diferentes dosagens de PAM. O floculante auxilia na formação de flocos maiores, otimizando a varredura, permitindo que o PEAD fosse varrido da suspensão antes de flotar. Para isso, o PAM foi adicionado aos 10 segundos finais da coagulação, para que a floculação já começasse com o PEAD preso ao floco proveniente do PAC e ao polímero floculante PAM.

A adição de PAM visualmente deu um efeito positivo na formação de grandes flocos e conseguiu varrer o PEAD durante a etapa de floculação, conforme apresentado na Figura 12. É possível perceber o crescimento dos flocos após adição de 50 mg/L de PAC e 0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 e 2,0 mg/L de PAM, respectivamente nos jarros de 1 a 6 do *Jar Test*.

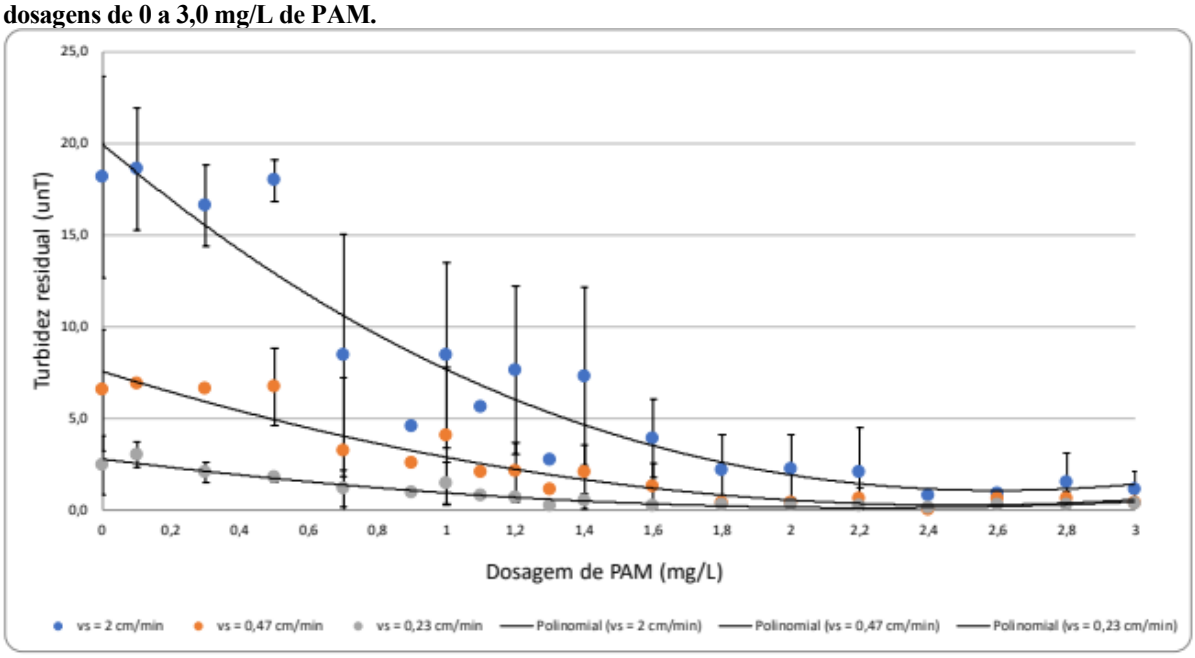
Figura 12 – Ensaio com 120 mg/L de PEAD com adição de 50 mg/L de PAC e 0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 e 2,0 mg/L de PAM, respectivamente nos jarros de 1 a 6 do *Jar Test* – crescimento dos flocos



Fonte: elaborado pela autora.

Na Figura 13 é apresentado o resultado de turbidez residual para uma adição de 50 mg/l de PAC e diferentes dosagens de PAM, com 120 mg/L de PEAD em cada jarro.

Figura 13 – Turbidez residual numa suspensão com 120 mg/L de PEAD com adição de 50 mg/L de PAC e dosagens de 0 a 3,0 mg/L de PAM.



Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se na Figura 13 que o aumento da dosagem de PAM resultou numa redução da turbidez residual até que em valores próximos a 2,0 mg/L de PAM atingisse um platô de remoção, com turbidez residual média de 1,5 unT (vs = 2 cm/min), 0,3 unT (vs = 0,47 cm/min) e 0,2 unT (vs = 0,23 cm/min). É possível observar no gráfico uma variação maior entre a eficiência de remoção do PEAD para cada uma das velocidades de sedimentação analisadas para dosagens mais baixas do floculante. Em comparação com o estudo de Skaf *et al*. (2020), a remoção de PE e PES em função da turbidez para amostras com 5,0 mg/L de MP foi de 16,0 para menor que 1,0 UNT.

Com base nesse resultado, sugere-se um set up para a remoção do MP nessas condições com 50 mg/L do coagulante primário PAC, 2,0 mg/L do floculante PAM em uma água corrigida para o pH na faixa de 7,0.

Pela Figura 14 observa-se que o PEAD não mais flotava, ficando aderido ao floco. Porém, devido características do PAM, parte dos flocos formados ficavam presos ao agitador ou à parede do jarro. Portanto, estudos posteriores são recomendados para que aumentem a velocidade de sedimentação, como no caso da floculação lastreada.

Figura 14 – Ensaio com 120 mg/L de PEAD com adição de 50 mg/L de PAC e 1,8 e 2,0 mg/L de PAM, respectivamente nos jarros de 5 e 6 do *Jar Test* – flocos aderidos ao agitador e à parede do jarro



Fonte: elaborado pela autora.

CONCLUSÕES

A curva de calibração entre concentração de PEAD (mg/L) e turbidez (unT) na suspensão apresentou um coeficiente de correlação linear de $R^2 = 0,9636$, demonstrando-se efetiva para análise da eficiência de remoção do microplástico da água através da redução da turbidez. Portanto, estudos futuros visando esse tipo de análise, considerando microplástico de PEAD de até 177,0 µm nas mesmas condições físico-químicas da água de estudo, podem utilizar-se da análise da turbidez como técnica de monitoramento, sendo um método simples, rápido e eficaz.

Para uma concentração de 120,0 mg/L de PEAD em suspensão na água, a dosagem de 50,0 mg/L do coagulante PAC demonstrou-se eficiente para remoção dessas partículas via tratamento em ciclo completo, incluindo as etapas de coagulação, floculação e sedimentação. A adição do floculante PAM nas dosagens de 1,0 a 3,0 mg/L também se demonstraram eficientes, melhorando visualmente o aumento do tamanho dos flocos em comparação aos testes realizados sem a adição desse polímero. Em dosagens de 2,0 mg/L de PAM foi possível notar um platô com turbidez residual média de 1,5 unT (vs = 2 cm/min), 0,3 unT (vs = 0,47 cm/min) e 0,2 unT (vs = 0,23 cm/min). Pela baixa densidade das partículas, nota-se que em velocidade de sedimentação usual de vs = 2 cm/min (3,5 min de sedimentação), os flocos formados não foram capazes de sedimentar a favor de uma turbidez menor que 1,5 unT.

Em estudos posteriores propõem-se encontrar métodos eficazes para a contabilização do microplástico flotado durante as operações. Além disso, é de interesse testar novos métodos para análise da eficiência de remoção desse tipo de partícula, como o uso do método de floculação lastreada, em que os flocos são formados pela combinação de coagulante, polímero e microplásticos aderidos ao redor dos grãos de areia, aumentando o peso dos flocos e, consequentemente, a velocidade de sedimentação. Ademais, recomenda-se estudos complementares e comparativos avaliando a eficiência de remoção de outros coagulantes sintéticos comumente usados, como o sulfato de alumínio, cloreto férrico e o hidróxido de magnésio, além dos coagulantes naturais, como a semente de *Moringa oleifera.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. 2017.

2. BITTENCOURT, C., DE PAULA, M. A. S. *Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos*. 1a ed. São Paulo: Érica, 2014. ISBN: 978-85-365–0916-7.

3. COLE, M., LINDEQUE, P., HALSBAND, C., GALLOWAY, T. S. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*. Volume 62, Issue 12, 2011. Pages 2588-2597. ISSN 0025-326X. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.

4. COUTINHO, F. M. B., Mello, I. L., Santa Maria, L. C. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 13, no 1, p. 1-13, 2003.

5. FENDALL, L. S., SEWELL, M. A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin*. Volume 58, Issue 8. 2009. Pages 1225-1228. ISSN 0025-326X. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.025.

6. LI, B., ZHAO, J., GE, W., LI, W., YUAN, H. Coagulation-flocculation performance and floc properties for microplastics removal by magnesium hydroxide and PAM. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 10, Issue 2. 2022. 107263. ISSN 2213-3437. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107263.

7. MA, B., XUE, W., DING, Y., HU, C., LIU, H., QU, J. Removal characteristics of microplastics by Fe-based coagulants during drinking water treatment. *Journal of Environmental Sciences*. Volume 78. 2019a. Pages 267-275. ISSN 1001-0742. https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.10.006.

8. MA, B., XUE, W., HU, C., LIU, H., QU, J., LI, L. Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. *Chemical Engineering Journal*. Volume 359. 2019b. Pages 159-167. ISSN 1385-8947. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.155.

9. MICHAELI, W. *Tecnologia dos plásticos*. Editora Blucher, 1995. E-book. ISBN 9788521217305. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521217305/. Acesso em: 10 out. 2023.

10. NEUPLAST, 2020. CONHEÇA O POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E SUAS PROPRIEDADES. Disponível em: https://www.neuplast.com.br/blog/conheca-o-polietileno-de-alta-densidade-e-suas-propriedades/. Acesso em 15 nov. 2023.

11. OßMANN, B., SARAU, G., HOLTMANNSPÖTTER, H., PISCHETSRIEDER, M., CHRISTIANSEN, S., WILHELM, D. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research*. 2018. 141. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027.

12. PLASTICS, 2021. Plastics-The Facts 2022. Disponível em: https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/.

13. PIRC, U., VIDMAR, M., MOZER, A., Krzan, A. Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic washing. Environ Sci Pollut Res 23, 22206–22211 (2016). https://doi.org/10.1007/s11356-016-7703-0.

14. PIVOKONSKY, M., CERMAKOVA, L., NOVOTNA, K., PEER, P., CAJTHAML, T., JANDA, V. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of The Total Environment*. Volume 643. 2018. Pages 1644-1651. ISSN 0048-9697. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102

15. QUEIROZ, L. Microplásticos: uma abordagem introdutória. *Microplásticos nos ecossistemas: impactos e Soluções*, p. 11, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363456801_Microplasticos_uma_abordagem_introdutoria

16. RAGUSA, A., NOTARSTEFANO, V., SVELATO, A., BELLONI, A., GIOACCHINI, G., BLONDEEL, C., ZUCCHELLI, E., DE LUCA, C., D'AVINO, S. GULOTTA, A., et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 2022, 14, 2700. https://doi.org/10.3390/polym14132700.

17. SHEN, M., SONG, B., ZHU, Y., ZENG, G., ZHANG, Y., YANG, Y., WEN, X., CHEN, M., YI, H. Removal of microplastics via drinking water treatment: Current knowledge and future directions. *Chemosphere*. Volume 251. 2020. 126612. ISSN 0045 6535. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126612.

18. SKAF, D. W., PUNZI, V. L., ROLLE, J. T., KLEINBERG, K. A. Removal of micron-sized microplastic particles from simulated drinking water via alum coagulation. *Chemical Engineering Journal*. Volume 386. 2020. 123807. ISSN 1385-8947. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123807.

19. SOARES, E. A. F. A história do plástico. UP – Universo Plástico, São Bernardo do Campo, 17 maio 2020. Polímeros. Disponível em: https://uniplastico.wordpress.com/2020/05/17/a-historia-do-plastico/. Acesso em: 01 out. 2023.

20. TONG, H., ZHONG, X., DUAN, Z., YI, X., CHENG, F., XU, W., YANG, X. Micro- and nanoplastics released from biodegradable and conventional plastics during degradation: Formation, aging factors, and toxicity. *Science of The Total Environment*. Volume 833. 2022. 155275. ISSN 0048-9697. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155275.

21. THOMPSON, R., OLSEN, Y. MITCHELL, R. DAVIS, A. ROWLAND, S. JOHN, A. MCGONIGLE, D. F., RUSSELL, A. 2004. Lost at Sea: Where Is All the Plastic?. *Science* (New York, N.Y.). 304. 838. https://doi.org/10.1126/science.1094559.

22. WANG, Y., OKOCHI, H., TANI, Y., HAYAMI, H., MINAMI, Y., KATSUMI, N., TAKEUCHI, M., SORIMACHI, A., FUJII, Y., KAJINO, M., ADACHI, K., ISHIHARA, Y., IWAMOTO, Y., NIIDA, Y. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environmental Chemistry Letters*. 2023. 21:3055–3062. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x.

23. YANG, Y., XIE, E., DU, Z., PENG, Z., HAN, Z., LI, L., ZHAO, R., QIN, Y., XUE, M., LI, F., HUA, K., YANG, X.. Detection of Various Microplastics in Patients Undergoing Cardiac Surgery. *Environmental Science & Technology*. 2023. 57 (30), 10911-10918. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07179.

24. ZHOU, G., WANG, Q., LI, J., LI, Q., XU, H., YE, Q., WANG, Y., SHU, S., ZHANG, J. Removal of polystyrene and polyethylene microplastics using PAC and FeCl3 coagulation: Performance and mechanism. *Science of The Total Environment*. Volume 752. 2021. 141837. ISSN 0048-9697. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141837.