



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

LETICIA DA SILVA CABRAL

**USO DO CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC) PARA REMOÇÃO DE
MICROPLÁSTICOS DA ÁGUA TRATADA**

São José dos Campos

2023

LETICIA DA SILVA CABRAL

**USO DO CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC) PARA REMOÇÃO DE
MICROPLÁSTICOS DA ÁGUA TRATADA**

Trabalho de graduação apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Unesp.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Gonçalves dos Reis

São José dos Campos

2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adriano Gonçalves dos Reis

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Ciência e Tecnologia

Departamento de Engenharia Ambiental

Ma. Priscila Vega Andrade

Trivia Consultoria

Eng. Luiz Gustavo Rodrigues Godoy

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Ciência e Tecnologia

Departamento de Engenharia Ambiental

São José dos Campos, 26 de outubro de 2023.

DEDICATÓRIA

Dedido este trabalho à minha família, que proporcionou inesgotável apoio durante minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais Maurício e Rosania e à minha irmã Beatriz, que por muitas vezes acreditaram em mim mais do que eu mesma.

Em especial, ao meu avô Maurício e à minha avó Dalva, que se dedicaram incansavelmente em todas as fases do meu crescimento para que eu pudesse chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à colaboradora Lia R. de Oliveira da empresa Resinpó, pela doação do material de microplástico de PEAD micronizado.

Aos técnicos Vanessa Rodrigues Pereira e Douglas Magrini Garrão do laboratório de Saneamento e Hidráulica do ICT-UNESP/SJC, por todo o auxílio durante a preparação e execução dos experimentos.

Ao meu orientador, pela exímia orientação ao longo do desenvolvimento da pesquisa, permitindo meu desenvolvimento acadêmico e desempenho profissional.

À instituição de ensino Universidade Estadual Paulista - “Júlio de Mesquita Filho”, pela disponibilidade de espaço e material para realização do trabalho.

*“Somos o que repetidamente fazemos. A excelência, portanto, não é um feito,
mas um hábito”*

Aristóteles

RESUMO

CABRAL, Leticia da Silva. **Uso do cloreto de Polialumínio (PAC) para remoção de microplásticos da água tratada**. 2023. Trabalho de graduação (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2023.

O plástico é um material bastante versátil e de uso em diversas finalidades. É um material sintético, também conhecido como polímero. Em 2021, a produção de plástico aumentou em 4% se comparado ao ano anterior, chegando a 390 milhões de toneladas produzidas. 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 da corrente marítima e outros 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 . No meio ambiente, essas micropartículas podem se acumular nos sedimentos ou no ambiente marinho, assim como em outros corpos hídricos. Os MP apresentam capacidade de adsorção de outros contaminantes em sua superfície, tornando-se um excelente transportador de substâncias tóxicas. No ambiente aquático, as partículas desse tipo que possuem densidade próxima à da água podem flutuar sobre a superfície, prejudicando a passagem de luz e, conseqüentemente, a sobrevivência de seres fotossintetizantes. Além disso, por serem partículas muito pequenas, podem ser ingeridas pela biota marinha, causando diversos problemas de intoxicação e desenvolvimento desses animais. Esse tipo de micropartícula também já foi encontrado no corpo humano em diversos órgãos e em fluidos corporais. Estudos indicam que o MP está presente na água tratada para abastecimento, na água engarrafada e até no efluente de lavagem de roupa doméstica. Com isso, é de suma importância avaliar e determinar a eficiência de remoção do MP da água tratada. Para isso, este trabalho analisa a remoção de microplástico de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com o uso do coagulante cloreto de polialumínio (PAC) e do floculante poliacrilamida aniônica (PAM) em diferentes dosagens em ciclo completo (coagulação-floculação-sedimentação) em ensaios de Jar test. Além disso, elaborou-se uma curva de calibração entre a concentração do PEAD em suspensão (partículas até 177 μm) e a turbidez, que apresentou correlação $R^2 = 0,9636$. Para uma concentração de 120 mg/L de PEAD em suspensão na água, adição de 50 mg/L do coagulante PAC e dosagens do floculante PAM variando entre 1,0 a 3,0 mg/L, a remoção do MP demonstrou-se eficiente. Um problema encontrado neste tipo de análise foi a flotação das partículas por sua baixa densidade, que melhorou após a adição do floculante. Em dosagens de PAM próximas a 2,0 mg/L, a turbidez residual média foi de 1,5 unT ($v_s = 2 \text{ cm/min}$), 0,3 unT ($v_s = 0,47 \text{ cm/min}$) e 0,2 unT ($v_s = 0,23 \text{ cm/min}$). Por outro lado, ao adicionar o PAM, alguns flocos não sedimentaram e ficaram aderidos às paredes dos jarros ou à haste de agitação. Para estudos posteriores, sugere-se o uso de métodos para quantificação das partículas flotadas e também da floculação lastreada, visando aumentar a densidades das partículas para que essa etapa ocorra com mais eficiência. Ainda, é de interesse que estudos comparativos sejam realizados entre outros coagulantes sintéticos e naturais.

Palavras-chave: microplástico; PEAD; coagulação; floculação.

ABSTRACT

CABRAL, Leticia da Silva. **Use of Polyaluminum Chloride (PAC) to remove microplastics from treated water.** 2023. Undergraduate thesis (Environmental Engineering Degree) – São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, São José dos Campos, 2023.

Plastic is a very versatile material that can be used for a variety of purposes. It is a synthetic material, also known as a polymer. In 2021, plastic production increased by 4% compared to the previous year, reaching 390 million tons produced. Plastic waste that is inappropriately discarded can suffer degradation in the environment causing microparticles of this waste to be transported over long distances through sea currents and other hydrodynamic phenomena. These debris are classified as microplastics (MP) and have a diameter ranging between 0.1 μm and 5.0 mm, being nanoplastics when smaller than 0.1 μm . In the environment, these microparticles can accumulate in sediments or in the marine environment, as well as in other water bodies. MPs have the capacity to adsorb other contaminants on their surface, becoming an excellent carrier of toxic substances. In the aquatic environment, particles of this type that have a density close to that of water can float on the surface, impairing the passage of light and, consequently, the survival of photosynthetic beings. Furthermore, as they are very small particles, they can be ingested by marine biota, causing various poisoning and development problems for these animals. This type of microparticle has also been found in the human body in various organs and in body fluids. Studies indicate that MP is present in treated water for supply, in bottled water and even in domestic laundry effluent. Therefore, it is extremely important to evaluate and determine the efficiency of MP removal from treated water. To this end, this work analyzes the removal of microplastic from High Density Polyethylene (HDPE) using the coagulant polyaluminum chloride (PAC) and the flocculant anionic polyacrylamide (PAM) in different dosages in a conventional water treatment (coagulation-flocculation-sedimentation) in Jar test trials. Furthermore, a calibration curve was created between the concentration of HDPE in suspension (particles up to 177 μm) and turbidity, which showed a correlation $R^2 = 0.9636$. For a concentration of 120 mg/L of HDPE suspended in water, addition of 50 mg/L of the coagulant PAC and dosages of the flocculant PAM varying between 1.0 and 3.0 mg/L, the removal of PM proved to be efficient. A problem encountered in this type of treatment was the flotation of particles due to their low density, which improved after the addition of the flocculant. At PAM dosages close to 2.0 mg/L, the average residual turbidity was 1.5 unT (vs = 2 cm/min), 0.3 unT (vs = 0.47 cm/min) and 0.2 unT (vs = 0.23 cm/min). On the other hand, when adding PAM, some flakes did not settle and remained adhered to the walls of the jars or the stirring rod. For subsequent studies, it is suggested to use methods to quantify floated particles and also ballasted flocculation, aiming to increase particle densities so that this stage occurs more efficiently. Furthermore, it is of interest that comparative studies be carried out between other synthetic and natural coagulants.

Keywords: microplastics; PEAD; coagulation; flocculation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – PEAD micronizado.....	18
Figura 2 – Balão volumétrico com solução de água e microplástico.....	20
Figura 3 – Amostra de 240 mg de microplástico de PEAD.....	21
Figura 4 – Amostras 1-6 de microplástico de PEAD (240 mg).....	21
Figura 5 – PEAD com surfactante: seco (à esquerda), com água sem agitação (centro), com água após agitação (à direita)	22
Figura 6 – Jar Test preparado para início do experimento.....	22
Figura 7 – Preparação da solução de PAM 0,04%.....	23
Figura 8 – Solução de PAM no agitador magnético	24
Figura 9 - Curva de calibração da turbidez (unT) em função da concentração de PEAD em mg/L .	25
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.....	26
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.....	27
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.....	28
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.....	29
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	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETA	Estação de Tratamento de Água
FeCl₃	Cloreto de Ferro
MP	Microplástico
PAC	Cloreto de Polialumínio
PAM	Poliacrilamida Aniônica
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Tereftalato de Polietileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
UNESP	Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 Danos à saúde humana e ao meio ambiente.....	14
2.2 Operações unitárias em ciclo completo para tratamento da água	15
2.2.1 Coagulação.....	15
2.2.2 Floculação	16
2.2.3 Sedimentação	16
2.3 Uso de diferentes coagulantes no tratamento da água para remoção de microplástico	17
2.4 Polietileno de Alta Densidade.....	17
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	18
3.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD).....	18
3.2 Água de estudo.....	19
3.3 Curva de calibração: Turbidez x Concentração de PEAD	19
3.4 Ensaio em Jar Test	20
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	26
4.1 Curva de Calibração Concentração PEAD x Turbidez	26
4.2 Remoção de turbidez em função das dosagens de coagulantes primário e secundário	26
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31

1 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 e à exposição a este tipo de contaminante, o MP também foi encontrado no corpo humano. Ainda pouco se sabe sobre o efeito dessas partículas dentro do organismo de seres humanos e animais.

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 remoção do poliestireno (PS) e polietileno (PE) com o uso dos coagulantes PAC e FeCl_3 foram comparados variando as dosagens dos coagulantes entre 30 mg/L à 180 mg/L. O PAC se mostrou mais eficiente para a remoção dos dois tipos de MP. Já o estudo recente de Skaf *et al.* (2020) avaliou a eficiência de remoção de MP de polietileno e poliéster comparando com a diminuição da turbidez utilizando o coagulante sulfato de alumínio em concentrações entre 5,0 e 10,0 mg/L. Para amostras com 5,0 mg/L de MP, a turbidez foi reduzida de 16,0 UNT para menor que 1,0 UNT. Em Li *et al.* (2022), a remoção do Polietileno (PE) atingiu eficiência de 85%, utilizando-se 40 mg/L do coagulante hidróxido de magnésio e adicionando-se 5 mg/L do floculante poliacrilamida aniônica (PAM).

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).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Danos à saúde humana e ao meio ambiente

A cada ano os microplásticos têm sido encontrados nos mais diversos lugares. Sua presença ocorre tanto no meio físico quanto no tecido dos seres humanos e animais, percorrendo cadeias tróficas e até mesmo ciclos biogeoquímicos. 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).

Os microplásticos também já foram detectados na água do mar, nos sedimentos, em organismos e até na Antártida (Zhou, 2021 e Skaf, 2020). 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 tóxicas, 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 microplásticos, 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, conseqüentemente, 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 e podem ser transportados aos fetos através da placenta, causando respostas imunológicas nos recém-nascidos (Skaf, 2020).

2.2 Operações unitárias em ciclo completo para tratamento da água

A água de consumo doméstico é submetida ao tratamento convencional de água. O tratamento é composto pelas operações unitárias de coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção e correção do pH e fluoretação (Bittencourt, 2014). Mundialmente não está reportado na literatura uma etapa de tratamento específica voltada à remoção de microplástico da água e por isso é importante avaliar a eficiência do método convencional na remoção desse tipo de poluente.

2.2.1 Coagulação

A coagulação tem como objetivo principal a desestabilização das partículas em suspensão ou em estado coloidal, preparando-as para a etapa de floculação (Howe *et al*, 2016).

O cloreto férrico, o sulfato de alumínio e o policloreto de alumínio (PAC) são coagulantes químicos comumente usados nas estações de tratamento de água (ETAs) (Bittencourt, 2014). Os padrões de potabilidade devem ser atendidos em qualquer hipótese, mas a escolha do coagulante para o tratamento depende da eficiência e do custo-benefício associado. Além disso, os coagulantes apresentam uma faixa ótima de pH para atuarem, que deve ser corrigido durante a etapa de coagulação. Dentre os coagulantes mais utilizados, o PAC apresenta uma maior faixa ótima de pH, sendo escolhido para os experimentos do presente estudo.

2.2.2 Floculação

A etapa de floculação consiste na agregação das partículas que foram desestabilizadas na etapa de coagulação (Howe *et al.*, 2016). As partículas com carga elétrica superficial reduzida se agregam e formam partículas floculantes ou flocos. Esses flocos podem ser removidos na etapa seguinte, através da sedimentação gravitacional, ou ainda via etapa de filtração.

A cinética da floculação é composta por dois mecanismos principais. A floculação em microescala, conhecida como floculação pericinética, ocorre devido as colisões causadas pelo movimento das partículas em movimento aleatório browniano, devido às colisões com as moléculas do fluido que resultam na colisão entre as partículas (Howe *et al.*, 2016). A floculação em macroescala é conhecida também como floculação ortocinética e ocorre através de gradientes de velocidade criados pela agitação da água contendo partículas, o que provoca a colisão entre elas (Howe *et al.*, 2016).

Polímeros de alto peso molecular são comumente usados nessa etapa para auxiliar e promover a agregação das partículas formando flocos maiores e facilitando a etapa subsequente de sedimentação (Bittencourt, 2014). Dentre os floculantes utilizados, a poliacrilamida anionica (PAM) é a mais convencional e foi testada no presente estudo.

2.2.3 Sedimentação

A sedimentação é um processo físico e consiste na separação das partículas sólidas que estão em suspensão da água. As partículas com densidade superior à da água são separadas através das forças gravitacionais, sedimentando no fundo do tanque (Richter, 2009).

A sedimentação em suspensões com baixa concentração pode ocorrer através de 2 mecanismos, a sedimentação discreta e a sedimentação floculenta, que ocorre por conta da ação de coagulantes e floculantes (Richter, 2009). No primeiro mecanismo, as partículas sedimentam por ação da gravidade, no momento em que a velocidade da queda da partícula é superior à velocidade ascendente da água (Howe *et al.*, 2016). O segundo mecanismo ocorre após as etapas anteriores de coagulação e floculação. Nesse caso, as partículas foram desestabilizadas na etapa de coagulação após a adição do coagulante e se agrupam em flocos na etapa de floculação. Assim, os flocos formados sedimentam mais rapidamente devido ao aumento do tamanho e do peso (Howe *et al.*, 2016).

2.3 Uso de diferentes coagulantes no tratamento da água para remoção de microplástico

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 FeCl_3 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 FeCl_3 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 flocculante 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 $4,8 \times 10^{-3}$ 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.

2.4 Polietileno de Alta Densidade

De acordo com as condições de reação e do sistema catalítico utilizado durante a polimerização, é possível produzir cinco diferentes tipos de polietileno, sendo: Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE), Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE), Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE), Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE), Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD ou ULDPE) (Coutinho *et al.*, 2003).

O Polietileno é comumente usado por conta de suas características estruturais e de suas propriedades. Os diferentes tipos de polietileno são diferenciados por suas ramificações na cadeia polimérica, que podem ser geradas por diferentes mecanismos durante a produção desse material.

Para a fabricação, o catalisador tem papel importante para determinação do tipo do PE, pois através dele controla-se o tipo e a distribuição das ramificações, que tem influencia direta sobre as características do material como densidade e cristalinidade (Coutinho *et al.*, 2003).

O PEAD é o terceiro tipo de plástico mais produzido e consumido em todo o mundo, correspondendo a 14% da produção mundial em 2015. O PEAD possui diversas aplicações, dentre elas a produção de garrafas de plástico, recipientes para produtos de limpeza, canos para gás e água potável e utensílios domésticos (QUEIROZ, 2022).

O PEAD é um dos materiais plástico com mais aplicações devido ao seu custo-benefício. É um material que oferece dureza, resistência térmica, mecânica e química, ao mesmo tempo que é atóxico e leve. Dentre suas características básicas, apresenta densidade entre 0,940 g/cm³ e 0,970 g/cm³ e temperatura de fusão entre 128°C a 135°C (Neuplast, 2020).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

O microplástico utilizado foi composto por micropartículas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD). É uma resina micronizada com granulometria padronizada em 95% passante em peneira 80 mesh, o que corresponde a 95% da amostra ter granulometria 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, localizada na rua Gema, nº 220 – Bairro Jardim Campanário – Diadema – SP – Brasil – CEP: 09930-290.

Figura 1 – PEAD micronizado



Fonte: elaborado pela autora.

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

Ensaio	Unidade	Método	Valores Típicos
Índice de Fluidez (190°C / 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	°C	ASTM D 648	69
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N	°C	ASTM D 1525	127

velocidade de teste: 50 mm/min

Fonte: Ficha Técnica Resinpó Indústria e Comércio Ltda.

3.2 Água de estudo

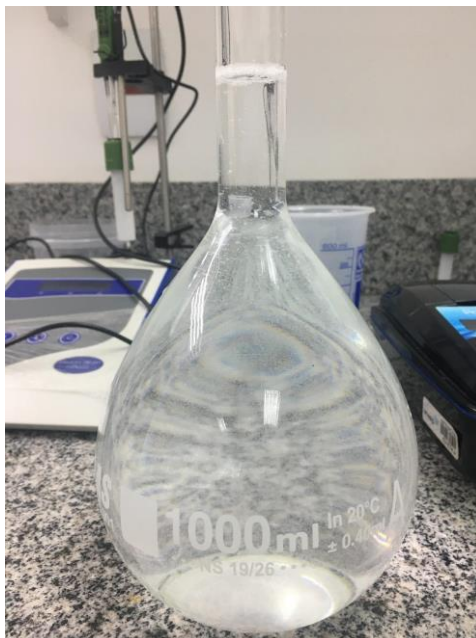
A água utilizada no estudo foi coletada nas torneiras do Laboratório de Saneamento e Hidráulica do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista no campus de São José dos Campos (ICT-UNESP/SJC), localizado no Parque tecnológico da cidade. A água foi coletada antes da realização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

3.3 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.

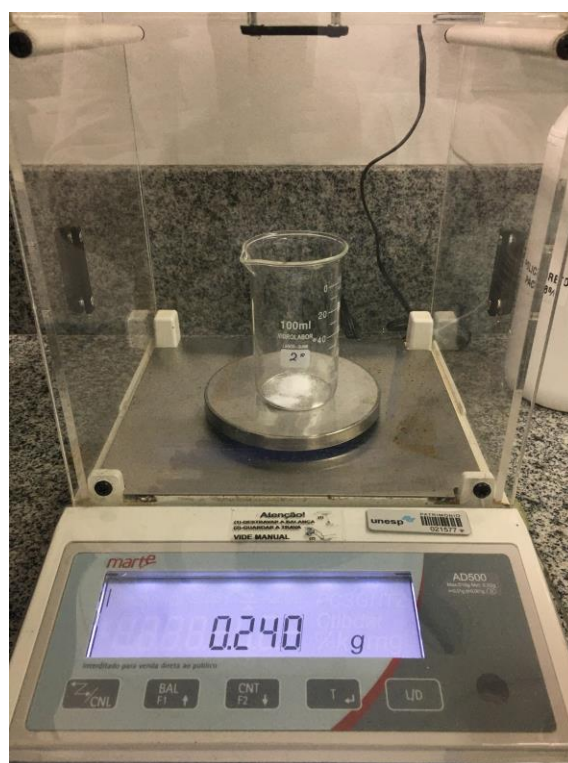
A partir dos dados obtidos, calculou-se a média e o desvio padrão dos resultados e construiu-se a curva de calibração da turbidez das amostras x concentração de PEAD em pó.

3.4 Ensaio em Jar Test

A remoção do MP foi avaliada através de um ensaio 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, 6 amostras com 240 mg de PEAD (Figura 4) foram pesados em um béquer com o auxílio de uma balança analítica (Figura 3) para posteriormente serem adicionados em cada jarro (120 mg/L). A turbidez média da água sintética foi de 24,94 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 aniônio 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 esquerda), 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 policloreto de alumínio (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) (Figura 7). 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 foi 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.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Curva de Calibração Concentração PEAD x Turbidez

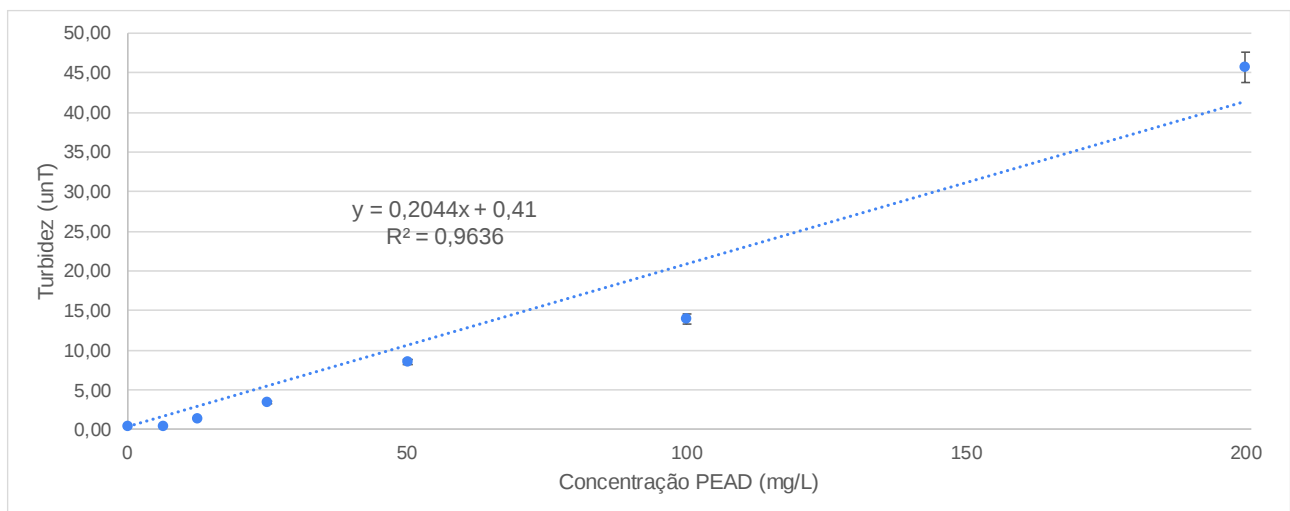
A Figura 9 apresenta a curva de calibração da turbidez (unT) em função da concentração de PEAD em mg/L. De acordo com a Figura 9, a turbidez apresentou uma boa correlação ($R^2 = 0,9636$) com a concentração de PEAD. Com isso, foi determinado a equação da reta através da Equação 1, que correlacionado os dois parâmetros

$$T = 0,2044 (C) + 0,41 \quad (1)$$

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



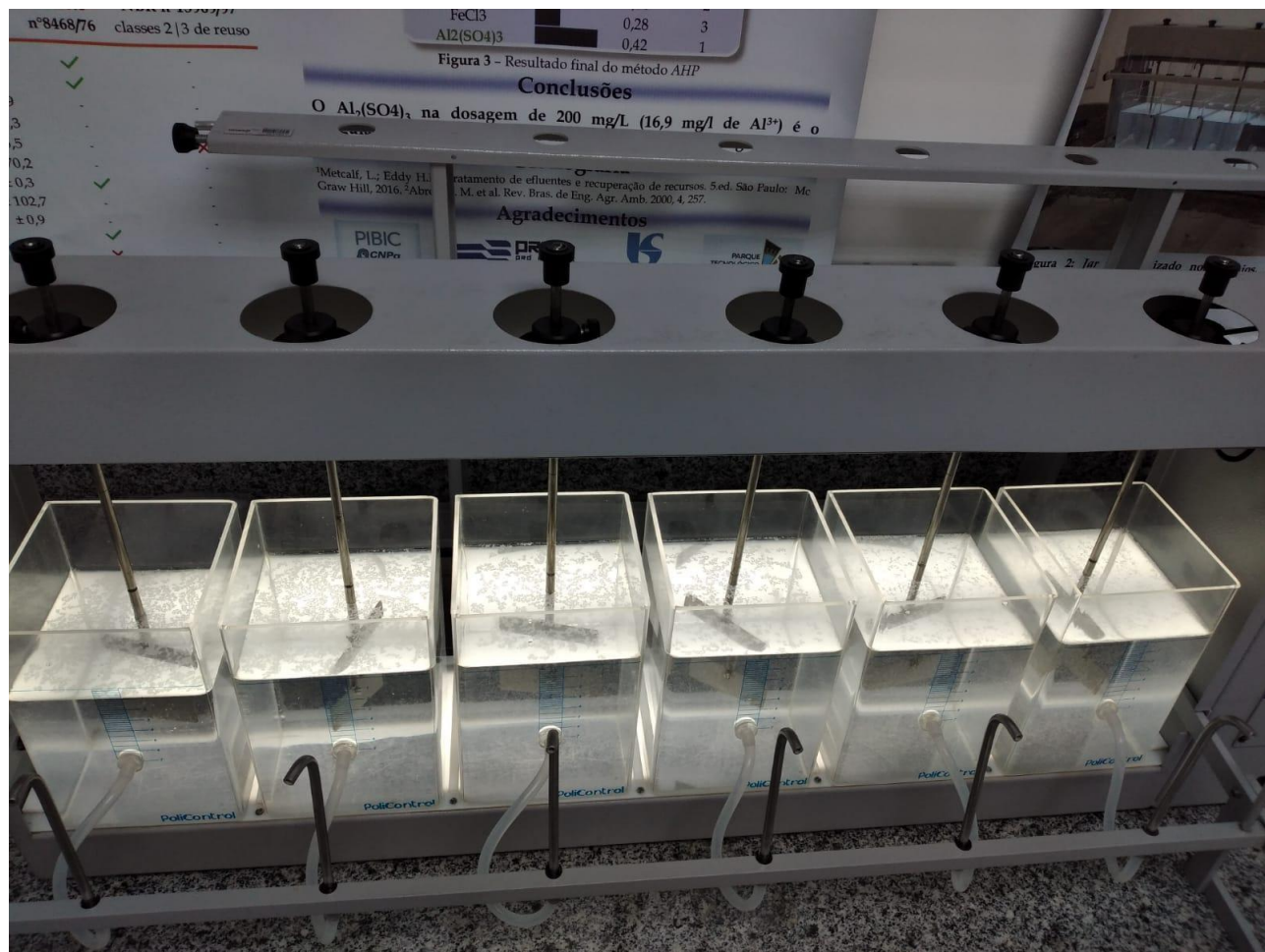
Fonte: elaborado pela autora.

4.2 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 flotação do microplástico, visto que o mesmo possui densidade $0,958 \text{ g/cm}^3$ (Tabela 1), ou seja, inferior à da água na temperatura de estudo (22°C), que é de $0,9978 \text{ g/cm}^3$.

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

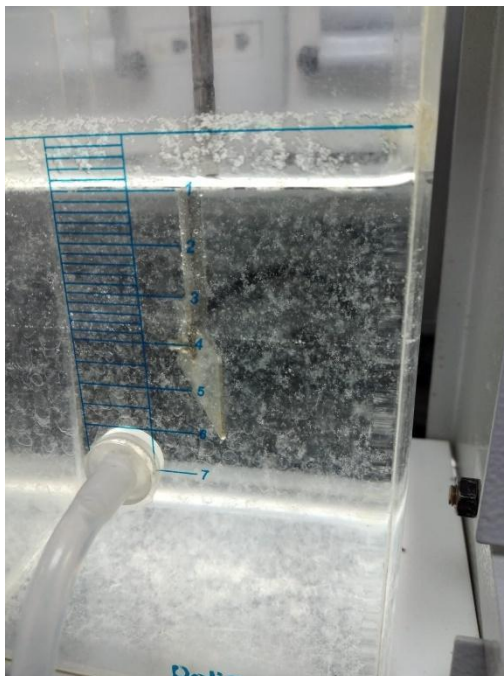


Fonte: elaborado pela autora.

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.

Porém, na Figura 11 é possível observar que no jarro 6, com 50 mg/L de PAC, formaram-se flocos, demonstrando que o mecanismo de varredura foi efetivo. Inclusive a quantidade de PEAD flotado foi menor no jarro 6 quando comparado aos outros jarros, e uma parte do material sedimentou.

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.

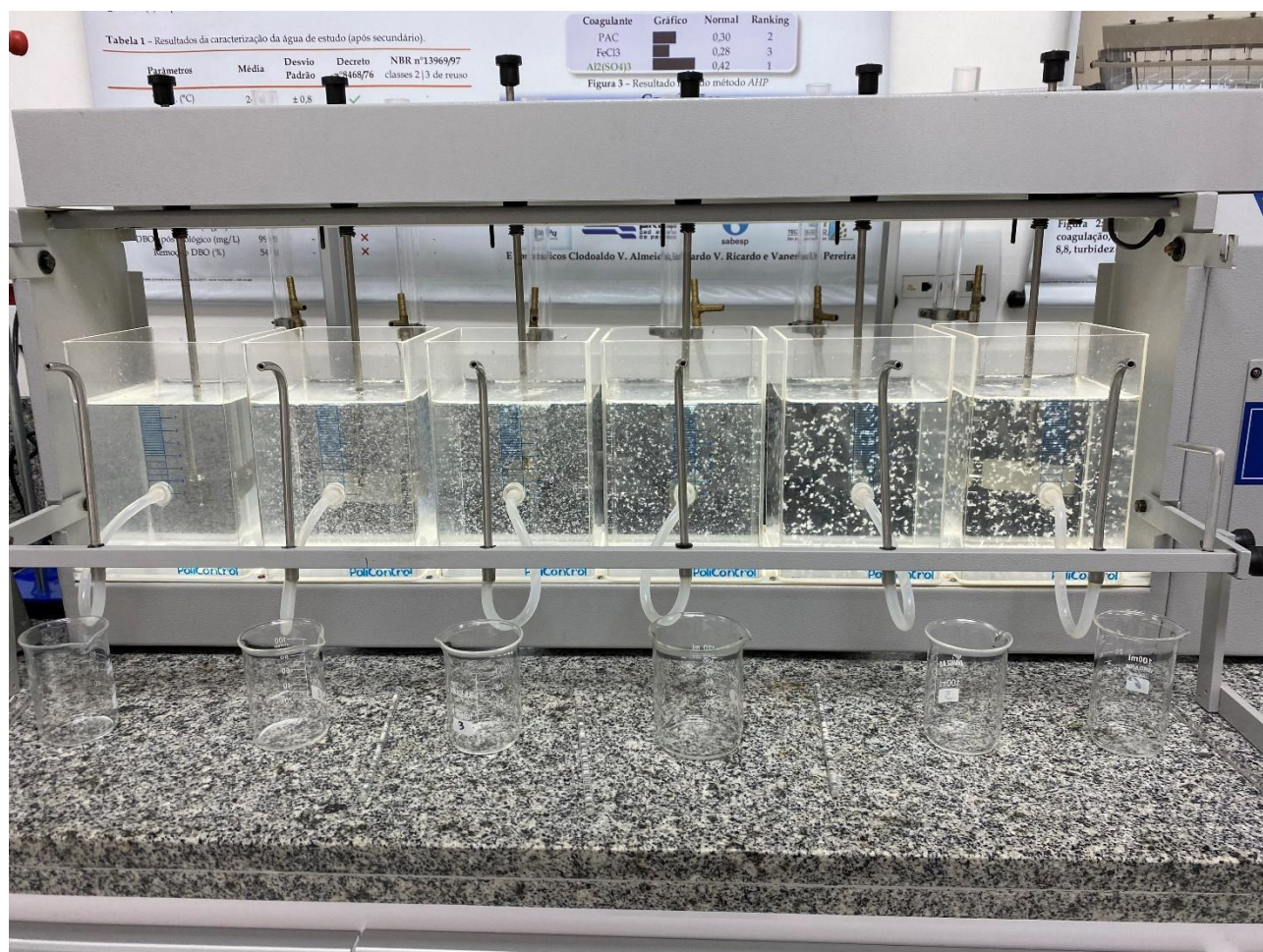


Fonte: elaborado pela autora.

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.

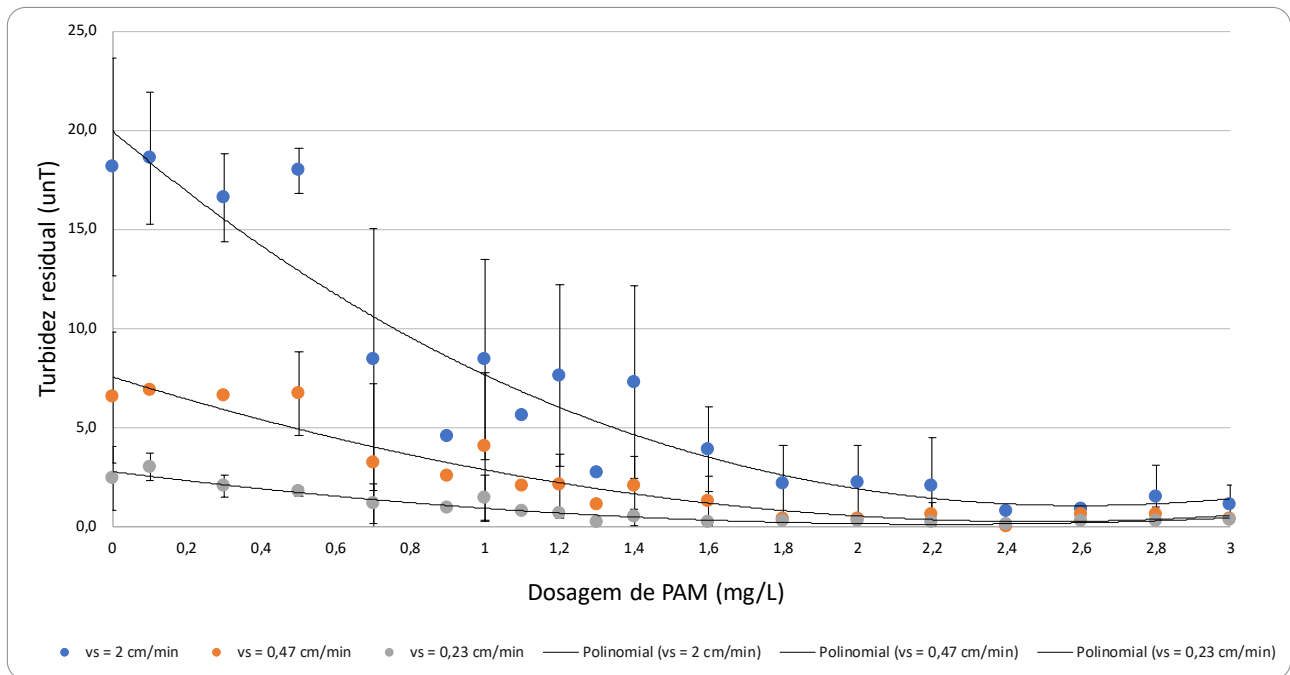
Figura 12 – Ensaio com 120 mg/L de PEAD com adição de 50 mg/L de PAC e 0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 e 2,0 mg/L de PAM, respectivamente nos jarros de 1 a 6 do jar test – crescimento dos flocos



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.



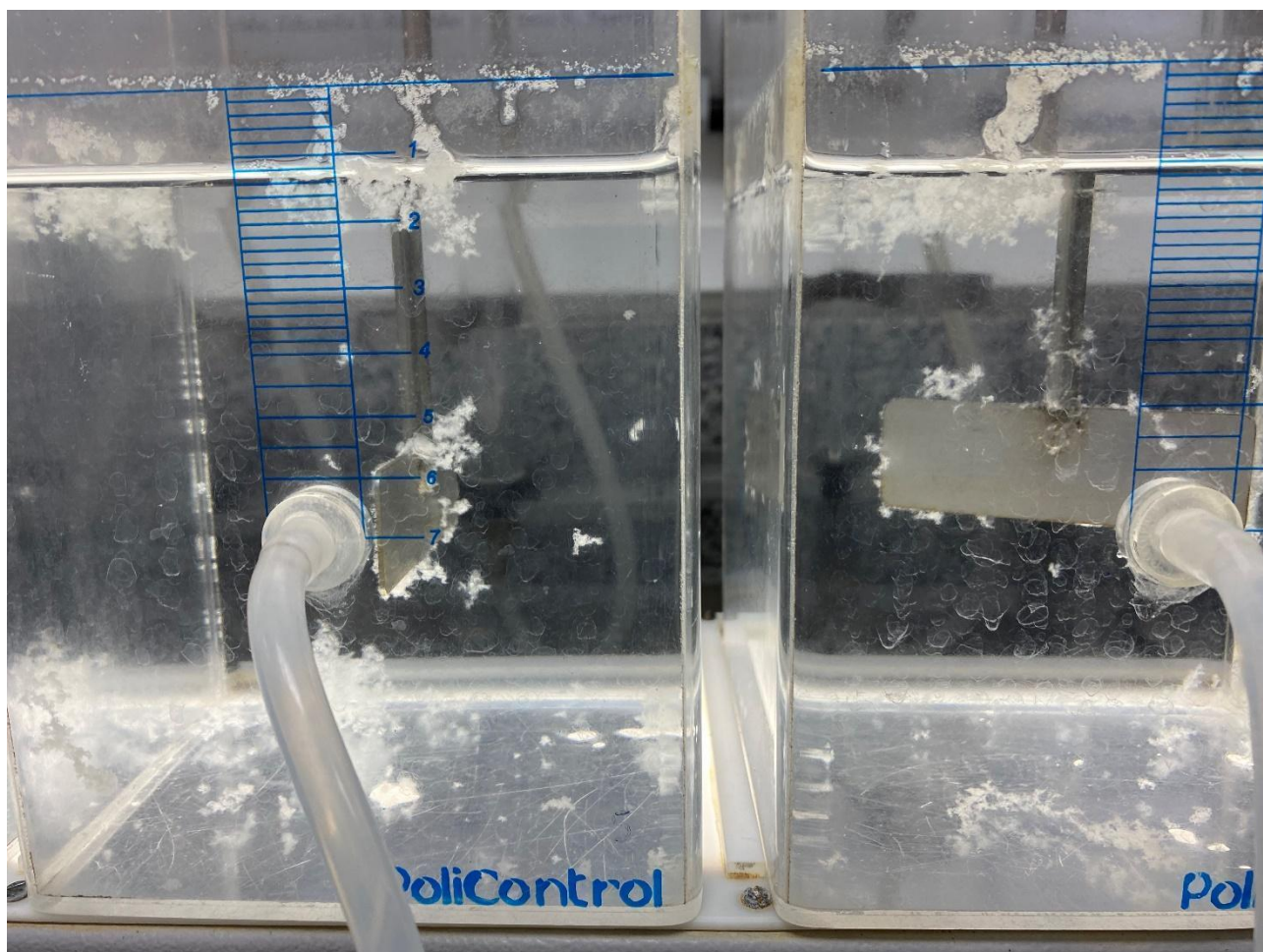
Fonte: elaborado pela autora.

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 ($v_s = 2$ cm/min), 0,3 unT ($v_s = 0,47$ cm/min) e 0,2 unT ($v_s = 0,23$ 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.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 cloreto de polialumínio (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 Poliacrilamida aniônica (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 próximas a 2,0 mg/L de PAM foi possível notar um platô com turbidez residual média de 1,5 unT ($v_s = 2 \text{ cm/min}$), 0,3 unT ($v_s = 0,47 \text{ cm/min}$) e 0,2 unT ($v_s = 0,23 \text{ cm/min}$). Pela baixa densidade das partículas, nota-se que em velocidade de sedimentação usual de $v_s = 2 \text{ cm/min}$ (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

- APHA. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. 2017.
- 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.
- 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>.
- 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.
- HOWE, K. J., HAND, D. W., CRITTENDEN, J. C., TRUSSEL, R. R., TCHOBANOGLIOUS, G. **Princípios de Tratamento de Água**. 1ª ed. São Paulo: Cengage learning, 2016. 624p. ISBN: 978-85-221-2200-4.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- MICHAELI, W. **Tecnologia dos plásticos**. [Digite o Local da Editora]: Editora Blucher, 1995. E-book. ISBN 9788521217305. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521217305/>. Acesso em: 10 out. 2023.
- NEUPLAST, 2020. CONHEÇA O POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E SUAS PROPRIEDADES. Disponível em: <https://www.neuplast.com.br/blog/conheca-o-poli-etileno-de-alta-densidade-e-suas-propriedades/>. Acesso em 15 nov. 2023.
- OßMANN, B., SARAU, G., HOLTSMANNSPÖTTER, 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>.
- PLASTICS, 2021. Plastics-The Facts 2022. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>.

- 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>.
- 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>
- 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
- RAGUSA, A., NOTARSTEFANO, V., SVELATO, A., BELLONI, A., GIOACCHINI, G., BLONDEEL, C., ZUCHELLI, 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>.
- RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009. 624p. ISBN: 978-85-212-0498-5.
- 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>.
- 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>.
- 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.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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>.

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>.