

I-1358 – REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICO POR FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO EM TRATAMENTO DE ÁGUA: ESTUDO EM ESCALA DE BANCADA

Bianca Campos Gonçalves⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade de Brasília e Mestranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília.

Cristina Celia Silveira Brandão

Doutora em Engenharia Ambiental pelo Imperial College de Londres. Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

Claudia Patricia Pereira Simões

Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília e Analista de sistemas de saneamento da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

Yovanka Pérez Ginoris

Doutora em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Professora adjunta do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

Endereço⁽¹⁾: Universidade de Brasília (UnB), Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Prédio SG-12, Asa Norte, Brasília-DF, CEP 70910-900

RESUMO

Os microplásticos (MPs) são partículas de tamanho entre 1 µm e 5 mm e podem ser classificados como micropoluentes emergentes. A ocorrência de MPs já foi verificada em diferentes matrizes ambientais, inclusive em estações de tratamento de água e em mananciais de captação de água para consumo humano. Sendo assim, percebe-se a necessidade em investigar as atuais tecnologias de tratamento no que se refere à remoção de MPs. O presente estudo avaliou, em escala de bancada, a remoção de microplásticos, representados por microesferas fluorescentes de poliestireno de 2 µm, pelos processos de coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido. Os parâmetros de projeto adotados foram baseados na operação da ETA Brasília e a água de estudo correspondeu a dois dos mananciais de captação desta ETA (Torto e Santa Maria). Na Etapa 1 do estudo foi elaborado o diagrama de coagulação, obtendo as condições de pH e de dose do coagulante PAC que forneceram a menor turbidez remanescente. Na Etapa 2, adotando as condições ótimas e adicionando microesferas à água bruta (concentração de 5×10^5 me/L), foram realizados ensaios em Jarreste modificado para avaliar a remoção de MEs pela FAD. Depois, foi realizado um ensaio de sedimentação simples (6 doses de PAC e 1 pH) para comparar a remoção de MEs por flotação e por sedimentação. Por fim, na Etapa 3, variando a taxa de flotação (200, 270 e 340 m/dia), foi avaliada a influência desse parâmetro na remoção das MEs pela FAD, sob pH de 6,5 e dose de PAC 6,5 mg/L. No diagrama de coagulação, foi identificada a região ótima entre as doses acima de 5,5 mg/L e valores de pH de 5,5 e 6,5. Na Etapa 2, foi encontrada remoção máxima de 96,7% em pH de 6,5 e dose de PAC de 6mg/L. Em relação à sedimentação, a remoção de microesferas também se mostrou satisfatória (entre 73,4% e 98,8%). Sob mesma condição de pH (6,5) e dose de PAC (6,5 mg/L), a FAD (taxa = 270 m/dia) mostrou-se um pouco mais eficiente (94,2%) do que a sedimentação (84,5%) com taxa de 35m/dia. Na Etapa 3, verificou-se a pouca influência da taxa de flotação uma vez que os valores médios de remoção de microesferas variaram de 73,8% a 77,4%. Diante disso, o estudo sugere que os microplásticos (microesferas de poliestireno) são passíveis de remoção, no tratamento de água, pelos processos de coagulação, floculação, flotação por ar dissolvido e sedimentação, porém mais estudos devem ser realizados com diferentes coagulantes e diferentes características da água bruta.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de água, remoção de microplástico, flotação por ar dissolvido, microesferas de poliestireno.

INTRODUÇÃO

O acesso à água potável de qualidade é essencial à manutenção da vida e é um direito inerente ao ser humano. Um dos aspectos, no entanto, que afeta a qualidade da água bruta e que pode impactar na qualidade da água tratada e distribuída à população, é a poluição dos mananciais hídricos.

Nas duas últimas décadas é crescente a preocupação com a presença dos chamados micropoluentes emergentes, substâncias potencialmente tóxicas aos ecossistemas e ao ser humano, que, no entanto, ainda não são regulados, seja nos ambientes aquáticos seja na água para consumo humano. Dentre estes micropoluentes, podem ser citados os microplásticos (MP), que são classificados como partículas plásticas de tamanho superior a 1 µm e inferior a 5 mm (Andrady, 2017; GESAMP, 2015).

Conforme sua origem, os MPs podem ser classificados como primários ou secundários. Os MPs primários são produzidos na indústria como micropartículas de diferentes tamanhos, utilizadas na composição de cosméticos, como esfoliantes e na fabricação de produtos diversos, onde são matéria prima, e podem se disseminar e contaminar os ecossistemas por meio do processo de fabricação, do transporte ou do uso desses produtos. Já os secundários são originados a partir da fragmentação de plásticos maiores durante seu uso, ou então da degradação ambiental dos plásticos descartados indevidamente, transformando-se em fragmentos irregulares e microfibras, por exemplo.

Apesar dos estudos acerca da presença de microplásticos e de suas consequências para os ecossistemas e para a saúde serem incipientes, a ocorrência de MPs já foi registrada em diversas matrizes ambientais e em estações de tratamento de água para consumo humano (ETAs), águas tratadas de torneira e engarrafadas.

Em alguns países, como República Tcheca (Pivokonsky *et al.*, 2020) e Alemanha (Mintenig *et al.*, 2019), foi verificada a presença de MP em mananciais de captação e em diferentes estações de tratamento de água para consumo humano. No Brasil, foi registrada a ocorrência de microplásticos em Lagos do Distrito Federal (Alves, 2021) e de Porto Alegre (Bertoldi *et al.*, 2021) bem como em água de torneira da cidade de Brasília no DF (Almeida, 2021).

De forma geral, a preocupação acerca da presença desses poluentes nas águas doces superficiais e subterrâneas nos mananciais de captação envolve o fato de pouco se saber sobre os danos sobre a saúde humana e sobre a eficiência de remoção dos MPs pelas técnicas/tecnologias usualmente utilizadas nas ETAs.

Nesse sentido, o presente estudo, buscou avaliar, em escala de bancada, a eficiência de remoção dos microplásticos, a serem simulados por microesferas fluorescentes de poliestireno, pelos processos de coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido (FAD). Além de realizar um comparativo preliminar entre a eficiência da FAD e da sedimentação.

MATERIAIS E MÉTODOS

O foco deste trabalho foi avaliar, em escala de bancada, a eficiência da coagulação, da floculação e da flotação por ar dissolvido (FAD) na remoção de microplásticos, tendo em vista a realidade de operação da Estação de Tratamento de Água de Brasília (ETA Brasília). Além disso, em caráter preliminar, foi realizado um comparativo entre a remoção de microplásticos na FAD e na sedimentação.

A água que atualmente abastece a ETA Brasília é captada de três mananciais diferentes: córrego Bananal (BN), córrego Torto (TR) e reservatório Santa Maria (SM), os quais apresentam características distintas uns dos outros. A captação é realizada com diferentes combinações a depender da disponibilidade hídrica de cada um. Dessa forma, a vazão de água captada e a contribuição de cada manancial podem ser variáveis, o que pode alterar a qualidade da água bruta que chega à ETA e, assim, impactar no desempenho das tecnologias de tratamento.

Nesse sentido, a fim de evitar que a possível variação da qualidade da água interferisse na realização dos experimentos, culminando em resultados sem representatividade, as coletas da água de estudo foram realizadas diretamente nos mananciais de captação. Além disso, objetivando reproduzir as condições mais comuns da água tratada na ETA, a água de estudo foi composta, aproximadamente, por 75% do reservatório Santa Maria e 25% do córrego Torto.

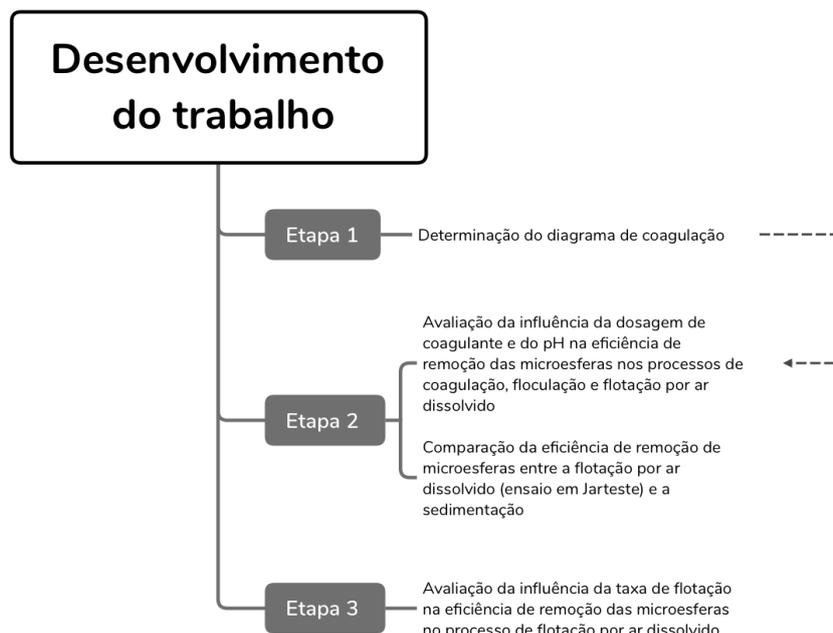


Figura 1 - Esquema de desenvolvimento do trabalho

Conforme apresentado na Figura 1, o estudo foi desenvolvido em 3 etapas experimentais. A primeira etapa (Etapa 1) foi realizada em um equipamento Jarteste, adaptado para flotação, com o objetivo de determinar o diagrama de coagulação para a água bruta sem a adição das microesferas. A faixa de pH adotada foi de 5,5 a 7, e as doses de coagulante (PAC) variaram de 4 a 6,5 mg/L. A partir das condições de pH e de dose de coagulante que propiciaram a maior remoção de turbidez na etapa anterior, a Etapa 2 consistiu em avaliar, ainda em equipamento Jarteste adaptado para FAD, a influência desses dois parâmetros na remoção de microplásticos considerando a água bruta enriquecida com as microesferas fluorescentes de 2 µm.

A Etapa 2 incluiu ainda uma segunda fase, na qual foi realizado um ensaio simples de sedimentação, adotando o mesmo pH de coagulação da fase anterior e doses de PAC entre 5,5 e 8 mg/L, com o objetivo de comparar, em caráter preliminar, as eficiências de remoção de microesferas por sedimentação e pela FAD.

Por fim, com as condições ótimas de pH de coagulação e de dose de coagulante obtidos no ensaio de flotação da Etapa 2, na Etapa 3 foi avaliada, usando um Flotatest, a influência da taxa de flotação na remoção das microesferas pelo processo de flotação por ar dissolvido.

No presente estudo optou-se por representar os microplásticos por microesferas fluorescentes de poliestireno com tamanho de 2 µm. A escolha das microesferas foi feita tendo em vista os bons resultados da aplicação dessas partículas para estimar a eficiência de remoção de oocistos de *Cryptosporidium* (Teixeira, 2019) e a grande representatividade do poliestireno no grupo dos microplásticos. Além disso, a escolha do tamanho da partícula para o estudo foi feita considerando as dimensões dos MPs, entre 1 µm e 5 mm (Andrady, 2017; Cauwenbergh *et al.*, 2015; MSFD, 2013), e o pressuposto de que, caso as tecnologias de tratamento sejam eficientes na remoção das partículas pequenas, elas também seriam efetivas na remoção das partículas maiores. Sendo assim, foi selecionado o tamanho de 2 µm para as microesferas de poliestireno, visto que, devido às limitações do método de quantificação, as partículas menores, de 1 µm, poderiam não ser devidamente visualizadas no microscópio.

As 3 etapas envolvidas no trabalho serão descritas a seguir:

PRIMEIRA ETAPA: DETERMINAÇÃO DO DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO

A construção do diagrama de coagulação na Etapa 1 foi primordial para o desenvolvimento e a boa execução das etapas subsequentes. O objetivo principal dessa etapa foi visualizar o comportamento da água, no que se refere à remoção de turbidez, sob diferentes condições pré-definidas de pH e de dose de coagulante. Para isso,

foi necessário construir, como etapa preliminar, uma curva de pH para que pudesse ser avaliada a resposta dessa água, em termos de pH, à adição de alcalinizante e acidificante.

Foi feito o uso de equipamento de Jarteste (FlocControl, da PoliControl) adaptado para flotação. A adaptação consistiu em substituir os jarros usualmente utilizados em ensaios de sedimentação por jarros específicos para ensaios de flotação e conectar a câmara de saturação e os jarros, utilizando tubos de borracha dotados de registros individuais, o que permitiu controlar a vazão de água saturada inserida em cada jarro (reciclo) e a coleta da água clarificada em diferentes tempos, seguindo a taxa de flotação adotada.



Figura 2 - Vista geral da unidade de Jarteste adaptada para flotação

Para a execução dos ensaios, os valores para o pH de coagulação variaram entre 5,5 e 7,0, e as doses do coagulante PAC entre 4 e 6,5mg/L. É válido evidenciar que a escolha desses valores, bem como dos parâmetros adotados ao longo dos ensaios, explicitados na Tabela 1, foi feita com base no histórico de operação da ETA Brasília e no estudo realizado por Simões *et al.* (2017).

Tabela 1 – Condições operacionais adotadas para determinação do digrama de coagulação – Etapa 1

Processo	Gradiente de velocidade (s ⁻¹)	Rotação (rpm)	Tempo
Coagulação	800	370	30 s
Floculação	69	72	4 min
	53,5	60	4 min
	38	47	4 min
Flotação	Taxa de flotação		Razão de reciclo
	270 m/dia		8%

Como mencionado, a água bruta era coletada a cada etapa experimental diretamente na bomba de captação do reservatório Santa Maria (SM) e no córrego do Torto (TR) por meio de bombonas. Uma vez realizada a coleta, era feita a mistura da água de estudo: 75% SM e 25% TR.

No jarteste, as etapas de coagulação, floculação e flotação são realizadas de forma sequencial. Sendo assim, o experimento era iniciado com a distribuição da água bruta em cada jarro, seguida da adição de alcalinizante (Geocálcio) ou acidificante (Ácido Clorídrico), a homogeneização da mistura e o posterior acréscimo do coagulante PAC. Imediatamente após a etapa de mistura rápida e nos 4 minutos iniciais da floculação, era feita a medição do pH diretamente nos jarros.

Transcorridos os 12 minutos referentes à floculação, a válvula de conexão entre a câmara e o jarro era aberta até o nível d'água atingir a marca de 8%, que corresponde à taxa de reciclo utilizada na estação, e era realizada a etapa de FAD.

Por fim, as amostras de água clarificadas coletadas eram submetidas à análise de turbidez em turbidímetro nefelométrico (HACH, 3100P).

SEGUNDA ETAPA

FASE 1: IMPACTO DO pH E DA DOSE DE PAC NA REMOÇÃO DE MICROESFERAS POR FAD

Para avaliar o impacto do pH de coagulação e da dose de coagulante na eficiência de remoção de microplásticos, na 2ª Etapa do estudo, a água bruta foi enriquecida com microesferas fluorescentes de poliestireno de 2µm, simulando os microplásticos, numa concentração de 10⁵ microesferas/L.

A opção de utilizar as microesferas fluorescentes de poliestireno como representação dos microplásticos foi inspirada em trabalhos que avaliam a eficiência de tecnologias de tratamento de água para consumo humano na remoção de oocistos de *Cryptosporidium*, nos quais estes são simulados por microesferas fluorescentes. Dessa forma, o procedimento de contagem das microesferas utilizado no presente estudo foi o descrito por Teixeira (2019).

As microesferas fluorescentes de poliestireno foram comercializadas pela empresa Polysciences Incorporation, situada na Pensilvânia (EUA), em frascos contendo 5 mL de suspensão concentrada com aproximadamente 5,68x10⁹ partículas/mL. A fim de determinar a concentração real de partículas no frasco comercializado, foi feita a contagem da suspensão de microesferas, diluída 1000 vezes, em câmara de Neubauer. Foi obtida então, concentração média de 4,025x10⁹ partículas/mL, o que corresponde a 4,025x10¹² partículas/L.

Os ensaios de bancada foram realizados sob 2 condições de pH de coagulação e 3 doses de coagulante, ambos selecionados a partir do diagrama de coagulação obtido na etapa anterior. Além disso, ressalta-se que os procedimentos experimentais adotados eram similares aos procedimentos da Etapa 1.

Nesta etapa, as amostras de água clarificada coletadas eram conservadas em frascos de cor âmbar e mantidas na geladeira, em temperatura em torno de 4°C, a fim de preservar a fluorescência das microesferas, até a realização do processo de recuperação e contagem. De forma geral, esse processo envolve a homogeneização e a filtração a vácuo da amostra e a posterior contagem no microscópio. Entretanto, visto que os ensaios em bancada envolveram apenas as etapas de clarificação, algumas amostras apresentaram quantidade expressiva de particulados, o que dificultou a filtração a vácuo. Nesse sentido, foi necessário, como fase preliminar, a diluição das amostras em 100 vezes.

Depois da diluição, a partir de um agitador de tubos (Vortex, Marconi, MA-162) as amostras eram homogeneizadas por pulsos de aproximadamente 5 segundos durante 1 minuto. Com o auxílio de uma pipeta, eram então coletados 20 mL de amostra e, em seguida, filtrados através de uma membrana de cor preta de policarbonato, com 13 mm de espessura e poros de 1 µm, fornecida pela Sterlitech Corporation (EUA). Depois, era acrescentado no filtro e, em seguida, filtrado pela membrana, com auxílio de bomba a vácuo, um volume de 10 mL da solução PBS-TWEEN, lavando o suporte, a membrana e a ponteira da pipeta, com o objetivo de minimizar as retenções de microesferas e possíveis erros na contagem.

Por fim, a membrana era retirada do filtro, transferida para uma lâmina de vidro, coberta com uma lamínula e a contagem era realizada no microscópio de fluorescência (Microscópio ótico Leica - Modelo DM LB2) com aumento de 100 vezes.

Após finalização dos ensaios em Jarreste, foi realizado um ensaio de sedimentação simples (fase 2), com o objetivo de comparar, de forma preliminar, as remoções de turbidez e de microesferas obtidas em cada um dos ensaios.

SEGUNDA ETAPA

FASE 2: COMPARAÇÃO DA REMOÇÃO DE MICROESFERAS PELA FAD E PELA SEDIMENTAÇÃO

A segunda fase da 2ª Etapa envolveu a realização de ensaio de sedimentação com o objetivo de comparar, de forma preliminar, a eficiência de remoção das microesferas entre esse processo e a flotação por ar dissolvido. Foram avaliadas 6 dosagens distintas de PAC (5,5 – 6,0 – 6,5 – 7,0 – 7,5 – 8,0) para o pH de coagulação em torno de 6,5.

Em relação à preparação da água de estudo, o procedimento se deu de maneira análoga aos ensaios de FAD da 1ª fase. Para simulação dos processos de coagulação, floculação e sedimentação foi utilizada uma unidade de

Jarteste para ensaio de sedimentação. Foram usadas as mesmas condições de mistura rápida e floculação dispostas na Tabela 1.

Já a velocidade de sedimentação foi definida conforme o indicado na NBR 12216/1992 como a velocidade mínima para estações de tratamento intermediárias (com capacidade entre 1.000 e 10.000 m³/dia), sendo 35 m/dia.

Quanto às etapas de coagulação e floculação, a execução foi semelhante ao realizado na Etapa 1 e na fase 1 da Etapa 2. Após os 12 minutos de mistura lenta, era iniciado o processo de sedimentação, com a posterior coleta das amostras. Finalizado o ensaio, uma alíquota de cada amostra foi usada para medir a turbidez remanescente e outra foi conservada para, logo depois, ser submetida ao processo de recuperação e contagem de microesferas. Por fim, o procedimento de contagem das microesferas foi executado conforme descrito na fase 1 da 2ª Etapa.

TERCEIRA ETAPA: IMPACTO DA TAXA DE FLOTAÇÃO NA REMOÇÃO DAS MICROESFERAS POR FAD

A 3ª Etapa do estudo foi realizada com o objetivo de avaliar a influência da taxa de flotação na eficiência de remoção das microesferas pelo processo de flotação por ar dissolvido (FAD). Nesse sentido, adotando os valores ótimos de pH de coagulação e de dose de coagulante, resultantes das Etapas 1 e 2 (fase 1), foram realizados ensaios de Flotatestes em colunas adotando-se 3 taxas de flotação distintas (200 m/dia, 270m/dia, 340 m/dia).

O Flotatestes em coluna, assim como o Jarteste, possibilita a simulação dos processos de coagulação, floculação e flotação do tratamento de água. Entretanto, no que se refere à avaliação específica dos parâmetros da flotação, objetivo principal da 3ª Etapa deste trabalho, a unidade de Flotatestes se mostra mais adequada, uma vez que o maior volume e a maior profundidade de suas colunas possibilitam visualizar, de forma mais clara, o movimento ascensional das partículas e das microbolhas e o aumento do nível da água, de forma a viabilizar um controle mais preciso da taxa de flotação e da razão de reciclo.

O Flotatestes é um equipamento em batelada formado por uma câmara de saturação associada a um ou mais recipientes cilíndricos (colunas de flotação), em que ocorrem, sequencialmente, as etapas de mistura rápida, de floculação e de flotação. Para a execução da Etapa 3 do presente trabalho, foi utilizado o flotatestes proposto por Pinto Filho (1999), que pode ser visualizado na Figura 3.



C - Câmara de saturação	2 – Regulador de pressão	6 – Válvula de segurança	10 – Drenos
C1 – Coluna de flotação 1	3 – Ar comprimido	7 – Água saturada	11 – Dreno/Alimentação câmara saturação
C2 – Coluna de flotação 2	4 – Manômetro	8 – Conjunto motor / agitador	
1 – Chegada do compressor	5 – Válvula de agulha	9 – Ponto de coleta	12 – Variadores de velocidade

Figura 3 – Flotatestes em Colunas

Para movimentar as paletas dentro das colunas foram utilizados dois motores com variação de velocidade da marca Stir-Pak (EUA), os quais eram conectados ao mandril em posição perpendicular ao eixo do motor. Dois variadores de velocidade controlavam a rotação dos agitadores, possibilitando uma faixa de 0 até cerca de 270 rpm.

A preparação da água de estudo para a execução dos ensaios da 3ª Etapa seguiu o mesmo procedimento explicitado na 1ª fase da Etapa 2. As condições de mistura rápida (MR) e floculação adotadas nesta etapa foram as mesmas das etapas anteriores e são apresentadas na Tabela 2, juntamente com as condições da FAD (taxa de flotação, tempo de coleta e razão de reciclo).

Tabela 2 - Condições operacionais adotadas – 3ª Etapa, ensaios de FAD em Flotateste em colunas

Mistura Rápida	Grad (s^{-1})	Rotação (rpm)	Tempos
	800	370	30 s
Floculação	Grad médio (s^{-1})	Rotação (rpm)	Tempo
	53,5	22,5	12 min
Flotação por ar dissolvido	Taxa de flotação	Tempo de coleta	Razão de reciclo
	200 m/dia	3 min 10 s	8%
	270 m/dia	2 min 21 s	8%
	340 m/dia	1 min 52 s	8%

Vale ressaltar que o tempo de coleta foi calculado com base na taxa de flotação e na distância do ponto de coleta até a base das colunas de acrílico (44 cm).

Assim como na Etapa 2, na 3ª Etapa a eficiência de remoção pela FAD foi avaliada por meio da turbidez e da contagem de microesferas. Sendo assim, o processo de contagem foi executado conforme o procedimento da fase 1 da 2ª Etapa.

RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

A Etapa 1 foi realizada em duplicata, e na Figura 4 são apresentados os valores médios obtidos em ambos os ensaios. O tamanho dos círculos demonstra a turbidez da água clarificada, de forma que quanto maior a bolha, maior a turbidez clarificada. A água bruta apresentava turbidez baixa (cerca de 4 uT) com pH no valor de 6,8.

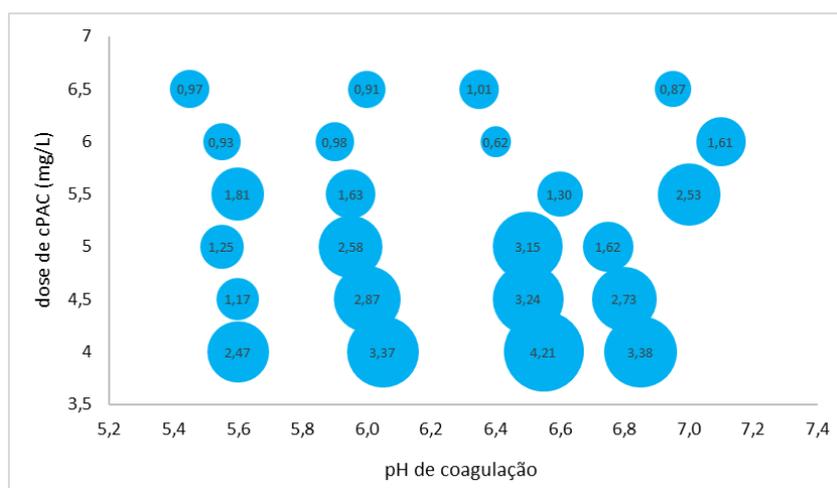


Figura 4 - Diagrama de Coagulação – valores médios obtidos nos dois ensaios

A partir da Figura 4 observa-se que, de maneira geral, quanto maior a dose de coagulante, menor é a turbidez da água clarificada, o que indica uma melhor remoção das impurezas.

É possível observar também que as maiores remoções de turbidez ocorrem a partir da dose de 5,5 mg/L de PAC, com destaque para a dose de 6 mg/L, que propiciou alguns dos menores valores de turbidez verificados:

0,93 uT e 0,62 uT para pH de coagulação entre 5,5 e 6,5, respectivamente. Verifica-se também que as menores doses, entre 3,5 e 5,5 mg/L, apresentaram melhor desempenho apenas no pH mais baixo, em torno de 5,5.

Como mencionado anteriormente, as condições de pH e de dosagem selecionadas para a execução da Etapa 1, assim como a escolha da composição da água de estudo (75% Santa Maria e 25% Torto) foram baseadas no trabalho realizado por Simões *et al.* (2017). Os autores consideram, para construção dos diagramas, diferentes composições da água bruta (25% Santa Maria e 75% Torto; 50% Santa Maria e 50% Torto; 100% Torto), sendo que nenhuma delas é igual à composição utilizada no presente trabalho.

Nesse sentido, considerando a composição mais próxima da utilizada no presente estudo (50% Santa Maria, 50% Torto), diferentemente do observado na Figura 4, Simões *et al.* (2017) observaram que a região de menor turbidez remanescente se encontrava entre as doses de 3,5 e 5,5 mg/L e valores de pH entre 5,0 e 7,0. Tal diferença pode ter sido decorrente da composição utilizada nos dois ensaios e a realização dos ensaios em diferentes períodos do ano.

Em relação apenas ao pH, a tendência observada pelo presente estudo também foi verificada por Simões *et al.*: dentre os valores de pH analisados, aqueles que forneceram, de maneira geral, menores resultados de turbidez remanescente foram em torno de 5,5 e 6,5.

Por fim, diante do diagrama de coagulação mostrado na Figura 4 e as discussões apresentadas, as condições escolhidas para a etapa seguinte, que forneceram os menores valores de turbidez remanescente, foram as doses de PAC: 5,5; 6,0 e 6,5 mg/L e dois valores de pH de coagulação: um deles em torno de 5,5 e o outro em torno de 6,5.

RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA – Fase 1

Na 2ª Etapa foram realizados 2 ensaios no Jarteste modificado para FAD. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos em ambos os ensaios desta etapa, que objetivou avaliar a eficiência de remoção de microesferas nas etapas de coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido. Nesse sentido, tem-se os dados de pH, turbidez e contagem de microesferas da água bruta, além das dosagens de coagulante, dos valores de pH de coagulação e da turbidez da água clarificada verificados em cada uma das amostras assim como a quantidade de microesferas contabilizadas.

Tabela 3 - Resultados brutos obtidos na 2ª Etapa (fase 1) – Ensaios 1 e 2 com FAD

Água Bruta	pH			Turbidez		
	7,0			3,4 uT		
Ensaio 1						
Dose de PAC (mg/L)	5,5	6,0	5,5	6,0	6,5	
pH de coagulação	5,5	5,6	6,6	6,6	6,5	
Turbidez clarificada (uT)	0,79	0,81	0,88	0,74	0,84	
Nº microesferas/L	90.000	40.000	35.000	35.000	20.000	
Ensaio 2						
Dose de PAC (mg/L)	5,5	6,0	6,5	5,5	6,0	6,5
pH de coagulação	5,6	5,6	5,6	6,5	6,6	6,6
Turbidez clarificada (uT)	1,2	0,90	0,96	1,1	0,77	0,78
Nº microesferas/L	50.000	120.000	50.000	130.000	50.000	50.000

A Figura 5 resume a eficiência de remoção de microesferas obtida nos dois ensaios realizados, sendo que a cor azul e valores escritos em preto representam o ensaio 1, e a cor laranja com valores em branco representam o ensaio 2. No gráfico, o tamanho dos círculos reflete a remoção de microesferas, sendo assim, quanto maior a bolha, maior foi a remoção.

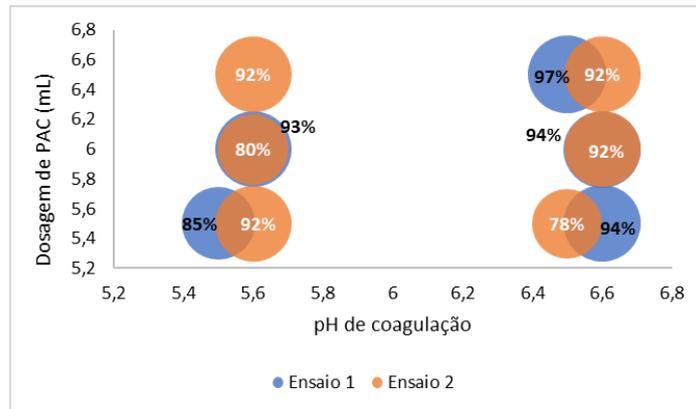


Figura 5 – Remoção de microesferas obtida na 2ª Etapa – ensaios 1 e 2

A partir da Figura 5, é possível observar que, para todas as condições analisadas, houve uma elevada remoção de microesferas, acima de 78%. Por possuírem um tamanho bem reduzido e apresentarem baixa densidade, as microesferas têm boa aderência aos flocos e às bolhas de ar geradas na FAD e, então, maior suscetibilidade em ascender à superfície.

Apesar dos valores de remoção obtidos serem próximos, evidencia-se que o pH de coagulação em torno de 6,5 apresentou as melhores remoções de microesferas (94% e 97%) para as 3 dosagens analisadas. Sendo assim, o pH de coagulação de 6,5, combinado com a dose de 6,5 mg/L, que promoveu a maior remoção (97%), foi a condição escolhida para a execução da etapa seguinte.

Na Figura 6 observa-se um comparativo entre os valores médios, obtidos nos ensaios 1 e 2, de eficiência de remoção de turbidez e a eficiência de remoção de microesferas. Os círculos verdes, com o valor de remoção em preto, representam as microesferas, enquanto os círculos azuis, com os valores na cor branca, representam a turbidez.

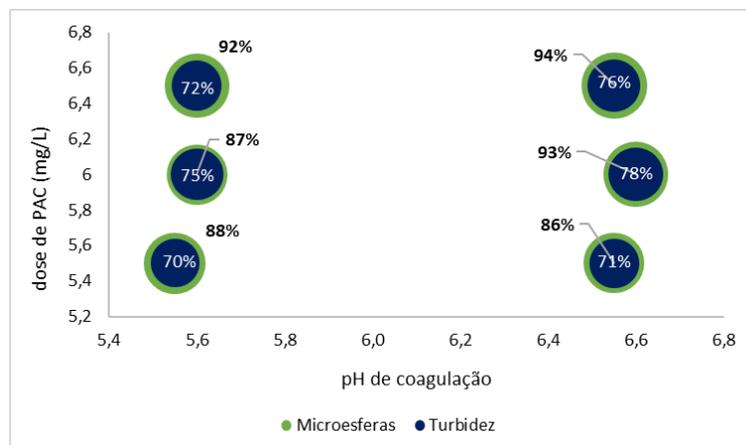


Figura 6 - Eficiência de remoção de microesferas e eficiência de remoção de turbidez – 2ª Etapa

Como observado na Figura 6, a remoção de microesferas foi mais eficiente que a remoção de turbidez. Além disso, apesar de algumas amostras apresentarem tendência diferente, ao analisar as amostras como um todo, pode-se inferir que a boa remoção de turbidez indicaria a boa remoção de microesferas e, portanto, de microplásticos.

Por fim, a Figura 7 ilustra a visualização das microesferas fluorescente durante a contagem no microscópio de fluorescência, com aumento de 100 vezes.



Figura 7 - Microesferas visualizadas por microscopia de fluorescência – Aumento 100x

RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA - FASE 2

Esta fase do trabalho consistiu em comparar as eficiências de remoção de microsferas nos processos de sedimentação e flotação por ar dissolvido. Para tanto, foram realizados ensaios simples de sedimentação, adotando pH de coagulação em torno de 6,5 e dosagens de PAC entre 5,5 e 8 mg/L, de modo a comparar, em caráter preliminar, com os resultados da fase 1 da Etapa 2, considerando a mesma condição de pH.

As características da água bruta, pH, turbidez e número inicial de microsferas, assim como os resultados da turbidez da água clarificada por sedimentação e do número de microsferas na água clarificada para cada uma das dosagens de PAC adotadas, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados brutos obtidos na 2ª Etapa (fase 2) – Ensaio de sedimentação

Água Bruta	pH		Turbidez		Nº microsferas	
	6,6		4,17		167,5 x 10 ⁵ me/L	
Jarro	1	2	3	4	5	6
Geocálcio (mg/L)	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
PAC (mg/L)	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
pH coagulação	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,4
Turbidez clarificada	3,1	2,6	3,7	2,3	3,6	3,8
Nº microsferas/L	800.000	200.000	2.600.000	4.450.000	550.000	300.000

É válido relembrar que a água de estudo é uma combinação de 2, dos 3 mananciais, comumente captados na Estação de Tratamento de Água de Brasília (ETA BSB). Tais mananciais originam uma água bruta com quantidade elevada de algas e baixa turbidez. Além disso, conforme o histórico de operação da estação, os flocos formados após as etapas de coagulação e de floculação são pequenos e leves, o que dificulta o processo de sedimentação, no qual os flocos decantam ao longo da profundidade do jarro.

Essa limitação para o uso do processo de sedimentação pode ser visualizada na Figura 8, na qual é possível observar que em que a remoção de turbidez ficou abaixo de 50% em todas as doses de coagulante, além de apresentar uma tendência específica.

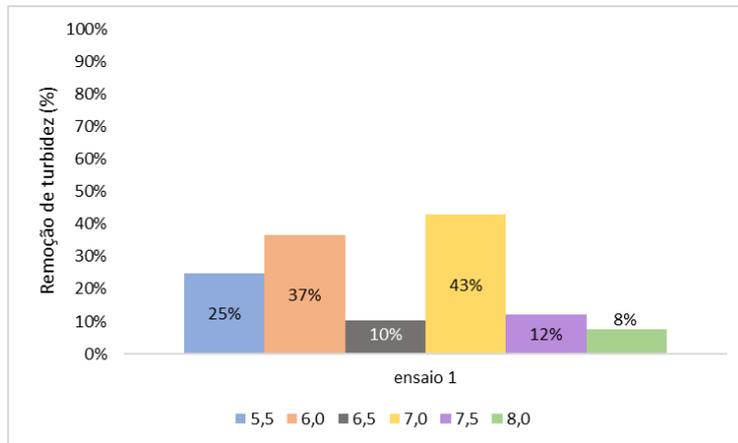


Figura 8 - Remoção de turbidez no ensaio de sedimentação (Etapa 2 – fase 2) – pH de 6,5

Em relação à remoção de microesferas (Figura 9), observa-se, de um modo geral, uma elevada remoção de microesferas. A partir dos dados obtidos, diferentemente do observado nos ensaios de flotação da Etapa 2, não há uma tendência comum entre a remoção de turbidez e de microesferas.

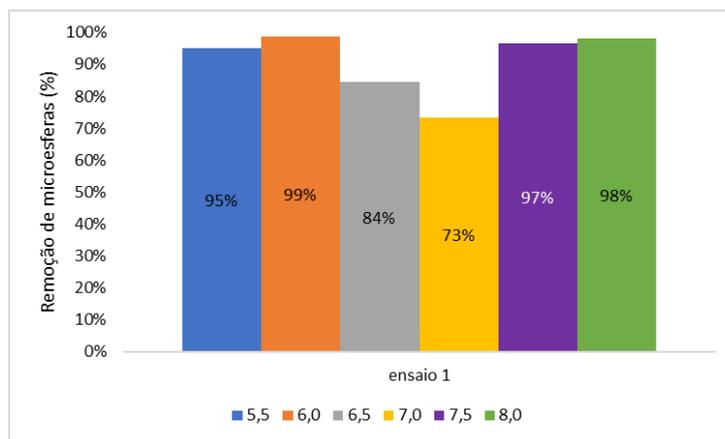


Figura 9 - Remoção de microesferas no ensaio de sedimentação (Etapa 2 – fase 2) – pH de 6,5

A Figura 10 mostra a comparação da eficiência de remoção de microesferas por sedimentação e por flotação, considerando mesma condição de pH (6,5) e de dose de PAC (6,5 mg/L). Ressalta-se que, para o valor de remoção na flotação, foi feita a média dos dois valores encontrados nos ensaios 1 e 2 da fase 1 da 2ª Etapa.

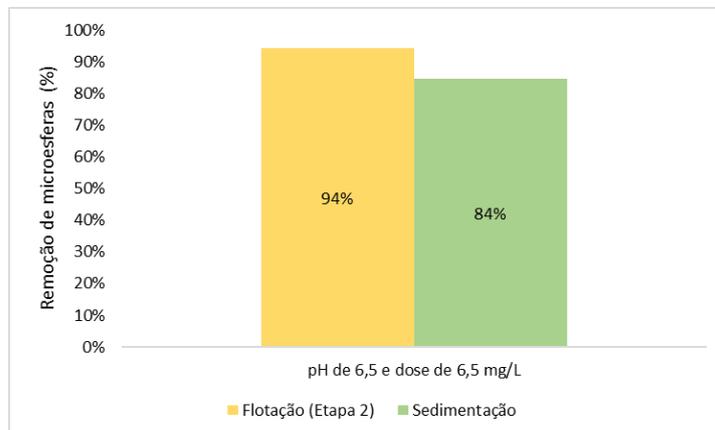


Figura 10 - Comparativo da eficiência de remoção entre a flotação (Etapa 2 – fase 1) e a sedimentação (Etapa 2 – fase 2)

Na Figura 10, observa-se remoção de microesfera eficiente nos dois processos avaliados. No entanto, a flotação apresenta desempenho ligeiramente melhor.

RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA

A 3ª Etapa do estudo consistiu em avaliar a remoção das microesferas fluorescentes a partir no equipamento Flotateste. Vale ressaltar que o ensaio foi realizado em duplicata, a fim de minimizar possíveis erros operacionais e experimentais e melhorar a confiabilidade dos dados. Dessa forma, os resultados dos ensaios 1 e 2, assim como as doses de PAC e de geocálcio, as taxas de flotação adotadas, o pH de coagulação e os dados iniciais da água bruta de estudo, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados brutos obtidos na 3ª Etapa – Ensaio de FAD em Flotateste em colunas

Água Bruta	pH		Turbidez		Nº microesferas	
	6,7		3,89		31,5 x 10 ⁵ me/L	
Ensaio	Ensaio 1			Ensaio 2		
Taxa de flotação (m/dia)	200	270	340	200	270	340
Geocálcio (mg/L)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
PAC (mg/L)	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
pH coagulação	6,5	6,5	6,6	6,3	6,5	6,6
Turbidez clarificada (UT)	1,97	1,36	1,02	1,82	1,13	0,8
Nº microesferas/L	875.000	800.000	750.000	775.000	900.000	675.000

As Figuras 11 e 12 mostram os valores de eficiência de remoção de turbidez e de microesferas, respectivamente, nos dois ensaios realizados.

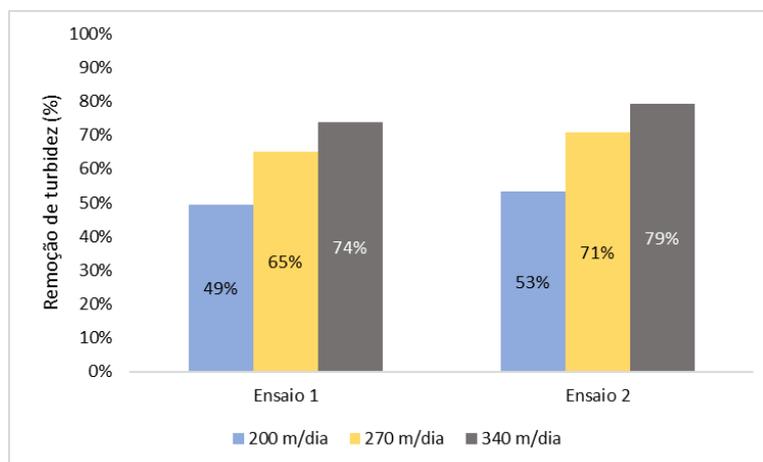


Figura 11 - Eficiência de remoção de turbidez - 3ª Etapa, ensaios de FAD em Flotateste em colunas

Ao comparar as 3 taxas de flotação avaliadas nos ensaios da 3ª Etapa (Figura 11), é possível perceber uma tendência em relação à turbidez da água clarificada: quanto maior a taxa de flotação, maior a remoção de turbidez. Observa-se que a taxa de 200 m/dia houve um baixo desempenho, com remoção média em torno de 51%.

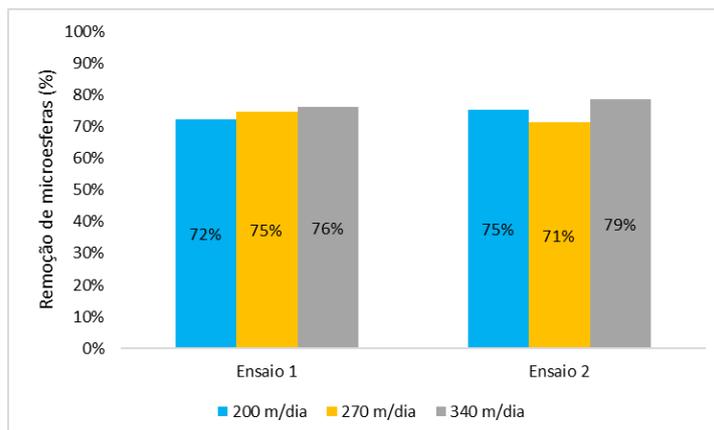


Figura 12 - Eficiência de remoção de microesferas - 3ª Etapa, ensaios de FAD em Flotateste em colunas

Já em relação à remoção de microesferas (Figura 12), observa-se que as três taxas avaliadas apresentaram remoções próximas e satisfatórias (todas acima de 71%), o que mostra a pouca influência de taxa de flotação na remoção de microesferas e, portanto, na remoção de microplásticos, confirmando o uso da flotação por ar dissolvido como uma tecnologia eficiente e robusta na remoção desses micropoluentes.

A taxa de 270 m/dia foi a única utilizada tanto na 2ª Etapa (fase 1) quanto na 3ª Etapa. Sendo assim, considerando apenas as amostras em que foi obtido pH de coagulação em torno de 6,5 e utilizada dose de PAC de 6,5 mg/L, foi possível construir um comparativo dos resultados de remoção de turbidez e de microesferas obtidos na fase 1 da Etapa 2 e na Etapa 3 (Figura 13).

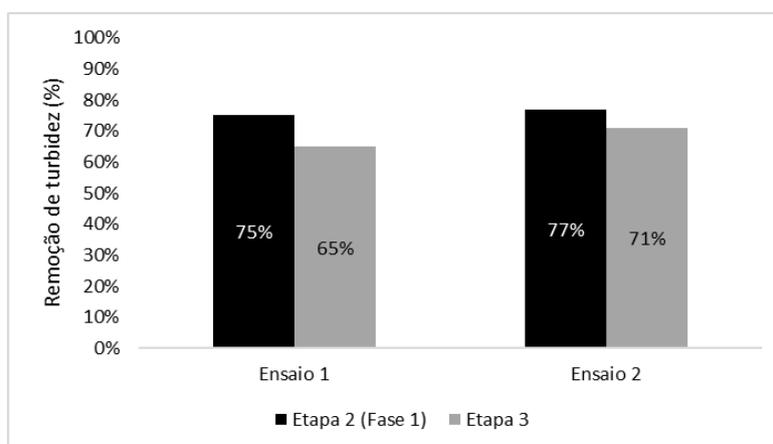


Figura 13 - Comparativo da eficiência de remoção de turbidez nas Etapas 2 (fase 1) e 3 – pH de coagulação 6,5; dose de 6,5 mgPAC/L; taxa de flotação 270 m/dia

A partir da Figura 13 pode ser notada uma diferença entre as eficiências de remoção de turbidez obtidas nas duas etapas, com menores valores de eficiência sendo obtidos na 3ª Etapa. Vale ressaltar que as etapas foram realizadas com um intervalo de algumas semanas entre si e que, a cada etapa, eram coletadas novas amostras de água bruta diretamente do reservatório Santa Maria e do córrego do Torto. Dessa forma, as características da água, em termos de turbidez, presença de sedimentos e presença de algas, variou entre um ensaio e outro, o que pode explicar a diferença entre os resultados.

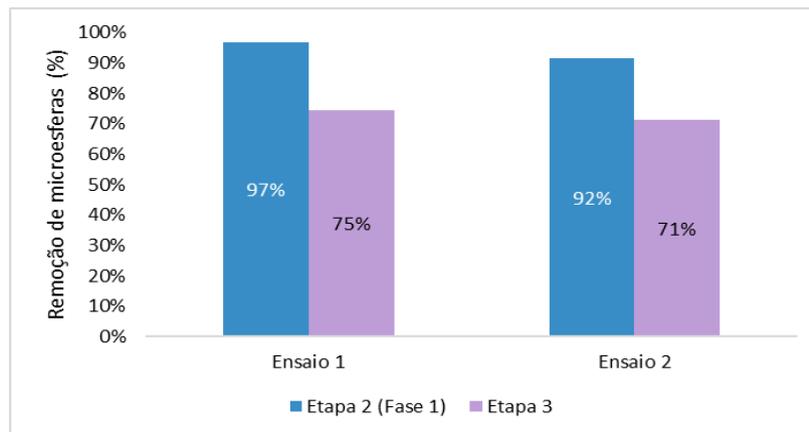


Figura 14 - Comparativo da eficiência de remoção de microesferas pela FAD nas Etapas 2 (fase 1) e 3 - pH de coagulação 6,5; dose de 6,5 mgPAC/L; taxa de flotação 270 m/dia

Assim como nos resultados de turbidez, os resultados de remoção das microesferas (Figura 14) também variaram entre as etapas. Nesse caso se aplica a mesma explicação referente à mudança das características da água bruta, com um adendo de que, ao levar as amostras de água bruta e clarificada dos ensaios da Etapa 3 para a contagem de partículas no microscópio, foram observadas estruturas, possivelmente algas filamentosas, que se aderiram às microesferas presentes na água, interferindo na precisão da contagem. Tal ocorrência foi observada apenas na Etapa 3, o que pode ter levado a uma subcontagem do número de microesferas principalmente da água bruta e contribuído para a diferença entre os resultados obtidos nas duas etapas.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que a flotação por ar dissolvido (FAD) é um processo adequado e eficiente para a remoção de microesferas de poliestireno e, portanto, de microplásticos.

Quanto aos resultados experimentais, o diagrama de coagulação elaborado na 1ª Etapa mostrou que as regiões ótimas para remoção de turbidez da água de estudo (75% Santa Maria + 25% Torto) estavam localizadas em torno do pH 5,5 e do pH 6,5, ambos com doses de PAC a partir de 5,5 mg/L até 6,5 mg/L.

Os ensaios em Jarreste modificado para FAD realizados na Etapa 2 (fase 1), sob as condições ótimas, demonstraram remoção de microesferas (MEs) acima de 78% em todas as condições analisadas. Na condição de pH em torno de 6,5 e doses de PAC de 6,0 e 6,5 mg/L, foram encontradas, a partir do valor médio entre os dois ensaios realizados, as maiores remoções de MEs (93% e 94%). Já na dose de PAC mais baixa, 5,5 mg/L, a melhor remoção foi avaliada no pH de 5,5, sendo de 88%. Diante disso, percebe-se que, para a água estudada, ambos os parâmetros têm baixa influência na eficiência de remoção de microesferas. Apesar da remoção de microesferas ter sido levemente superior à remoção de turbidez, observou-se uma relação entre os parâmetros, sendo possível inferir a boa remoção de turbidez indicaria a boa remoção de microesferas e, portanto, de microplásticos.

Ao comparar, de forma preliminar, a remoção de microesferas pela FAD e pela sedimentação, verificou-se que o segundo processo também apresentou resultados satisfatórios, visto que, sob pH de 6,5 e velocidade de sedimentação de 35 m/dia, a remoção de MEs foi entre 73% (dose de PAC de 7mg/L) e 99% (dose de 6,0 mg/L). Entretanto, diferente do observado nos resultados obtidos na FAD, na sedimentação não foi visualizada relação entre a remoção de turbidez e a remoção de microesferas, tema que merece maior aprofundamento.

Sob condições fixas de pH de coagulação (6,5), dose de PAC (6,5 mg/L) e razão de reciclo (8%), a variação da taxa de flotação, na faixa estudada, influenciou pouco a eficiência de remoção de microesferas pela FAD. Isso porque, considerando as três taxas avaliadas: 200 m/dia; 270 m/dia e 340 m/dia, a remoção por ar dissolvido variou de 74% a 77%. Sendo assim, os resultados obtidos nas Etapas 2 e 3 confirmam a flotação por ar dissolvido como uma alternativa eficiente e robusta na remoção dos microplásticos no tratamento de água.

Com base nos resultados alcançados pelo presente trabalho, que pode ser considerado ainda de caráter preliminar, são feitas algumas recomendações para futuras pesquisas sobre a remoção de microplásticos em estações de tratamento de água:

- Avaliar a influência de taxas de flotação maiores na remoção de microplásticos por flotação por ar dissolvido;
- Avaliar a influência de diferentes razões de reciclo na remoção de microplásticos por flotação por ar dissolvido;
- Aprofundar a comparação da eficiência de remoção de microplásticos por flotação por ar dissolvido e por sedimentação, analisando a relação entre remoção de microplásticos e remoção de turbidez;
- Analisar a influência das características da água bruta na eficiência dos processos de clarificação;
- Avaliar a eficiência de remoção de microplásticos por filtração direta.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb) por viabilizar a realização dos ensaios nas dependências da ETA Brasília.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Almeida, M.A.A.L.S. (2021). *Análise semiquantitativa de microplásticos na água de torneira na cidade de Brasília - Distrito Federal*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Ciências da Saúde, Brasília, DF, 61p.
2. Alves, I.O. (2021). *Primeiras evidências sobre a presença de microplásticos nas águas do Lago Paranoá*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Brasília, Instituto de Química, Brasília, DF, 47p.
3. Andrady, A.L. (2017). "The plastic in microplastics: A review." *Marine Pollution Bulletin*, **119**(1), 12-22.
4. Araújo, L. (2022). *Remoção de microplásticos no tratamento de água para consumo humano*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 118p.
5. Bertoldi, C.; Lara, L.Z.; Mizushima, F.A.L.; Martins, F.C.G., Battisti, M.A., Hinrichs, R., Fernandes, A.N. (2021). "First evidence of microplastic contamination in the freshwater of Lake Guaíba, Porto Alegre, Brazil" *Science of the Total Environment*, **759**.
6. GESAMP (2015). "Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment" (Kershaw, P. J., ed.). (IMO/FAO/UNESCO- IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP No. 90, 96 p.
7. Pinto Filho, A.C.T. (1999). *Avaliação do potencial da flotação dor ar dissolvido como pós-tratamento para efluentes do processo de lodos ativados, de reatores uasb e de lagoas de alta taxa*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 210p.
8. Pivokonsky, M.; Pivokonska, L.; Novotna, K.; Cermakova, L.; Klimtova, M. (2020). "Occurrence and fate of microplastics at two different drinking water treatment plants within a river catchment." *Science of the Total Environment*, **741**.
9. Simões, C. P. P.; Cavalcante, A. C.; Lima, L. C. F. B.; Schimicoski, R. S.; Brandão, C. C. S. (2017). "Influência da utilização de diferentes misturas de mananciais no tratamento de água por flotação por ar dissolvido – Avaliação em escala de bancada." *28ª Feira Nacional de Saneamento e Meio Ambiente*, n° 370, São Paulo, Brasil.
10. Teixeira, T.G.L. (2019). *Emprego de microesferas de poliestireno como substitutas de oocistos de cryptosporidium na avaliação em escala piloto da filtração direta descendente*. Monografia de Projeto Final, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 124p.