



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

TÍTULO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO
DE ÁGUAS PARA REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICO EM UM MEIO
AQUOSO**

Linha de Pesquisa: Recursos Regionais e Meio Ambiente

Mestrando (a): Wellerson da Silva Cruz

Orientador: Prof. Dr. Kepler Borges França

Campina Grande - PB

2025

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO
DE ÁGUAS PARA REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICO EM UM MEIO
AQUOSO**

Dissertação de Mestrado submetida à
Coordenação do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Química, da
Universidade Federal de Campina Grande,
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Kepler Borges França
(PhD)

Campina Grande - PB

2025

WELLERSON DA SILVA CRUZ

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO
DE ÁGUAS PARA REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICO EM UM MEIO
AQUOSO**

Avaliado em 13 de fevereiro de 2025

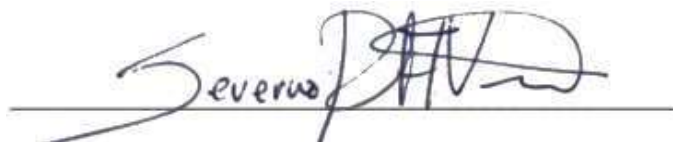
Banca Examinadora:

Kepler Borges
França

Assinado de forma digital
por Kepler Borges França
Dados: 2025.03.06
10:09:41 -03'00'

Prof. Kepler Borges França (PhD)

Orientador



Prof. Dr. Severino Rodrigues Neto

Avaliador interno

Documento assinado digitalmente
gov.br VIMARIO SIMÕES SILVA
Data: 06/03/2025 16:48:49-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Vimário Simões Silva

Avaliador Interno

C957d

Cruz, Wellerson da Silva.

Desenvolvimento e avaliação de um sistema de tratamento de águas para remoção de microplástico em um meio aquoso / Wellerson da Silva Cruz. – Campina Grande, 2025.

87 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2025.

"Orientação: Prof. Dr. Kepler Borges França".

Referências.

1. Microplásticos. 2. Sistema híbrido. 3. Separação do Microplástico.
4. Tratamento de Água. I. França, Kepler Borges. II. Título.

CDU 628.161.2:678.5(043)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Marilene e Roberto, cujas mãos calejadas da lida na roça e das madrugadas na feira abriram, com esforço e sacrifício, o caminho que me permitiu seguir com as mãos limpas e o sono tranquilo que tantas vezes lhes foi negado. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

À Deus e minha nossa senhora que me cobre com seu manto sagrado e mantem firme, sempre forte e ajudou por meio de minhas orações a superar os momentos difíceis e a lutar pelos meus sonhos.

À minha família, em especial à minha mãe Marilene Pedro da Silva Cruz e ao meu pai Roberto Genuíno Pereira da Cruz, foram meus maiores incentivadores dos meus estudos, a conquista foi por vocês.

À minha esposa Hellen Karoline da Silva Barbosa, que fez e faz tudo para me manter focado sempre em busca do objetivo maior, sou grato pela parceria e aconchego nos dias piores, muito obrigado.

Às minhas irmãs que sempre se fazem presente na minha vida acadêmica e pessoal que me inspiram a trilhar caminhos maiores e melhores.

Ao Professor Dr. Kepler Borges França, meu orientador, chefe e amigo, por toda confiança, amizade e humildade em transmitir o seu conhecimento, contribuindo para o meu enriquecimento pessoal e profissional.

A todos os amigos do LABDES-UFCG em especial à Kelly por me acolher de braços abertos, pela acolhida durante toda minha jornada e ajuda em todos os momentos. E a Welber, parceiro de longas datas, obrigado grande amigo.

Ao Laboratório de referência em Dessalinização (LABDES) pela estrutura fornecida.

Aos meus amigos, em especial ao grupo ação missionária e aos meus amigos de ensino médio, que estiveram do meu lado todo esse tempo, me apoiando e incentivando.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado durante os 2 anos da pesquisa.

“Faça o teu melhor na condição que
você tem, enquanto você não tem
condições melhores para fazer melhor
ainda.”

Mario Sergio Cortela

RESUMO

Atualmente, a presença de microplásticos nos ambientes aquáticos, como rios, mares e oceanos, tem se tornado uma questão ambiental urgente, com impactos significativos na biodiversidade e na saúde pública. A crescente percepção da importância de remover esses poluentes reforça a necessidade de desenvolver tecnologias eficazes e acessíveis para tratar as águas contaminadas. A relevância desta abordagem está no seu potencial de contribuição para a proteção dos ecossistemas aquáticos, promoção da saúde pública e avanço em tecnologias de purificação de água, oferecendo uma solução promissora e inovadora para um problema ambiental global crescente. O objetivo do presente trabalho é estudar o desempenho de um sistema híbrido composto com um hidrociclone/membrana polimérica para fins de separação do microplástico no meio aquoso. A metodologia deste trabalho foi realizada em 3(três) etapas: Etapa (1) montagem do sistema híbrido para remoção do microplástico, etapa (2) visou a caracterização do hidrociclone com água tratada da companhia do estado da Paraíba, etapa (3) considerando parâmetros físico-químicos como cor, turbidez e índice de densidade de sujeira (SDI). A terceira etapa envolveu os experimentos, nos quais foram analisadas a quantificação e a concentração de microplásticos (MPs), além de parâmetros como fração recuperada, eficiência total do hidrociclone e do filtro de areia, e recuperação da membrana. Na fase final, avaliou-se a influência da variação dos MPs – PVC, acrílico e a mistura de PE + acrílico + PVC –, destacando a densidade como um parâmetro fundamental na análise da eficiência do sistema. No decorrer do experimento o melhor desempenho do sistema ocorreu sob 1,5 bar, com 28,57% de recuperação e uma vazão do permeado de 17,00 L/min, nos experimentos, o Índice de Densidade de Sedimentos (SDI) diminuiu após o tratamento. Os resultados da filtração com filtro de areia e permeado mostraram significativa remoção de microplásticos, com redução notável na cor e turbidez ao final do processo. Para a última fase a separação do PVC foi a mais consistente ao longo do tempo, com maior recuperação no overflow, enquanto o acrílico apresentou aumento progressivo na separação até 20 minutos de operação. Já a mistura de PE, AC e PVC mostrou comportamento instável, possivelmente devido à interação entre polímeros de diferentes densidades, exigindo maior controle operacional. A membrana de microfiltração se destacou como etapa essencial, complementando o hidrociclone e o filtro de areia para uma remoção eficiente. Os resultados indicam que a densidade e a granulometria influenciam diretamente a eficiência do processo, sendo o PVC mais facilmente removido na etapa inicial, enquanto o PE e o AC permaneceram mais tempo no sistema. A mistura dos materiais proporcionou melhor desempenho geral, evidenciando a importância de um tratamento híbrido que combine diferentes tecnologias para otimizar a remoção de microplásticos.

Palavras-chave: Microplásticos; Sistema híbrido; Separação do microplástico.

ABSTRACT

Currently, the presence of microplastics in aquatic environments, such as rivers, seas, and oceans, has become an urgent environmental issue, with significant impacts on biodiversity and public health. The growing awareness of the importance of removing these pollutants reinforces the need to develop effective and accessible technologies for treating contaminated water. The relevance of this approach lies in its potential contribution to protecting aquatic ecosystems, promoting public health, and advancing water purification technologies, offering a promising and innovative solution to a growing global environmental problem. The objective of this study is to evaluate the performance of a hybrid system composed of a hydrocyclone/polymeric membrane for the separation of microplastics in aqueous media. The methodology was conducted in three (3) stages: Stage (1) involved assembling the hybrid system for microplastic removal; Stage (2) focused on characterizing the hydrocyclone using treated water from the state company of Paraíba; and Stage (3) considered physicochemical parameters such as color, turbidity, and the Silt Density Index (SDI). The third stage involved experiments in which the quantification and concentration of microplastics (MPs) were analyzed, along with parameters such as recovered fraction, total efficiency of the hydrocyclone and sand filter, and membrane recovery. In the final phase, the influence of MP variation—including PVC, acrylic, and a mixture of PE + acrylic + PVC—was evaluated, highlighting density as a fundamental parameter in analyzing system efficiency. Throughout the experiment, the best system performance was observed at 1.5 bar, with a 28.57% recovery rate and a permeate flow rate of 17.00 L/min. The Silt Density Index (SDI) decreased after treatment. The results of filtration with the sand filter and permeate showed significant microplastic removal, with notable reductions in color and turbidity at the end of the process. In the final phase, PVC separation was the most consistent over time, with the highest recovery in the overflow, while acrylic showed a progressive increase in separation up to 20 minutes of operation. Meanwhile, the PE, AC, and PVC mixture exhibited unstable behavior, possibly due to interactions between polymers of different densities, requiring greater operational control. The microfiltration membrane proved to be an essential step, complementing the hydrocyclone and sand filter for efficient removal. The results indicate that density and particle size directly influence process efficiency, with PVC being more easily removed in the initial stage, while PE and AC remained in the system for a longer period. The combination of materials provided better overall performance, highlighting the importance of a hybrid treatment that integrates different technologies to optimize microplastic removal.

Keywords: Microplastic; Hybrid system; Microplastic removal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2.1. - Esquema do Hidrociclone	24
Figura 2.2.2. - Representação das linhas das correntes ascendentes e descendentes do hidrociclone	25
Figura 2.4.1 - Funcionamento de uma membrana	29
Figura 2.4.2 - Esquema de funcionamento do SDI	31
Figura 3.1.1. - Fluxograma do processo hídrociclone/membrana	33
Figura 3.1.2.- Partes do Hidrociclone	34
Figura 3.1.3 - Representação do sistema híbrido	34
Figura 3.1.4 - Fluxograma do experimento 1	37
Figura 3.1.5 - Fluxograma do experimento 2, 3 e 4	38
Figura 4.2.1. - SDI em função da pressão do experimento 1	40
Figura 4.2.2 - SDI da pressão de operação do experimento 2	41
Figura 4.3.1- Comportamento da Cor em função do tempo no experimento 1, sob a pressão de 0,5 bar	42
Figura 4.3.2 - Comportamento da Cor em função do tempo no experimento 1, sob a pressão de 1,0 bar	42
Figura 4.3.31 - Comportamento da Cor em função do tempo no experimento 1, sob à pressão de 1,5 bar	43
Figura 4.3.4 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 1, sob à pressão de 0,5 bar	43
Figura 4.3.5 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 1, sob à pressão de 1,0 bar	43
Figura 4.3.6 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 1, sob à pressão de 1,5 bar	44

Figura 4.3.7 - Comportamento da cor em função do tempo no experimento 2, sob à pressão de 0,5 bar _____	45
Figura 4.3.82 - Comportamento da cor em função do tempo no experimento 2, sob à pressão de 1,0 bar _____	45
Figura 4.3.9 - Comportamento da cor em função do tempo no experimento 2, sob à pressão de 1,5 bar _____	46
Figura 4.3.10 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 2, sob à pressão de 0,5 bar _____	46
Figura 4.3.11 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 2, sob a pressão de 1,0 bar _____	47
Figura 4.3.12 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 2, sob a pressão de 1,5 bar _____	47
Figura 4.4.1 - Variação da concentração com o tempo, sob à pressão de 0,5 bar _____	48
Figura 4.4.2 - Variação da concentração em função do tempo, sob à pressão de 1,0 bar _____	49
Figura 4.4.3 - Variação da concentração em função do tempo, sob à pressão de 1,5 bar _____	49
Figura 4.4.4 - Variação da concentração em função do tempo, sob à pressão de 2,0 bar _____	49
Figura 4.4.5 -Variação da fração recuperada em função do tempo, sob à pressão 0,5 bar _____	50
Figura 4.4.6 - Variação da fração recuperada em função do tempo, sob à pressão de 1,0 bar _____	51
Figura 4.4.7 - Variação da fração recuperada em função do tempo, sob à pressão de 1,5 bar _____	51
Figura 4.4.8 - Variação da fração recuperada em função do tempo, sob à pressão de 2,0 bar _____	52
Figura 4.4.9 - Eficiência do filtro de areia com o tempo _____	53
Figura 4.5.2. - Variação da concentração do microplástico do acrílico em função do tempo sob à pressão de 1,5 bar para cada ponto de tratamento do sistema _____	55

Figura 4.5.3.- Variação da concentração do microplástico do PVC em função do tempo sob à pressão de 1,5 bar para cada ponto de tratamento do sistema _____55

Figura 4.5.4.- Variações das concentrações da mistura dos microplásticos (PE, AC e PVC) no meio aquoso em função do tempo sob à pressão de 1,5 bar para cada ponto de tratamento do sistema_____ 56

Figura 4.5.8. – Eficiência do filtro de areia com o tempo_____58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1. -Relações geométricas das famílias de hidrociclones _____	22
Tabela 3.1.1 - Experimentos: concentrações e pressões _____	35
Tabela 4.1.1. - Parâmetros avaliados no hidrociclone _____	38
Tabela 1.1.2. - Parâmetros avaliados no filtro e na membrana _____	38
Tabela 4.4. – Recuperação na membrana _____	55
Tabela 4.5. – Valores de densidade dos materiais _____	55
Tabela 4.6. – Recuperação da membrana _____	62

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AC	Polimetacrílate de metila
Cmp	Concentração
D_a	Diâmetro da alimentação
D_o	Diâmetro do <i>overflow</i>
D_u	Diâmetro da <i>underflow</i>
ETA	Estação de tratamento de águas
ETE	Estação de tratamento de esgoto
F.A.	Filtro de Areia
FRM_{over}	Fração Recuperada over
FRM_{under}	Fração Recuperada under
H.C.	Hidrociclone
k	Condutividade elétrica (mS/cm)
MF	Microfiltração
MP	Microplástico
O.I	Osmose Inversa
OF	Overflow
PA	Poliamída
PA	Fonapoliamida
P_a	Pressão de entrada (Bar)
PE	Polietileno
PEL	Poliestireno
P_{em}	Pressão de entrada da membrana (Bar)
P_{em}	Pressão do concentrado (Bar)
PES	Polietersulfato
ES	Polietersul
pH	Potencial hidrogeniônico
P_o	Pressão do overflow (Bar)

PP	Polipropileno
PP	Polipropileno
P_s	Pressão de saída do filtro (Bar)
P_u	Pressão do Underflow (Bar)
PVC	Policloreto de vinila
Q_a	Vazão da alimentação do hidrociclone (L/min)
Q_c	Vazão do concentrado (L/min)
Q_o	Vazão do <i>Overflow</i> (L/min)
Q_p	Vazão do permeado (L/min)
Q_u	Vazão do <i>Underflow</i> (L/min)
R(%)	Recuperação do hidrociclone
T	Temperatura (°C)
Tur_c	Turbidez do concentrado (NTU)
Tur_p	Turbidez do permeado (NTU)
UF	Underflow
UF	Ultrafiltração
UV	Radiação ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
μS/cm	Mili Siemens por centímetro
mS/cm	Micro Siemens por sentimento
kgf/cm²	Quilograma força por centímetro quadrado
L/h	Litro por hora
NTU	Unidade de Turbidez Nefelométrica
g/L	Grama por litro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	20
2.1. MICROPLÁSTICO UM PROBLEMA DA ATUALIDADE.....	20
3.1.1. Tipos de microplásticos	21
2.2. HIDROCICLONES	23
2.3. SISTEMAS DE PRÉ TRAMENTO E FILTRO DE AREIA	27
2.4. MEMBRANAS POLIMÉRICAS	28
2.5. PRINCIPAIS PARÂMETROS FÍSICO QUÍMICOS	30
2.6. DENSIDADE	32
3. MATERIAIS E METODOS.....	33
4. RESULTADOS E DISCURSÕES	39
4.1. VARIAÇÃO DAS VAZÕES E VELOCIDADES COM A PRESSÃO DE OPERAÇÃO	39
4.2. ÍNDICE DE DENSIDADE DE SEDIMENTOS (SDI).....	40
4.3 EXPERIMENTOS.....	41
4.4 EXPERIMENTO 3	48
4.4.1 Concentração	48
4.4.2 Fração recuperada no hidrociclone.....	50
4.4.3. Eficiência do filtro de areia.....	52
4.4.5. Recuperação na membrana de microfiltração	53
4.5. EXPERIMENTO 4.....	54
4.5.1. Densidade.....	54
4.5.2. Concentração do microplástico no meio aquoso	55
4.5.3. Fração recuperada do hidrociclone.....	57
4.5.4. Eficiência do filtro de areia	58
4.5.5. Recuperação na membrana de microfiltração	59
6. CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	63
ANEXO A	66
BOLETIM TÉCNICO DA MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO	66

ANEXO B.....	69
BOLITIN TECNICO DAS BOMBAS CENTRIFUGA USADAS NO SISTEMA.....	69
Características Técnicas.....	70
Características Técnicas.....	71
ANEXO C	72
DIMENSÕES DO HIDROCICLONE.....	72
ANEXO D	74
BOLETIN TÉCNICO DO FILTRO DE AREIA	74
ANEXO E.....	76
ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO	76
APÊNDICE	79
APÊNDICE A - Analises de cor, turbidez, pH/T°C e condutividade elétrica (k) da 1º, 2º e 3º batelada, do experimento 1, realizado no sistema hibrido.....	80
APÊNDICE B - Analises de cor, turbidez, pH/T°C e condutividade elétrica (k) da 4º, 5º e 6º batelada, do experimento 2, realizado no sistema hibrido.	83
APÊNDICE C – FRAÇÃO RECUPERADA NO HIDROCICLONE	86
APÊNDICE D – EFICIÊNCIA TOTAL DO HIDROCICLONE.....	88

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma grande questão em torno do microplásticos presente nos meios aquosos (rios, mares e oceanos), a sua presença se torna cada vez mais perceptível. Estudos a cerca deste tema e sua remoção vem sendo um marco importante para futuro da vida aquática e biodiversidade do planeta.

As Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), embora eficientes na remoção de poluentes tradicionais, apresentam limitações significativas na remoção de microplásticos (MP). Esses sistemas convencionais não são projetados para filtrar partículas de tamanhos tão pequenos, como os microplásticos, que podem ter dimensões inferiores a 5 mm.

Além disso, a densidade e composição dos MPs, muitas vezes derivadas de polímeros sintéticos, permitem que eles passem pelas barreiras de filtração tradicionais ou se acumulem no lodo, retornando ao meio ambiente através de descargas de efluentes, representando um desafio crescente para a sustentabilidade ambiental.

Dessa forma, a pergunta que se faz é: como tratar e reaproveitar as águas poluídas pelo microplástico?

Dentro desse contexto, tecnologias promissoras podem vir a agregar nos estudos de remoção de microplástico nos efluentes. Dentre elas a que vem se destacando é o processo de separação de materiais em águas, são as membranas poliméricas, por apresentar uma elevada taxa de rejeição em termos de microrganismos e de compostos orgânicos e inorgânicos (QUEIROZ, F.R.; 2107, p.28).

A presença de microplásticos nos ambientes aquáticos, como rios, mares e oceanos tem-se tornado uma questão ambiental significativa. A poluição plástica é atualmente um problema de grande relevância sob o ponto de vista ambiental e socioeconômico, consequência principalmente da má gestão dos resíduos sólidos, dentre outros fatores. Uma ramificação da questão é dada pela poluição causada por plásticos cujos tamanhos estejam nas escalas micrométrica e milimétrica (MONTAGNER C. C, et al; 2021, p 2).

Uma quantidade relevante de partículas é hoje lançada todos os dias em corpos hídricos e no oceano, no mundo todo. Com o objetivo de mitigar os impactos causados pelos MPs, é necessária a revisão dos processos de fabricação desses materiais e dos tratamentos utilizados atualmente nas ETARs, para que estes contaminantes sejam incluídos nas metas de remoção e em futuras regulamentações. A separação do MP é, portanto, essencial para a preservação e, também, para população que necessita desses recursos híbridos.

A separação de MPs ajuda a proteger a vida aquática, reduzindo a poluição e promoverá saúde dos ecossistemas, contribuindo para a sustentabilidade e a preservação da biodiversidade. O poluente pode entrar na cadeia alimentar de animais aquáticos e, eventualmente afetar à saúde humana, a remoção do contaminante nas águas é essencial para proteger a saúde pública.

Dessa forma, o desenvolvimento de um sistema híbrido para redução eficiente de MPs, apresenta um avanço tecnológico significativo, visto que estudos sobre a remoção do poluente ainda são escassos e este projeto deve abrir o caminho para novas pesquisas e inovações em tecnologias de purificação de água.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema híbrido e estudar o desempenho na remoção de microplásticos em meio aquoso, avaliando a eficiência do sistema sob diferentes pressões de operação, com a melhor pressão estudada investigar a influência de distintos microplásticos e suas densidades no processo.

Além das seguintes metas: caracterizar o hidrociclone e a membrana polimérica com água da rede pública; Realizar experimentos com o sistema sob as pressões pré-determinadas da caracterização variando a concentração do microplástico no meio aquoso e averiguar a qualidade em termos de cor, turbidez e índice de densidade de sedimentos ; Estudar o desempenho do sistema com soluções de 1,0g/L de microplástico no meio aquoso sob diferentes pressões de operação; Fazer um estudo em função da concentração do microplástico nas etapas do sistema híbrido;

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. MICROPLÁSTICO UM PROBLEMA DA ATUALIDADE

O material plástico ganhou espaço em vários ramos, desde a virada do século. Apesar de políticas públicas que veem soluções para a diminuição da emissão do microplásticos em mares, rios e lagos. Ainda há um vigente problema desse material dentro das nossas águas. Plásticos, trata-se de matérias polímeros sintéticos produzidos a partir de matérias-primas específicas que combinadas proporcionam propriedades físicas e químicas específicas, formando para serem rígidos ou flexíveis, apresentando alta plasticidade (PEREIRA, 2022).

Com o desenvolvimento dos matéria, a indústria petroquímica se desenvolveu em novas tecnologias que permitiu a fabricação de plásticos em grande escala. No Brasil, a produção de plásticos a partir de petróleo cresceu significativamente nas últimas décadas, impulsionada por grandes empresas petroquímicas. No entanto, o uso extensivo desses plásticos tem gerado uma grande quantidade de resíduos, contribuindo para o problema dos microplásticos no meio ambiente.

A presença de MP no meio aquoso tem despertado preocupações ambientais e de saúde pública. COSTA et al. (2018), destacam a contaminação por microplásticos em diversos rios e lagos, afetando a fauna aquática e potencialmente entrando na cadeia alimentar humana.

Em resposta a esse problema crescente, o Ministério do Meio Ambiente lançou o Programa Nacional de Combate ao Lixo no Mar, que visa reduzir a quantidade de resíduos plásticos que chegam aos oceanos através de medidas de gestão, prevenção e educação ambiental.

Em relação a classificação dos microplásticos, alguns termoplásticos como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PEL), policloreto de vinila (PVC) e o politereftalato de etileno (PET) (PEREIRA, 2022), podendo destacar também o polimetacrilato de metila - acrílico (AC). Os termorrígidos ou termofixos, não pode ser remoldados ou reaquecidos, tendo a garantia do rompimento das ligações, isto é, quebra que resulta na degradação de suas propriedades FRANÇA, (2010). Todavia devido as

diversas vantagens os termoplásticos estão sendo comumente utilizados no mundo, atualmente.

A expectativa futura acerca do supracitado, até 2050, cerca de 12 bilhões de toneladas de resíduos plásticos podem ser lançados em aterros ou no meio ambiente, de acordo com dados de tendencia global para curva de produção de plásticos GEYER et al, (2017).

Muito já se discutiu sobre a preocupação com os plásticos no meio ambiente. Essa matéria-prima é conhecida por sua resistência química e física, o que a torna menos propensa à degradação em comparação com materiais como matéria orgânica e papel. Isso faz com que os plásticos persistam por períodos prolongados após serem expostos ao ambiente.

3.1.1. Tipos de microplásticos

Os microplásticos representam um desafio ambiental significativo devido à sua persistência nos ecossistemas aquáticos, influenciada por uma variedade de fatores bióticos e abióticos. Entre os fatores abióticos, a radiação ultravioleta (UV) desempenha um papel crucial na degradação superficial dos plásticos ao expô-los à luz solar, promovendo sua fragmentação em partículas menores. Além disso, a hidrólise, processo químico de quebra dos polímeros em contato com a água, também contribui para a redução do tamanho e da integridade dos microplásticos ao longo do tempo. Esses processos abióticos são fundamentais para entender como os microplásticos se comportam nos ambientes aquáticos, influenciando sua distribuição, transporte e impactos potenciais sobre a vida marinha.

No contexto brasileiro, estudos como o de OLIVEIRA-CASTRO et al. (2018) são essenciais para compreender as dinâmicas de degradação de microplásticos. A pesquisa examinou os efeitos específicos da radiação UV e da hidrólise em ambientes aquáticos do Brasil, fornecendo *insights* valiosos sobre as condições ambientais locais que podem acelerar ou retardar o processo de degradação desses materiais. Esses achados não apenas contribuem para o entendimento científico dos MPs, mas também têm implicações importantes para o desenvolvimento de estratégias de gestão ambiental e conservação dos ecossistemas aquáticos no país.

Os MPs constituem-se em partículas plásticas em escala menor do que 5,0 mm e podem ter origem em processos de fonte primária e secundária como classificados: os microplásticos primários são manufaturados em escala de 5,0 mm para atenderem a um fim direto, e em sua maioria adicionados a produtos a serem comercializados (PEREIRA, 2022).

Uma das fontes de microplásticos primários é a geração de resíduos durante o processo de manufatura, por meio de perdas durante manuseio e manufatura, já o microplástico secundário é produzido através da degradação ou decomposição de plásticos de maiores dimensões, sejam de subprodutos descartados na produção em indústria de plástico.

A contaminação por microplásticos ocorre de diversas formas nos mais variados ambientes, incluindo os terrestres, aquáticos e atmosféricos. Nos ambientes terrestres, a presença de MPs é frequentemente atribuída à aplicação de lodo de esgoto em terras agrícolas, que contém partículas plásticas derivadas de produtos de higiene pessoal e de processos industriais. Esses MPs podem ser transportados pela água da chuva para corpos d'água próximos, ampliando ainda mais a contaminação ambiental (CORRADINI et al., 2019).

Nos ambientes aquáticos, os MPs podem ser originados diretamente do descarte inadequado de resíduos plásticos ou pela degradação de plásticos maiores devido à exposição a fatores abióticos, como a radiação ultravioleta e a ação mecânica das ondas. Estudos mostram que partículas plásticas podem ser transportadas pelo ar e depositadas em locais distantes de suas fontes originais, inclusive em áreas remotas e nos oceanos. A atmosfera, portanto, atua como um vetor de dispersão de MPs, conectando diferentes ecossistemas e aumentando a abrangência da contaminação (BROWNE et al., 2011).

Uma passagem de MPs na cadeia alimentar pode ser provocada, e apesar dos efeitos à saúde humana ainda serem desconhecidos, o conteúdo dos resíduos como corantes e estabilizantes utilizados em sua produção podem refletir em impactos negativos à saúde (PEREIRA, 2022).

Os MPs são ingeridos por organismos aquáticos, como peixes e moluscos, e assim entram na cadeia alimentar. Estudos têm mostrado que esses plásticos podem acumular-se em organismos marinhos e, eventualmente, serem consumidos por humanos através da alimentação de frutos do mar. A presença de microplásticos em produtos de

consumo humano levanta questões sobre os riscos potenciais à saúde, embora os efeitos ainda não sejam totalmente compreendidos, já foram encontrados MP em todo corpo humano, inclusive na corrente sanguínea e no cérebro (GALLOWAY et al., 2017).

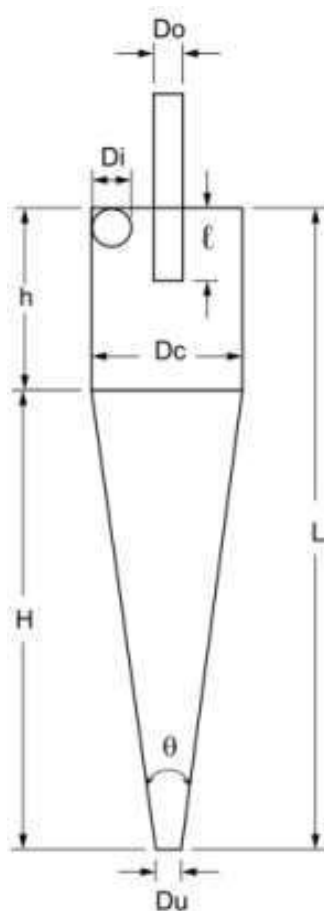
Além do próprio material plástico, os MPs frequentemente contêm aditivos químicos, como corantes, estabilizantes e plastificantes, que são incorporados durante o processo de fabricação. Esses aditivos podem incluir substâncias tóxicas que, uma vez liberadas no organismo, podem causar danos à saúde. A exposição a esses compostos pode levar a uma série de problemas de saúde, incluindo distúrbios endócrinos, efeitos neurotóxicos e outras condições adversas. Portanto, a presença de microplásticos e seus aditivos na cadeia alimentar é uma questão de preocupação significativa, destacando a necessidade de mais pesquisas para entender plenamente seus impactos na saúde humana (ROCHMAN et al., 2013).

Segundo Vagas, J. G. M., et al, (2022) Uma busca na base de dados “sciencedirect” utilizando a palavra “microplastic” mostra que na última década o número de pesquisas envolvendo esse tópico vêm crescendo de forma rápida e exponencial. Vários tratamentos podem ser verificados na literatura, exemplo ETAR, a remoção por processos de filtração e separação, utilizando filtros que permitem a retenção e passagem, tratamentos químicos, agregação por microrganismos e degradação térmica.

2.2. HIDROCICLONES

Os hidrociclones são geralmente uma operação unitária das várias engenharias; tais como: engenharia de minas, engenharia mecânica, engenharia química, engenharia agrícola, entre outras; para separação de inúmeros componentes presentes em fases sólidas, líquidas e gasosas.

O princípio de funcionamento do hidrociclone baseia-se na diferença de densidades entre as fases envolvidas no processo e separadas por uma interface, geralmente líquido-sólido. Os hidrociclones são dispositivos de separação que utilizam a força centrífuga, força peso, força de arraste e força centrípeta para separar partículas sólidas suspensas em um líquido. A Tabela 1 e a figura 2.2.1 indica as dimensões ou relações das diferentes famílias de hidrociclones.

Figura 2.2.1. - Esquema do Hidrociclone

D_c – Diâmetro cilíndrico

D_i – Diâmetro do duto de alimentação

D_o – Diâmetro do duto do Overflow

D_u – Diâmetro do duto do Underflow

L – Comprimento total

H – Comprimento da sessão cilíndrica

l – Comprimento do vórtex finder

θ - Ângulo do tronco do cone

Tabela 2.2.1.-Relações geométricas das famílias de hidrociclones (Fonte: Kyriakidis, 2018)

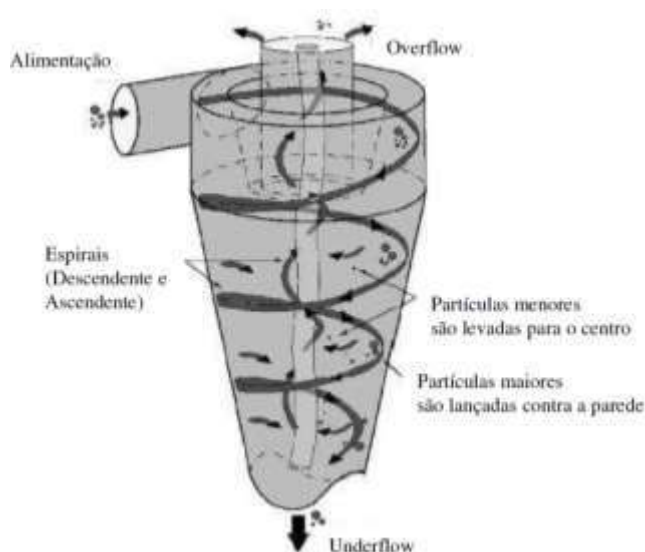
Família	Razões entre variáveis geométricas				
	D_i/D_c	D_o/D_c	D_u/D_c	L/D_c	θ
Rietema	0,28	0,34	0,40	5,00	20°
Bradley	0,13	0,20	0,33	6,85	9°
Mozley	0,15	0,21	0,57	7,43	6°
Waman	0,29	0,20	0,31	4,00	15°
Demco	0,22	0,50	1,00	4,70	25°

As famílias dos hidrociclones são definidas usando as dimensões delimitadas pelas relações geométricas entre as principais dimensões do hidrociclone e o diâmetro da parte cilíndrica (D_c). Essa proporcionalidade entre as variáveis de construção do equipamento pode ser associada ao desempenho do mesmo, relacionando-o a um

hidrociclone com alta capacidade e/ou poder de classificação no processo de separação (PERREIRA, 2022).

Quando a mistura é alimentada tangencialmente no hidrociclone, cria-se um vórtice, fazendo com que as partículas mais densas sejam forçadas para as paredes do equipamento e se desloquem para o *underflow*. Ao mesmo tempo, as partículas menos densas, se movem para o centro e é descarregado pela saída superior como ou *overflow*, como pode ser observado na Figura 2.2.2.

Figura 2.2.2. - Representação das linhas das correntes ascendentes e descendentes do hidrociclone



Fonte: Cullivan et al. (2003).

Na parte superior do hidrociclone está posicionada uma saída para a suspensão diluída, chamada de overflow, e na parte inferior há uma saída de suspensão concentrada chamada de underflow. O mecanismo de separação é o mesmo das centrífugas, realizado pela sedimentação centrífuga, onde partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca a separação do fluido. Quando um hidrociclone é alimentado tangencialmente com uma suspensão sólido-líquida, líquida-líquida ou sólido-gasoso, ocorre a formação de um vórtice descendente dentro do equipamento. Isso faz com que as partículas de maior densidade sejam projetadas contra a parede e levadas até a saída inferior (underflow) para serem expelidas, e as partículas de menor densidade são arrastadas para o centro do equipamento formando um vórtice ascendente saindo pela saída superior (overflow) CRUZ, (2010).

A eficiência do processo de separação depende de vários fatores, incluindo a pressão de alimentação, a velocidade de entrada, e as características físicas do material a ser separado. A correta configuração e operação do hidrociclone são essenciais para garantir uma separação eficaz, minimizando perdas e maximizando a qualidade do produto (LIMA, 2016).

Os hidrociclones em geral, difere dos outros processos pelo baixo custo e a não presença de partes moveis, elevada capacidade de produção e de processamento de altos volumes.

- **Velocidade de alimentação do hidrociclone**

A velocidade de entrada do hidrociclone desempenha um papel crucial na eficiência da remoção de partículas durante processos de separação em meio aquoso. A taxa de remoção das partículas está diretamente ligada à velocidade a entrada do equipamento, que influencia diretamente na formação do vórtice interno e na separação das partículas com diferentes densidades e tamanhos. Velocidades mais altas geralmente resultam em maior força centrífuga dentro do hidrociclone, o que pode aumentar a eficácia na separação das partículas mais pesadas no underflow e das partículas mais leves no overflow (PEREIRA, 2022).

A relação entre a velocidade de entrada e a taxa de remoção é complexa e depende de vários fatores, incluindo o tamanho e a densidade das partículas, o diâmetro do hidrociclone e o gradiente de pressão aplicado. Estudos têm demonstrado que ajustes na velocidade de entrada podem otimizar significativamente a eficiência de separação do hidrociclone, como microplásticos, em sistemas híbridos combinados com membranas de microfiltração (FRANÇA, K. B.; 2015).

Um aspecto fundamental para o entendimento e a otimização do desempenho de hidrociclones é a vazão os diferentes pontos de operação, especificamente na alimentação, no underflow (descarga inferior) e no overflow (descarga superior). A vazão é um parâmetro crucial, pois afeta diretamente a eficiência de separação e o comportamento hidrodinâmico dentro do equipamento.

A velocidade em cada seção do hidrociclone pode ser determinada utilizando a relação entre a vazão volumétrica do fluido e a área transversal da seção considerada. Assim, temos a seguindo-se à equação:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Onde; v representa a velocidade, Q a vazão volumétrica, e A é a área transversal correspondente.

Esses cálculos são essenciais para a análise do comportamento do fluido dentro do hidrociclone e para a otimização dos parâmetros operacionais – Alimentação do hidrociclone, overflow e underflow – buscando maximizar a eficiência de separação e minimizar as perdas de material valioso. A compreensão clara das velocidades em cada seção permite ajustes precisos nas condições de operação, garantindo que o hidrociclone opere de maneira eficaz e consistente.

- **Fração de Massa Recuperada (FRM)**

Hashmi *et al.* (2004) apresentam em seu trabalho o cálculo da FRM considerando a separação água-óleo estudada, em se tratando da separação líquido-sólido (água-microplástico) pode-se utilizar da Equações 2 e 3 para cálculo da FRM do *overflow* e *underflow*, respectivamente.

$$FRM_{over} = \left(1 - \frac{C_{under} Q_{under}}{C_a Q_a}\right) \cdot 100 \quad (2)$$

$$FRM_{over} = \left(1 - \frac{C_{under} Q_{under}}{C_a Q_a}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde C_{under} e Q_{under} são a concentração e vazão do *underflow*, C_{over} e Q_{over} são a concentração e vazão no *overflow* e C_a e Q_a são a concentração e vazão na alimentação.

2.3. SISTEMAS DE PRÉ TRATAMENTO E FILTRO DE AREIA

Os pré-tratamentos são etapas cruciais em processos de purificação e separação, especialmente quando se lida com sistemas híbridos como hidrociclones e membranas de microfiltração. Segundo França (2020), a eficiência dos sistemas de tratamento de água pode ser significativamente melhorada com a adoção de pré-tratamentos adequados, que garantem a longevidade e a eficácia dos processos subsequentes, em especial em processo de membranas poliméricas.

No que diz respeito ao pré-tratamento via filtro antes do hidrociclone pode melhorar a eficiência de separação ao remover partículas maiores que, de outra forma, poderiam sobrecarregar o sistema. Isso reduz o desgaste do equipamento e permite que o

hidrociclone se concentre na separação de partículas menores e mais densas. Além disso, o filtro estabiliza a carga de sólidos que chega ao hidrociclone, evitando entupimentos e flutuações que prejudicariam a operação contínua, garantindo um desempenho mais eficiente e confiável.

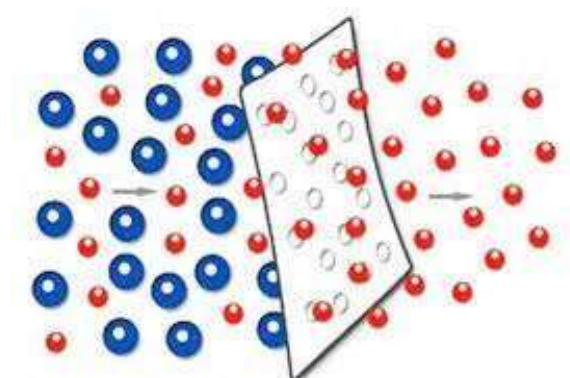
Este processo inicial é fundamental para evitar que grandes partículas entrem nos estágios subsequentes e causem obstruções ou danos mecânicos (SILVA et al., 2018). A filtração de areia envolve a passagem da água através de um leito de areia que retém partículas finas e sólidos em suspensão. Este método é eficaz na remoção de partículas maiores, reduzindo a carga de sólidos que chega aos estágios seguintes do tratamento.

Os pré-tratamentos são essenciais para garantir a eficiência e a durabilidade dos processos de separação e purificação subsequentes, como as membranas poliméricas, ao reduzir a carga de sólidos e outros contaminantes, eles previnem entupimentos e outros danos em membranas de microfiltração. Além disso, um pré-tratamento adequado pode melhorar a qualidade final da água tratada, tornando-a adequada para aplicações específicas, como irrigação ou consumo humano (Ministério do Meio Ambiente, 2023). Portanto, a implementação de pré-tratamentos adequados é um passo fundamental para assegurar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas de purificação de água.

2.4. MEMBRANAS POLIMÉRICAS

As membranas poliméricas são definidas como barreiras que separam duas fases, permitindo a passagem seletiva de espécies, como ilustrado na Figura 2.4.1. Elas desempenham um papel crucial em diversos processos de separação e purificação, sendo amplamente utilizadas em aplicações industriais, ambientais e de tratamento de água. A seletividade das membranas permite a remoção eficaz de partículas, contaminantes e microplásticos, garantindo a qualidade da água tratada, a figura abaixo mostra o funcionamento básico de uma membrana.

Figura 2.4.1 - Funcionamento de uma membrana



Fonte: Membranas-polimericas.pdf

A eficiência das membranas poliméricas depende de suas propriedades estruturais e químicas. Elas são fabricadas a partir de polímeros sintéticos, como polietersulfona (PES), poliamida (PA) e polipropileno (PP), que conferem características específicas, como resistência química, estabilidade térmica e durabilidade mecânica (SILVA et al., 2020). Esses materiais são escolhidos com base nas condições operacionais e nos tipos de contaminantes a serem removidos.

As membranas poliméricas são classificadas de acordo com o tamanho dos poros e o mecanismo de separação. As principais categorias incluem microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. A microfiltração e a ultrafiltração são particularmente eficazes na remoção de partículas suspensas e microplásticos, enquanto a nanofiltração e a osmose reversa são utilizadas para remover solutos dissolvidos, como sais e metais pesados (FRANÇA, 2020).

O uso de membranas poliméricas em combinação com hidrociclones é uma abordagem promissora para a remoção de microplásticos de águas residuais. Os hidrociclones realizam a separação inicial de partículas maiores ou pré-tratamentos, reduzindo a carga sobre as membranas e prolongando sua vida útil. Essa combinação, conhecida como sistema híbrido, melhora a eficiência do tratamento e reduz os custos operacionais (Ministério do Meio Ambiente, 2023).

- **Recuperação na membrana polimérica**

A recuperação em uma membrana polimérica é definida como a fração volumétrica do fluxo de alimentação que é convertida em permeado, sendo expressa em porcentagem. Pode ser calculada pela Equação 6.

$$R(\%) = \left(\frac{Q_P}{Q_A} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde Q_P é a vazão do permeado e Q_A é a vazão na alimentação da membrana. Esse parâmetro é crucial na caracterização do desempenho da membrana, pois indica a eficiência do processo de separação e filtração.

2.5. PRINCIPAIS PARÂMETROS FÍSICO QUÍMICOS

- **Cor**

A cor da água é analisada sem remover as partículas em suspensão nela presentes, o que faz com que a turbidez influencie sua aparência. A presença de sedimentos ou materiais orgânicos pode alterar significativamente a coloração da água. Assim, a cor aparente não resulta apenas da interação da luz com a água pura, mas também da interação com as impurezas presentes.

A água pura, sem impurezas, tende a parecer incolor a olho nu. Entretanto, em grandes corpos d'água como oceanos, lagos e rios, vários fatores podem alterar sua aparência. De acordo com a Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde, o limite máximo permitido para a cor em amostras de água é de 15 mg Pt-Co/L (Springer).

- **Turbidez**

A turbidez da água é uma medida crucial que avalia a claridade ou transparência de uma amostra, indicando o grau de partículas em suspensão presentes. Essas partículas podem variar desde sedimentos minerais até matéria orgânica e microrganismos, todos os quais dispersam a luz incidente e contribuem para a opacidade da água. A turbidez não apenas afeta a estética visual da água, mas também desempenha um papel crítico em vários aspectos ambientais e de saúde pública. Por exemplo, altos níveis de turbidez podem reduzir a penetração da luz solar na coluna d'água, afetando a fotossíntese e a produção primária dos ecossistemas aquáticos (BARTZOKAS et al., 2012).

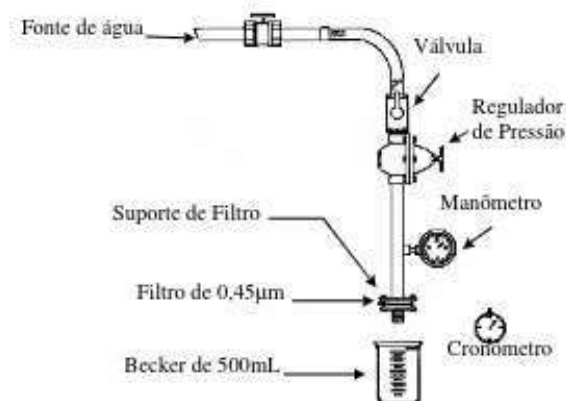
Além disso, a turbidez influencia o equilíbrio térmico da água, alterando sua capacidade de absorver calor solar e afetando diretamente a temperatura da água. Isso, por sua vez, pode impactar os padrões de circulação e os habitats aquáticos de diversas espécies. Em sistemas de abastecimento de água, altos níveis de turbidez podem dificultar os processos de tratamento, aumentando a demanda por coagulantes e clarificantes para remover as partículas em suspensão e garantir a qualidade da água potável (SOUZA et

al., 2018). Portanto, monitorar e controlar a turbidez é essencial para garantir a saúde dos ecossistemas aquáticos e a disponibilidade de água potável de qualidade.

- **SDI (Índice de Densidade de Sedimentos)**

O equipamento é constituído de um manômetro de entrada seguido de uma pequena mangueira ligada a dois pratos de metal com um filtro de 0,45µm de porosidade e diâmetro de 47mm. A água que passa pela membrana é pressurizada a 2 bar. Quando a água passa pelo filtro vai sujando-o, formando um ‘cake’.

Figura 2.4.2 - Esquema de funcionamento do SDI



Fonte: Estudo do índice de densidade de sedimentos em águas oriundas de poços tubulares aplicados a sistema de dessalinização via osmose inversa

Águas com índices excessivos de ‘*fouling*’ podem causar o bloqueio irreversível de módulos espirais, e devem ser submetidas a algum tipo de pré-tratamento que produza um efluente com características adequadas, para processamento por membranas (SCHNEIDER, TSUTIYA; 2001).

O SDI é calculado por três intervalos (t_i), (t_f) e (t_t). O primeiro intervalo (t_i) faz-se uma coleta de 500 mL, o segundo intervalo de tempo (t_f) varia de 5, 10 ou 15 minutos, quanto maior o tempo mais preciso é o teste. O terceiro intervalo (t_t) é o tempo necessário para a coleta dos últimos 500 mL de permeado. O tempo padrão para o t_i é 15 minutos. O IDS é determinado através da Equação:

$$SDI = 100 \cdot \left(1 - \frac{t_i}{t_f}\right) \cdot t_t \quad (7)$$

A determinação do SDI é essencial em todos os projetos de membranas, mas assume importância especial em sistemas de nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI). (SILVA, Sidinei Kleber. et al, 2009). Um valor corresponde a um valor SDI de cerca de <3 e pode ser considerado como suficientemente baixo para controlar a incrustação coloidal e particulada (FRANÇA, 2010).

2.6.DENSIDADE

A densidade é uma propriedade física fundamental da matéria que relaciona a massa de um material com o seu volume. Expressa em unidades como g/cm^3 ou kg/m^3 , a densidade é um parâmetro essencial para a caracterização de substâncias e desempenha um papel importante em diversas aplicações científicas e industriais (CALLISTER, RETHWISCH; 2021).

No estudo de MPs, a densidade é um fator determinante na dispersão e no comportamento desses materiais em ambientes aquáticos. Polímeros como o PE e o PP, que possuem densidade inferior à da água (menor que 1 g/cm^3), tendem a flutuar, enquanto outros, como o PVC e o PEL, que apresentam densidade superior, tendem a afundar ANDRADY, (2017). Esse comportamento influencia diretamente as estratégias de remoção dos MPs, exigindo técnicas específicas para cada tipo de material.

Além disso, a densidade dos MPs pode ser afetada por processos ambientais, como a biofiltração e a adsorção de contaminantes, que podem alterar suas propriedades físicas e químicas (KOELMANS et al., 2016). Isso ressalta a importância de estudar a densidade dos polímeros em diferentes condições para otimizar métodos de separação, como hidrociclones e membranas de microfiltração, garantindo maior eficiência na remoção desses poluentes.

3. MATERIAIS E METODOS

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado nas seguintes etapas:

- **Etapa (1)** montagem do sistema do sistema híbrido para remoção do microplástico;

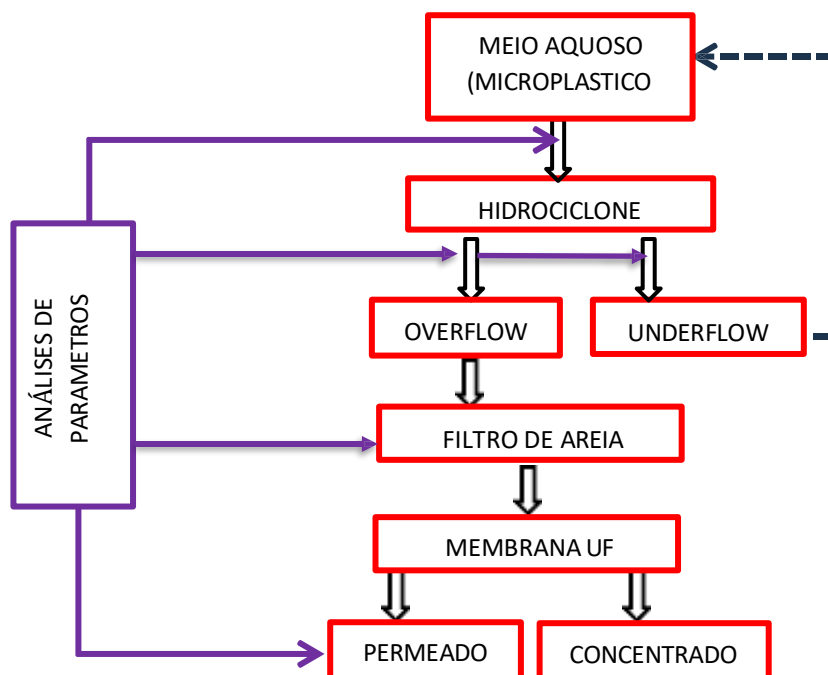
A montagem do sistema foi realizada no âmbito do LABDES que contou com as unidades (*) descritas a seguir e conforme ilustrado no fluxograma da Figura 3.1.1.

Descrição do sistema:

- 1- Tanque de alimentação do sistema de 200 L;
- 2- Mangueiras trançadas de 1', $\frac{3}{4}$ ' e $\frac{1}{2}$ ';
- 3- Cabos flexíveis 2mm e 1,5mm;
- 4- Botões de acionamento, contactores, relé térmico, plug 3P + T (Industrial)
- 5- Hidrociclone de PVC família Bradley fabricado no LABDES;
- 6- Bombas (principal e auxiliar), rebites, abraçadeiras;
- 7- Manômetros e rotâmetros;
- 8- Filtro de areia com capacidade de filtragem de 17000L da Dancor
- 9- Membrana de microfiltração.

(*) As especificações técnicas das unidades fundamentais do sistema encontram-se no anexo desse trabalho.

Figura 3.1.1. - Fluxograma do processo hidrociclone/membrana

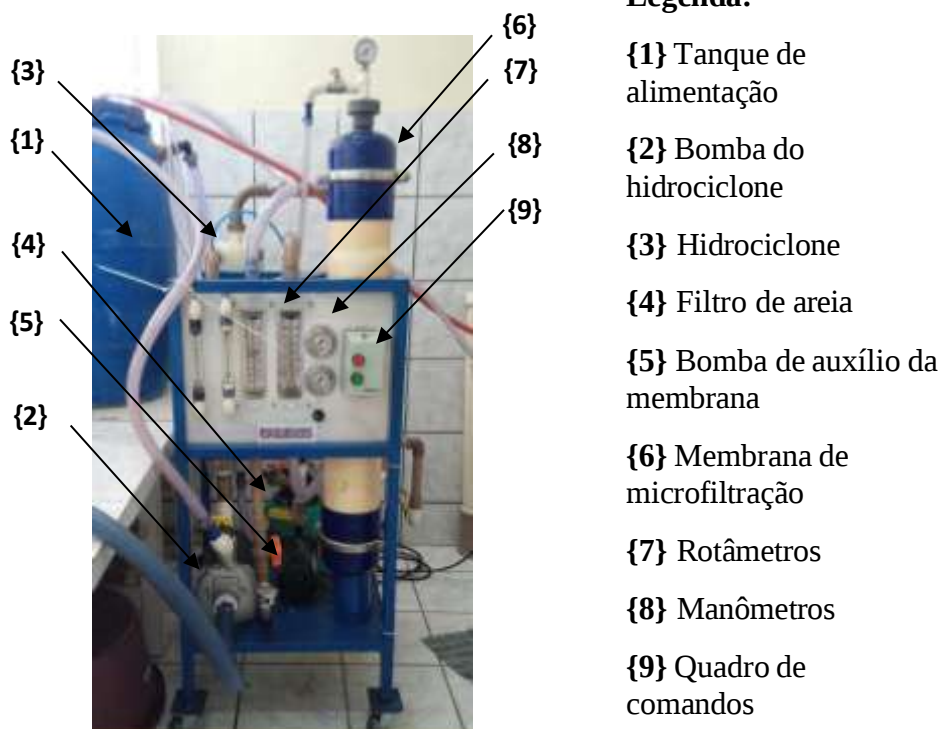


As imagens 1 a 6 ilustradas na Figura 3.1.2 de forma detalhada na antes de sua montagem e a Figura 3.1.3. mostra o sistema com suas respectivas indicações.

Figura 3.1.2.- Partes do Hidrociclone



Figura 3.1.3 - Representação do sistema híbrido



- **Etapa (2)** caracterização do hidrociclone com água tratada;

A avaliação do hidrociclone se deu utilizando água do abastecimento, sem adição de cloro.

Utilizou-se diferentes valores da vazão e da pressão de operação, fazendo variar entre 0 à 1,5 bar, de acordo a tabela 3.1.1. observando as respectivas vazões do *overflow* e *underflow*. Esta etapa é importante para determinar a vazão de *overflow* (fluxo de saída superior) e *underflow* (fluxo de saída inferior) em função da pressão de operação.

Com os dados da caracterização do hidrociclone, para prosseguimento dos experimentos utilizou uma pressão fixa na membrana de microfiltração de 1,5 bar, a pressão foi observada a partir do boletim técnico da membrana que pode ser atestada no boletim técnico exposto no Anexo A.

- **Etapa (3)** realizações dos experimentos (1, 2, 3 e 4) sob as melhores condições de operação obtidas a partir da etapa 2. No experimento 1 o sistema operou com uma concentração de microplástico na corrente de alimentação de 0,83g/L, constante para as pressões de operação de 0,5bar, 1,0bar e 1,5bar.

O experimento 2 foi realizado com as mesmas pressões de operação, mas com a concentração de microplástico na alimentação de 1,66g/L. Convém salientar que a pressão do overflow do hidrociclone foi a pressão de alimentação do filtro de areia para todas as pressões estudadas. Nessa etapa, foram realizadas análises dos seguintes parâmetros físico químicos (cor, turbidez, pH, condutividade elétrica e índice de densidade de sedimentos), bem como as variáveis de medidas como; pressões e vazões de entrada e saída do sistema, a velocidade da alimentação do sistema híbrido na entrada de hidrociclone e de saída no *underflow* e *overflow*.

No experimento 3 foram realizadas quatro bateladas, variando pressão de operação de 0,5 bar, 1,0 bar, 1,5 bar e 2,0 bar para um tempo de operação de 30 min, todas mantendo a concentração inicial de microplástico constante de 1,0 g/L no tanque de alimentação, neste experimento analisou somente a concentração e por meio desse parâmetro pode-se analisar a eficiência filtro de areia e fração recuperada do hidrociclone. Por fim, o experimento 4 foi feito com a melhor pressão que foi analisado nos experimentos anteriores, mantendo a concentração de 1 g/L, e variando o tipo de

microplástico, são eles; AC, PVC e mistura dos MP's (PE + AC + PVC), com os parâmetros do experimento 3 e densidade.

A Tabela 3.1.1. representa a distribuição dos experimentos desse trabalho em função da pressão de operação sob as condições obtidas da caracterização, variando pressão de operação e concentração de microplástico. Todavia antes da realização dos experimentos 1 e 2, foram quantificados os valores do SDI da água de alimentação, para as pressões de (0,5; 1,0, 1,5 e 2,0) bar contendo o MP, do overflow do hidrociclone e o permeado da membrana de MF, como também para o experimento 4, foram realizadas o cálculo da densidade de diferentes materiais, por meio do método do deslocamento de água.

Tabela 3.1.1 - Experimentos: concentrações e pressões

Experimentos	Tipo de MP	Concentração de MP (g/L)	Pressão de operação (bar)	Casos	Parâmetros
1	PE	0,83	0,5	1	Parâmetros físico-químicos
	PE	0,83	1,0	2	
	PE	0,83	1,5	3	
2	PE	1,66	0,5	4	
	PE	1,66	1,0	5	
	PE	1,66	1,5	6	
3	PE	1,00	0,5	7	- Concentração - Fração recuperada no HC - Eficiência do FA - Recuperação da MF
	PE	1,00	1,0	8	
	PE	1,00	1,5	9	
	PE	1,00	2,0	10	
4	AC	1,00	1,5	11	- Densidade - Concentração - Fração recuperada no HC - Eficiência do FA - Recuperação da MF
	PVC	1,00	1,5	12	
	PE+AC+PVC	1,00	1,5	13	

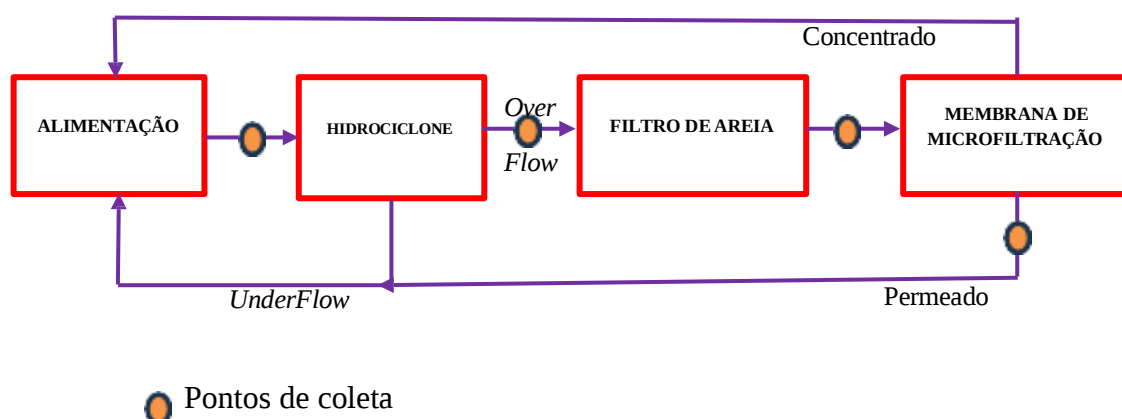
Foi preparada duas soluções, 0,83 g/L e 1,66 g/L, com MP de microesferas de PE 0,6 mm. As soluções foram utilizadas para a condução dos experimentos 1 e 2, respectivamente, nos quais avaliou-se a taxa de remoção dos seguintes parâmetros: cor, turbidez, condutividade elétrica (K) e pH, antes dos referidos experimentos foram feitos SDI na alimentação, *overflow*, filtro de areia e permeado da membrana em função do tempo, 30 min (experimento 1) e 120 min (experimento 2). No experimento 3 e 4, foi preparada uma solução de 1,0 g/L, fazendo apenas a pesagem do MP para calcular a concentração, todavia antes do experimento 4, foi medida a densidade de cada tipo de MP pelo método do deslocamento.

A determinação da densidade do sólido foi realizada pelo método do deslocamento. Inicialmente, mediu-se a massa do sólido seco utilizando uma balança de precisão. Em seguida, adicionou-se um líquido adequado a um recipiente graduado, anotando o volume inicial. O sólido foi completamente submerso no líquido, registrando-se o volume final, e o volume do sólido foi calculado pela diferença entre os volumes final e inicial. Por fim, a densidade foi obtida pela relação entre a massa do sólido e o volume deslocado, seguindo o princípio de Arquimedes.

As pressões foram ajustadas em diferentes níveis, e amostras de água foram coletadas nos seguintes pontos do sistema: alimentação, hidrociclone (*underflow* e *overflow*), filtro de areia e membrana de microfiltração (permeado e concentrado), como mostra o fluxograma da Figura 3.1.4 e Figura 3.1.5. Este método permitiu a coleta de dados detalhados em cada estágio do processo de tratamento, possibilitando uma análise abrangente da eficiência do sistema.

Experimento 1: O experimento em questão refere-se aos casos 1, 2 e 3. O fluxograma ilustrado na Figura 3.1.4. indica que toda a água do sistema – *overflow*, *underflow*, permeado e concentrado – retorna para o tanque de alimentação, sendo

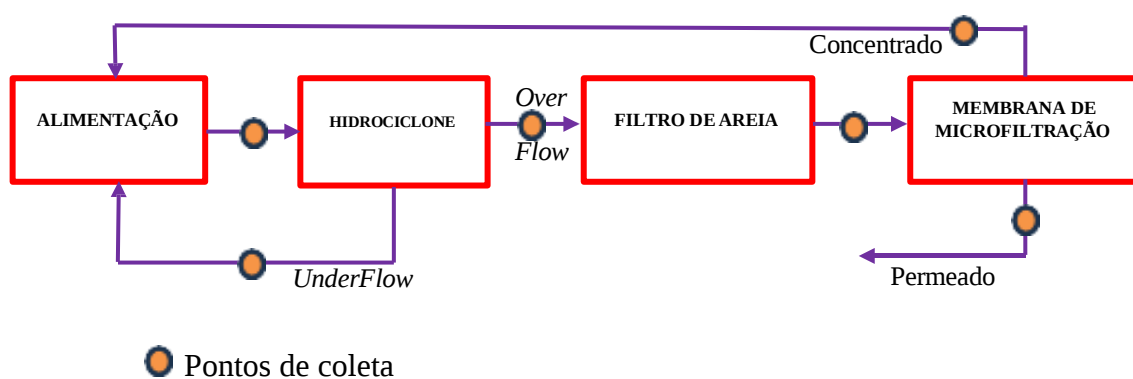
Figura 3.1.4 - Fluxograma do experimento 1



realizadas coletas de amostras a cada 5 minutos, desde o tempo 0 até 30 minutos, nos pontos destacados: alimentação, overflow, pós-filtro de areia e permeado.

Experimentos 2, 3 e 4: O experimento em questão refere-se os casos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13. O fluxograma ilustrado na Figura 3.1.5. indica que toda a água do sistema – overflow, underflow e concentrado, exceto o permeado – retorna para o tanque de alimentação, nos pontos destacados: alimentação, overflow, underflow, pós-filtro de areia, permeado e concentrado.

Figura 3.1.5 - Fluxograma do experimento 2, 3 e 4



Em todos os experimentos, utilizou-se uma mistura dos MP's detalhados acima e a água proveniente da companhia de água do Estado da Paraíba, que abastece o Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES-UFCG). Os parâmetros físico-químicos da água de alimentação encontram-se no Apêndice E.

4. RESULTADOS E DISCURSÕES

4.1. VARIAÇÃO DAS VAZÕES E VELOCIDADES COM A PRESSÃO DE OPERAÇÃO

Os dados apresentados nas Tabelas 4.1.1. e 4.1.2., referem-se à caracterização do hidrociclone e membrana polimérica, os dados dessa etapa foram subsídios para a execução das etapas subsequentes, pois permitiu observar que o sistema respondeu de forma eficaz ao longo de cada fase do processo.

Tabela 4.1.1. - Parâmetros avaliados no hidrociclone

P_a (bar)	Q_a (L/min)	V_{af} (m/s)	P_{of} (Bar)	Q_{of} (L/min)	V_{of} (m/s)	P_{uf} (Bar)	Q_{uf} (L/min)	V_{uf} (m/s)
0,25	120,00	6,36	0,20	30,00	0,99	0,10	90,00	2,96
0,50	123,00	6,53	0,30	32,00	1,06	0,25	91,00	2,99
0,75	130,00	6,90	0,45	35,00	1,15	0,30	95,00	3,12
1,00	131,00	6,95	0,50	36,00	1,18	0,30	95,00	3,12
1,50	140,00	7,43	0,75	40,00	1,32	0,35	100,00	3,29

Tabela 2.1.2. - Parâmetros avaliados no filtro e na membrana

Filtro de areia		Membrana			
P_{af} (bar)	P_{sf} (Bar)	P_{em} (Bar)	P_c (Bar)	Q_p (L/min)	Q_c (L/min)
0,25	0,90	1,50	1,00	15,00	16,00
0,50	1,00	1,50	1,00	16,00	17,00
0,75	1,00	1,50	0,90	15,00	19,00
1,00	1,10	1,50	0,90	15,50	20,00
1,50	1,30	1,50	1,00	17,00	22,00

Onde, P_a – Pressão de entrada P_{of} – Pressão do *overflow* P_{uf} – Pressão do *Underflow* Q_a – Vazão da alimentação do hidrociclone - P_{af} - Pressão de alimentação do filtro P_{sf} – Pressão de saída do filtro P_{em} – Pressão de entrada da membrana P_c – Pressão do concentrado Q_{uf} – Vazão do *Underflow* Q_{of} – Vazão do *Overflow* Q_p – Vazão do permeado Q_c – Vazão do concentrado V_{af} – Velocidade de alimentação $R(\%)$ – Recuperação do hidrociclone V_{uf} - Velocidade do *Underflow* V_{of} - Velocidade do *Overflow*

Observou-se, a partir das Tabelas 4.1.1. e 4.1.2, que a vazão do permeado da membrana de microfiltração está dentro dos padrões estabelecidos no boletim técnico como pode ser observado no Anexo A. Além disso, verificou-se que a velocidade de entrada, em função da pressão de operação do sistema são diretamente proporcionais como esperado. Especificamente, obteve-se maiores vazões no filtro de areia quando a pressão de operação da máquina foi aumentada, também, observa-se também que o desempenho melhor do sistema está em quando a máquina está sob a pressão de alimentação de 1,5 bar, nos dando 28,57% de recuperação e uma vazão do permeado 17,00 L/min.

4.2. ÍNDICE DE DENSIDADE DE SEDIMENTOS (SDI)

A Figura 4.2.1 e 4.2.2., descreve o comportamento do SDI em função da pressão de entrada nos pontos de coleta de amostra do sistema, para a solução aquosa na alimentação do sistema, do overflow do hidrociclone, do filtrado do filtro de areia e do permeado da membrana polímerica (microfiltração), dos experimentos 1 e 2. Vale ressaltar que o SDI do tanque de alimentação do experimento 1 foi de 3,9; e o do experimento 2 foi de 4,4.

Figura 4.2.1. - SDI em função da pressão do experimento 1

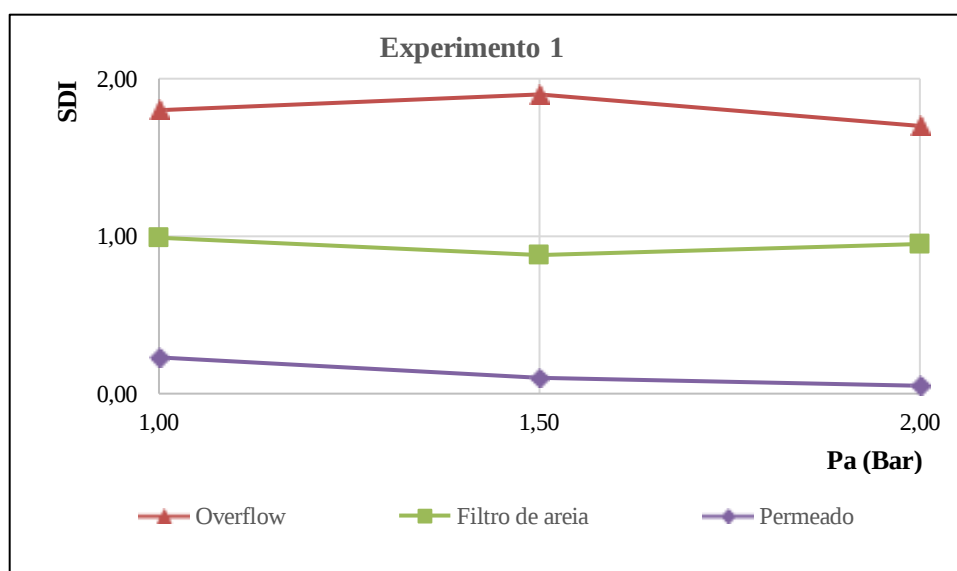
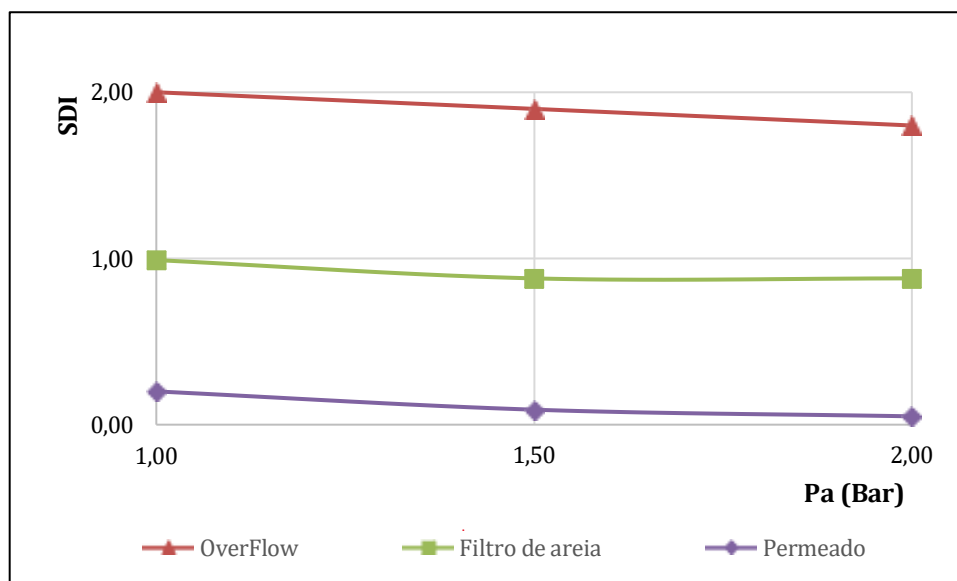


Figura 4.2.2 - SDI da pressão de operação do experimento 2

De acordo com a distribuição dos dados mostrados nas Figuras 4.2.1. e 4.2.2. para o primeiro e segundo experimentos, observa-se que o SDI diminui em função de cada tratamento, ou seja, seus valores ficaram próximo a zero após a membrana de microfiltração, por meio dos resultados obtidos no SDI pode-se concluir que à medida que as fases do sistema vão sendo alcançadas, o resultado do mesmo diminui, dessa forma subsidiando e atestando a redução da taxa de MP no meio aquoso.

A Figura 4.2.2. mostra uma similaridade em seus valores, isso mostra que o aumento da concentração de MP fez com que o SDI apresentasse valores superior aos obtidos no primeiro experimento. Além disso, o pré-tratamento com o filtro de areia favorece o aumento de tempo de vida útil da membrana, dessa forma reduz a necessidade de limpeza.

4.3 EXPERIMENTOS

- **Cor e Turbidez**

As Figuras 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 representam variações das cores e a as figuras 4.3.4, 4.3.5 e 4.3.6 representam variações turbidez em função do tempo para as diferentes pressões de operação avaliadas 0,5; 1,0 e 1.5 bar, para a solução aquosa na alimentação e na saída do hidrociclone e do filtro de areia, bem como do permeado da membrana polimérica (microfiltração), no experimento 1.

Considerando que a cor aumentou em função da concentração de microplástico. Os dados do permeado foram significativamente representativos para a remoção dos microplásticos presentes no meio aquoso; os perfis das curvas dos dados das cores e turbidez da água de alimentação, do filtro de areia e da membrana foram similares em função do aumento da pressão, ou seja, houve uma diminuição significativa no final do processo, como mostrado nas Figuras 4.3.1 e 4.3.2.

Figura 4.3.1- Comportamento da Cor em função do tempo no experimento 1, sob a pressão de 0,5 bar

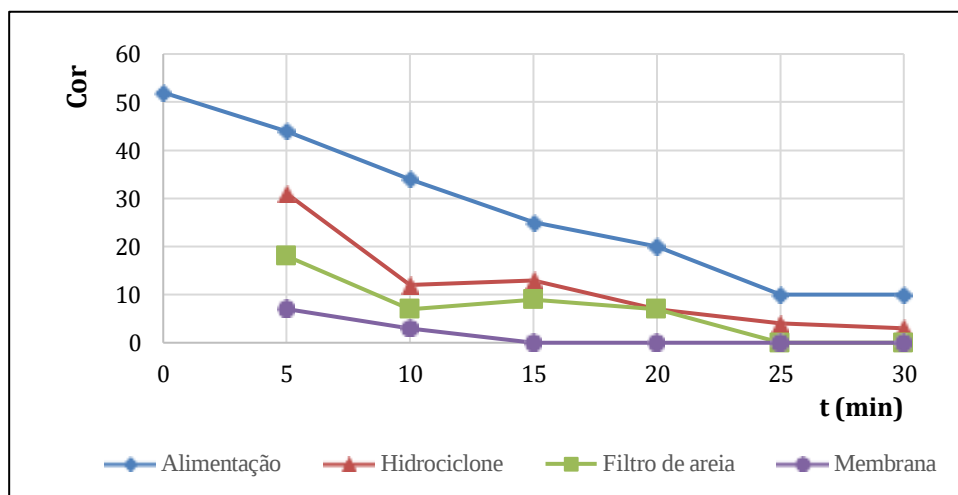


Figura 4.3.2 - Comportamento da Cor em função do tempo no experimento 1, sob a pressão de 1,0 bar

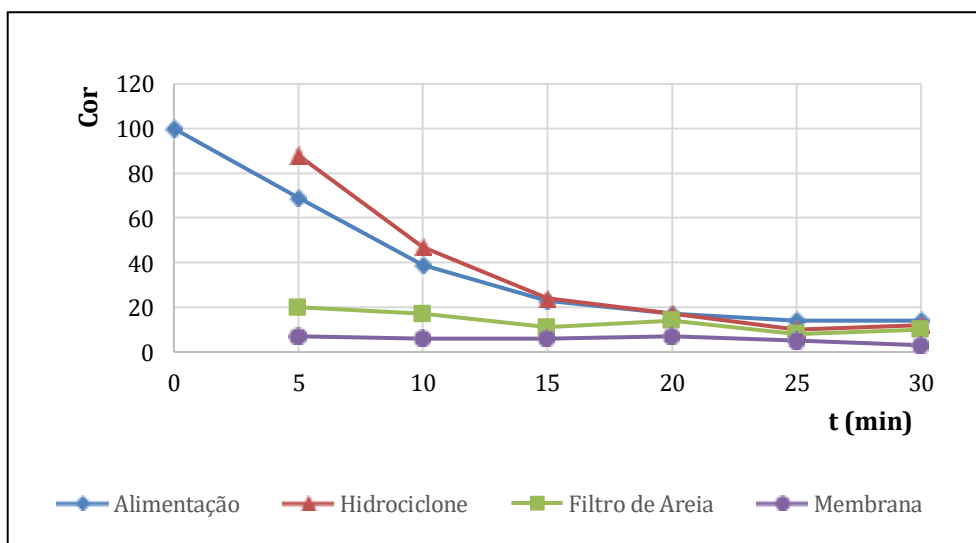


Figura 4.3.33 - Comportamento da Cor em função do tempo no experimento 1, sob à pressão de 1,5 bar

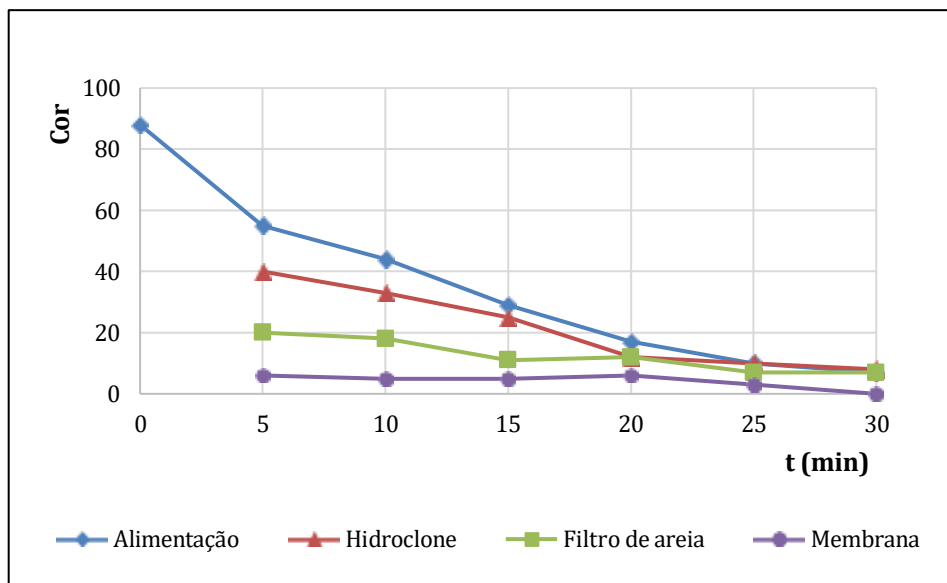


Figura 4.3.4 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 1, sob à pressão de 0,5 bar

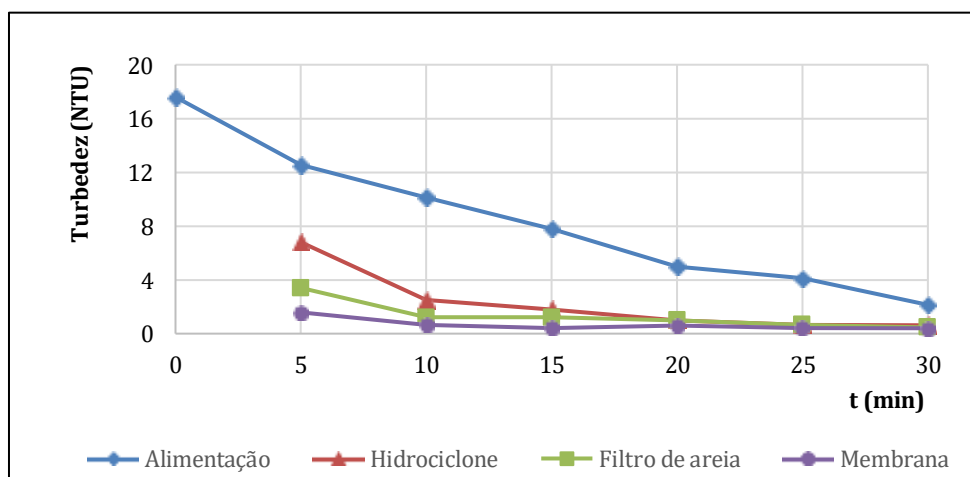


Figura 4.3.5 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 1, sob à pressão de 1,0 bar

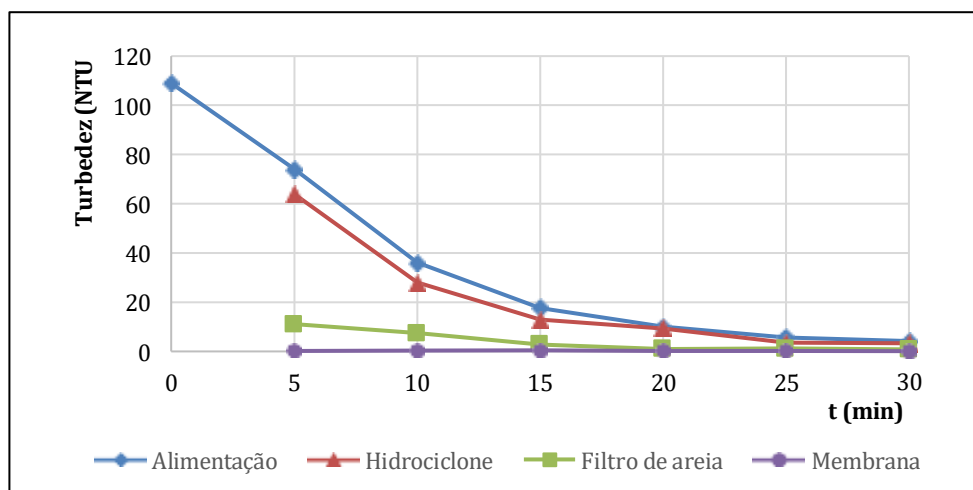
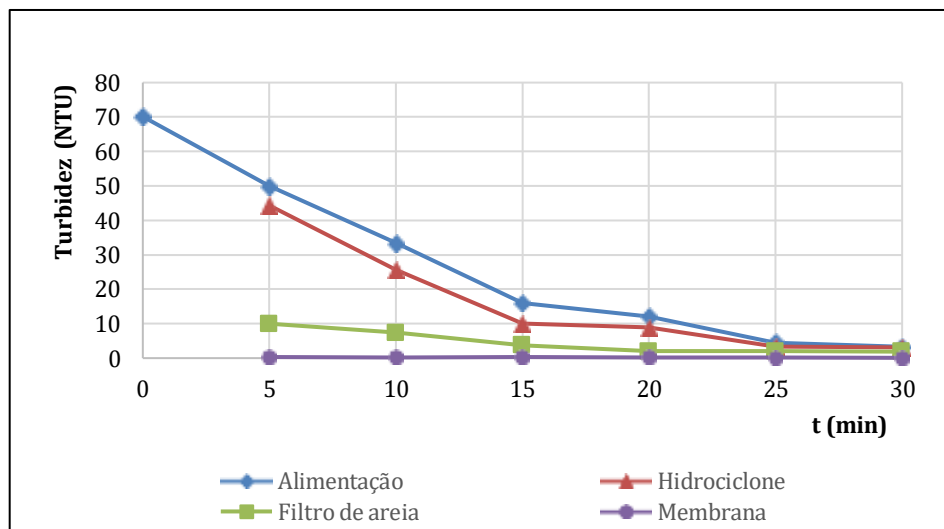


Figura 4.3.6 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 1, sob à pressão de 1,5 bar



Pode-se observar a partir das Figuras 4.3.1. a 4.3.6. um comportamento similar para todos os experimentos – com 0,5 bar, 1,0 bar e 1,5 bar – em função da pressão de operação, ou seja, observa-se a redução da cor em função do tempo.

A cor e a turbidez da solução da alimentação diminuem devido o reciclo do permeado e do concentrado da membrana de microfiltração, a qual operou sob um regime *dead end* e também devido aos dados de cor e turbidez do filtro de areia que foi bastante eficiente na remoção do microplástico nessa etapa do processo no que diz respeito ao experimento 1.

Em relação ao experimento 2 pode-se atribuir a redução da cor e turbidez ao tempo de batelada como também ao filtro de areia que retém as partículas de microplástico no meio aquoso, dessa forma com o decorrer do tempo pode-se notar uma diminuição significativa de cor e turbidez nas bateladas 4, 5 e 6, como mostrado nas Figuras 4.3.7, 4.3.8, 4.3.9, 4.3.10, 4.3.11 e 4.3.12.

Figura 4.3.7 - Comportamento da cor em função do tempo no experimento 2, sob à pressão de 0,5 bar

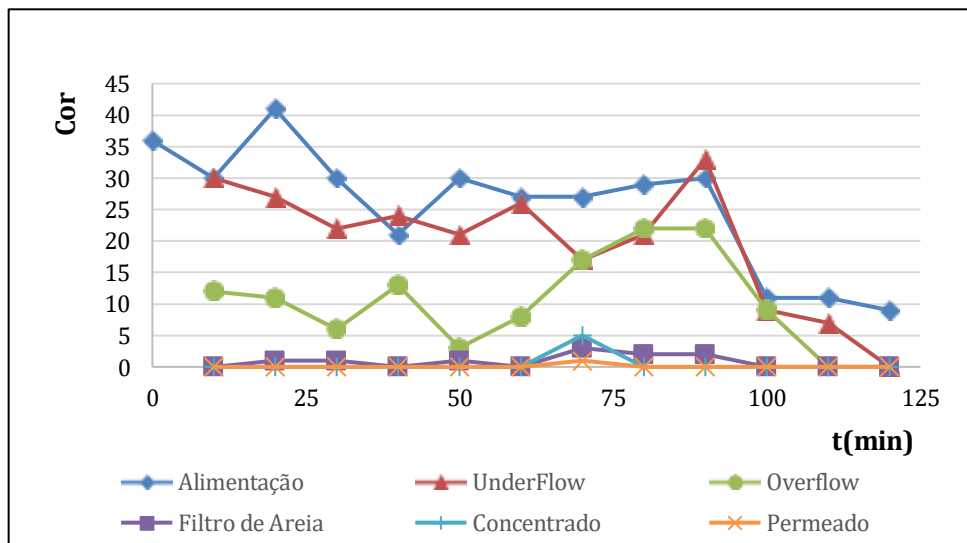


Figura 4.3.84 - Comportamento da cor em função do tempo no experimento 2, sob à pressão de 1,0 bar

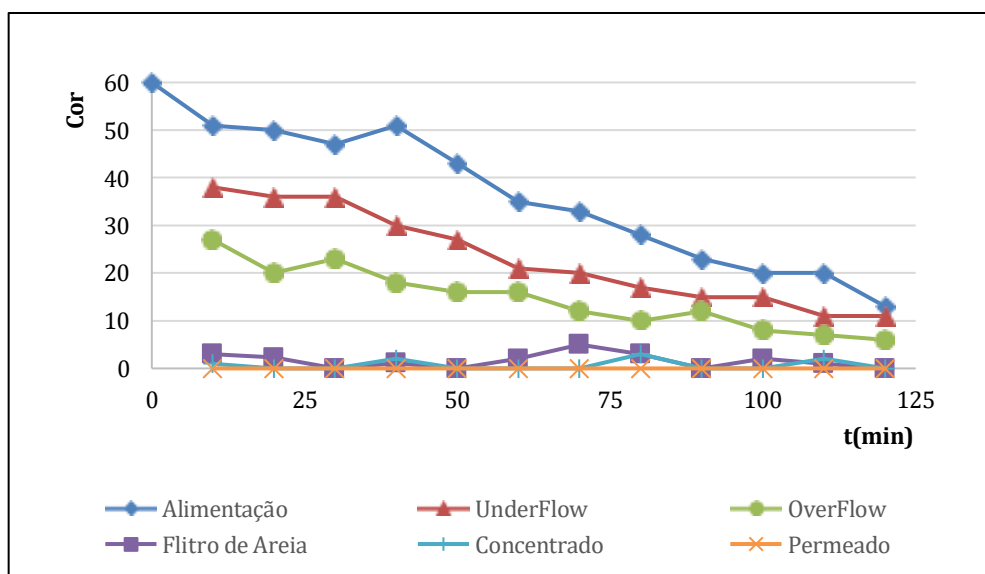


Figura 4.3.9 - Comportamento da cor em função do tempo no experimento 2, sob à pressão de 1,5 bar

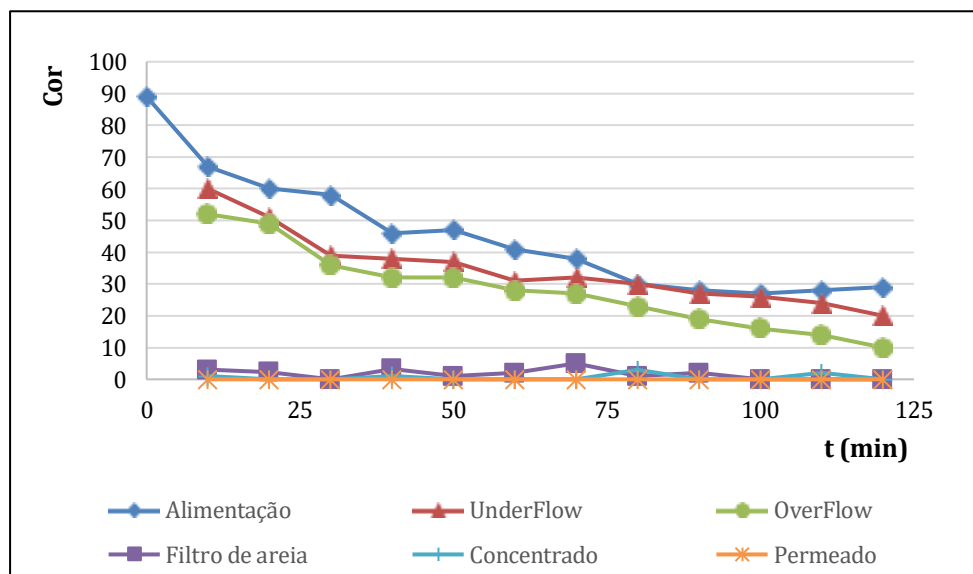


Figura 4.3.10 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 2, sob à pressão de 0,5 bar

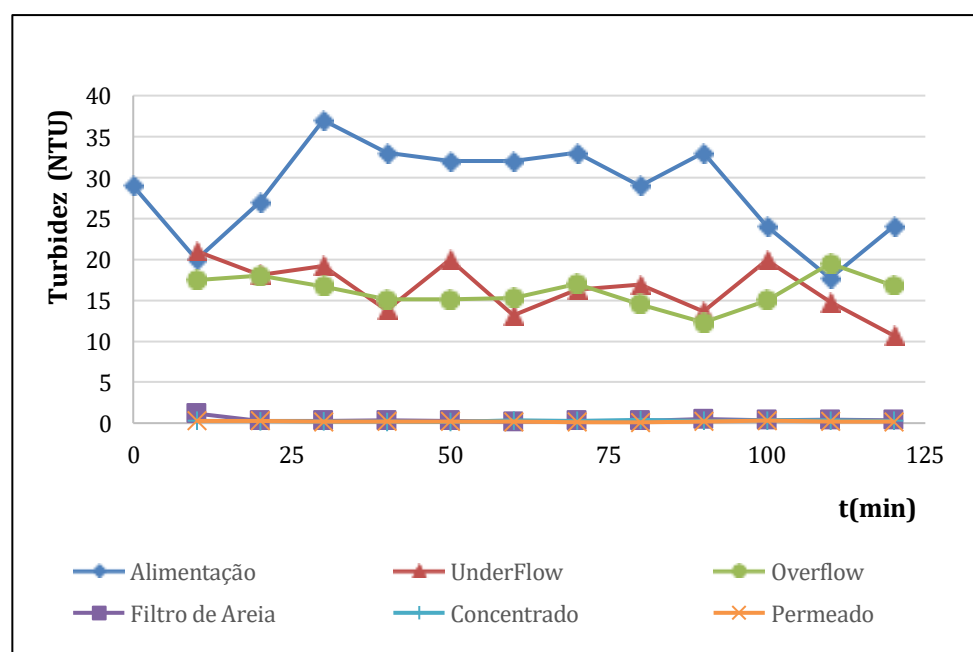


Figura 4.3.11 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 2, sob a pressão de 1,0 bar

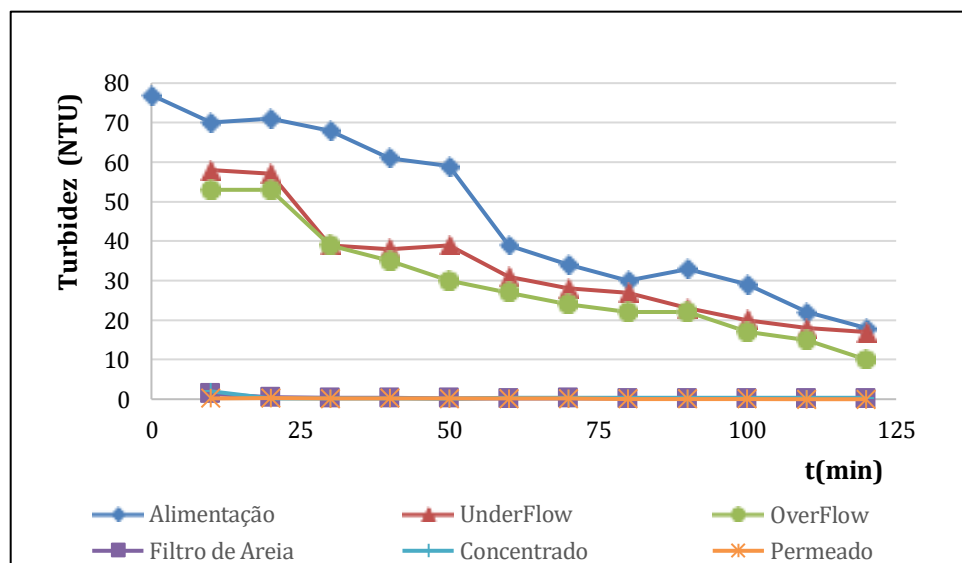
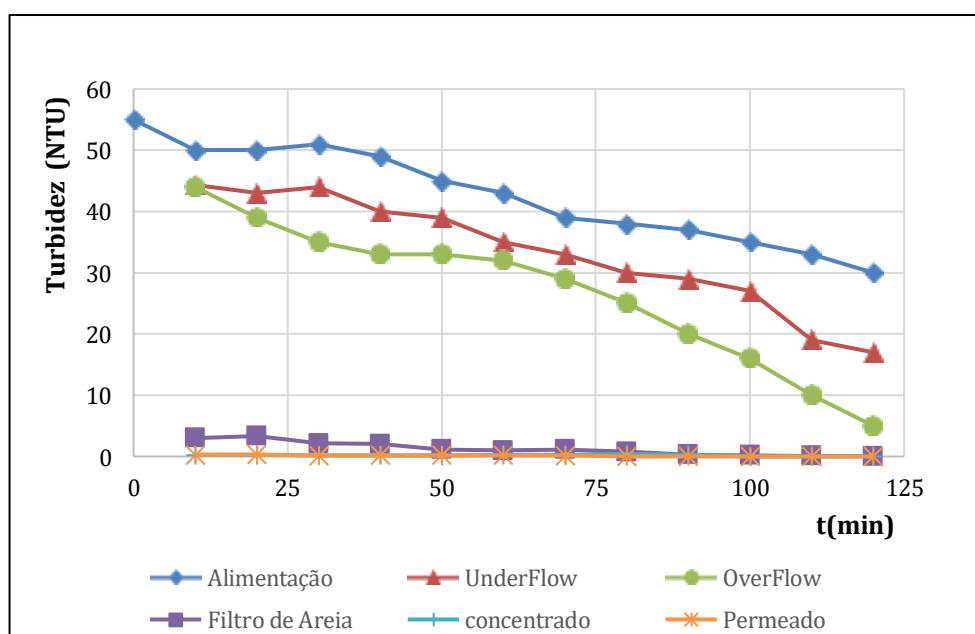


Figura 4.3.12 - Comportamento da turbidez em função do tempo no experimento 2, sob a pressão de 1,5 bar



Observa-se que, à medida que a pressão aumenta, nos casos 4, 5 e 6, a eficiência na remoção da cor também aumenta, indicando uma relação direta entre a pressão aplicada e a eficácia do processo de tratamento. No início do experimento, as amostras apresentavam cor e turbidez intensas devido à presença de mais microplástico no meio

aquoso. Com o avanço do tempo e o aumento da pressão de operação, houve uma significativa redução na intensidade da cor, especialmente notável nas pressões mais altas, ou seja: 1,5 bar.

Além disso, a análise gráfica permite inferir que a remoção de cor e turbidez é mais rápida nos primeiros minutos de filtração, sugerindo que as partículas de maior tamanho são filtradas e se retêm no filtro de areia. A estabilização das curvas em tempos mais avançados indica que a maior parte das substâncias responsáveis pela cor e turbidez já foram removida, deixando apenas traços mínimos.

Esses resultados são corroborados por estudos que utilizaram técnicas similares de filtração por membrana, onde pressões mais altas melhoraram significativamente a qualidade da água tratada, reduzindo a turbidez e a cor, e confirmando a viabilidade do uso de pressões variáveis para otimizar processos de purificação de água.

Os resultados demonstram que a cor e a turbidez das amostras variaram significativamente ao longo do tempo de operação e entre os diferentes pontos de coleta das amostras, nos experimentos 1 e 2.

4.4 EXPERIMENTO 3

4.4.1 Concentração

As Figuras 4.4.1 a 4.4.4 mostram os perfis de concentração em cada ponto de coleta ao longo do tempo para cada pressão de operação ajustada. Ao fim de todas as bateladas, a concentração no permeado da membrana de microfiltração foi zero. Nas bateladas de 1,0 bar, 1,5 bar e 2,0 bar, a partir dos 15 minutos, a concentração atingiu o valor zero a partir da etapa do filtro de areia.

Figura 4.4.1 - Variação da concentração com o tempo, sob à pressão de 0,5 bar.

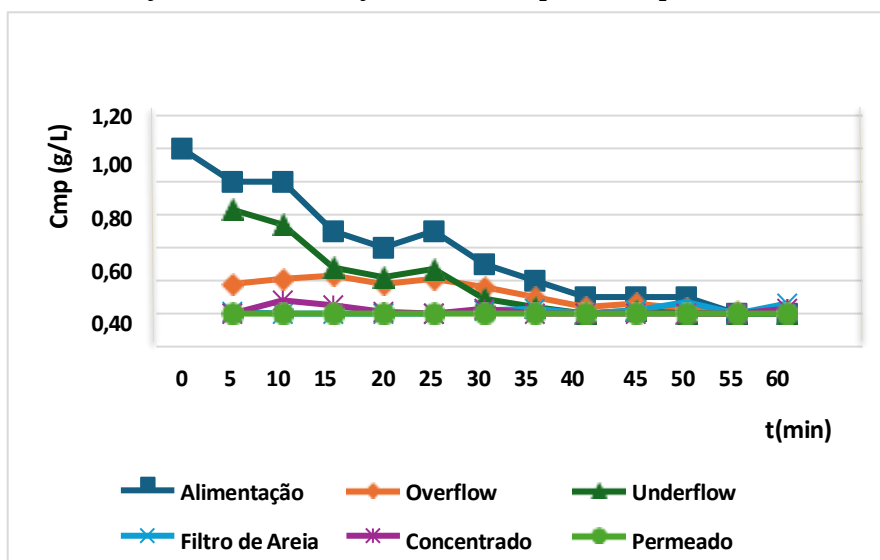


Figura 4.4.2 - Variação da concentração em função do tempo, sob à pressão de 1,0 bar.

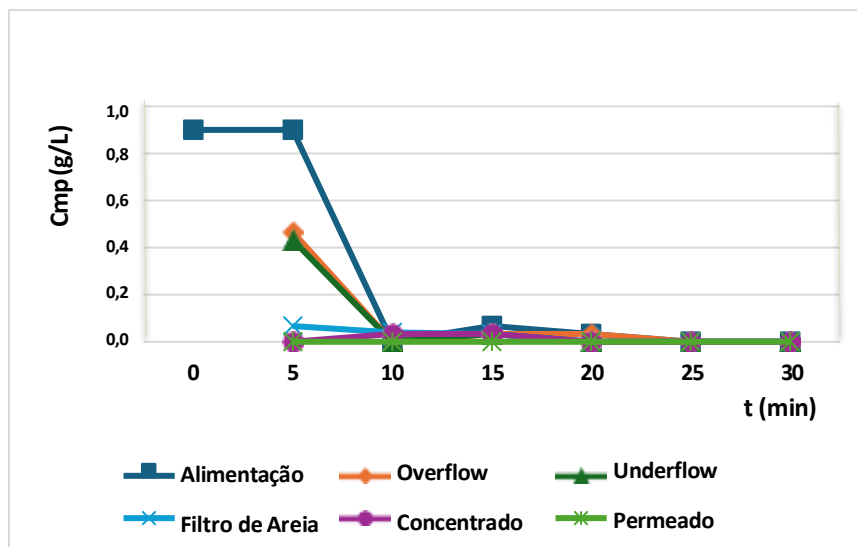


Figura 4.4.3 - Variação da concentração em função do tempo, sob à pressão de 1,5 bar.

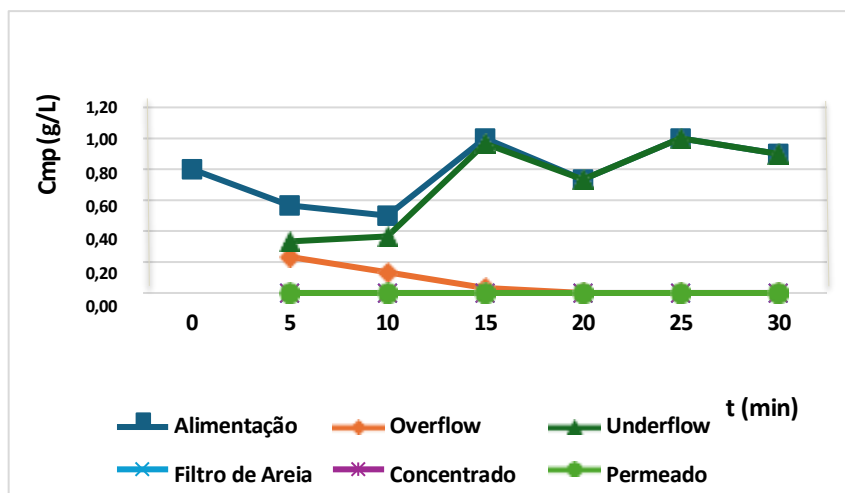
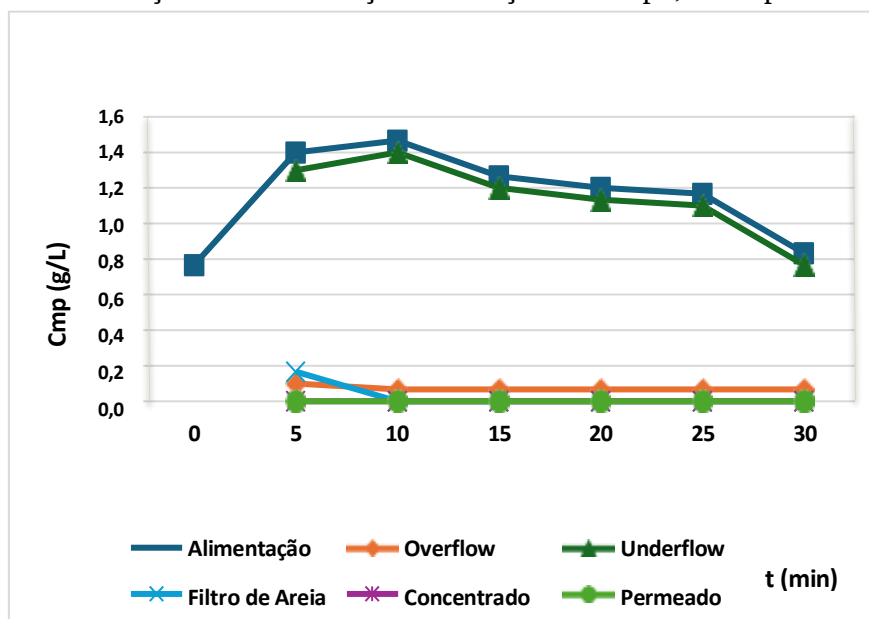


Figura 4.4.4 - Variação da concentração em função do tempo, sob à pressão de 2,0 bar.

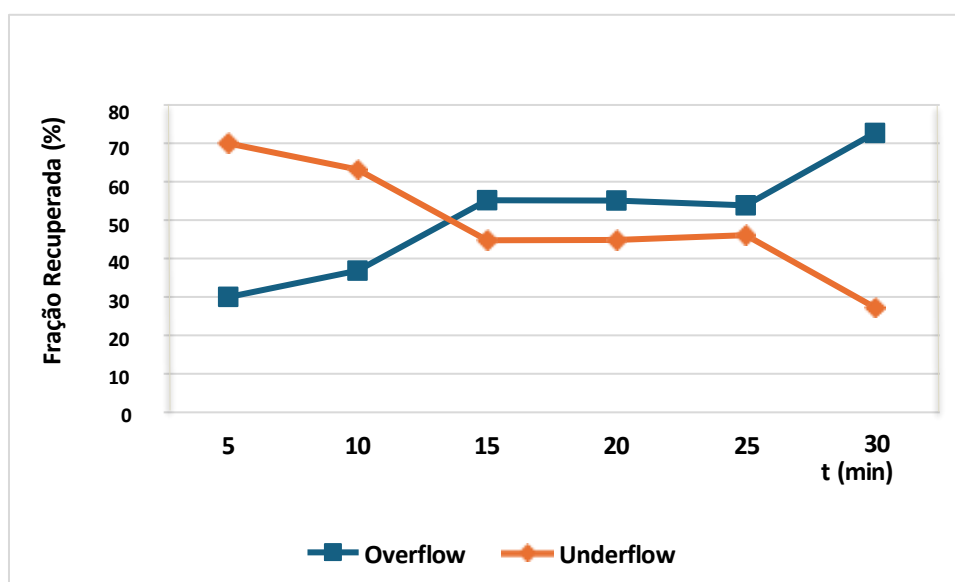


4.4.2 Fração recuperada no hidrociclone

As frações recuperadas do *over* e *underflow* do hidrociclone foram calculadas usando as Equações 2 e 3 (Seção 2.2.) e todos os valores estão dispostos em tabela no Apêndice C.

A Figura 4.4.5 mostra o perfil do desempenho do hidrociclone em termos de fração recuperada para sistema particulado em suspensão adicionado em água de abastecimento da companhia de tratamento do estado da Paraíba, operando sob a pressão de 0,5 bar na entrada do hidrociclone.

Figura 4.4.5 - Variação da fração recuperada em função do tempo, sob à pressão 0,5 bar.

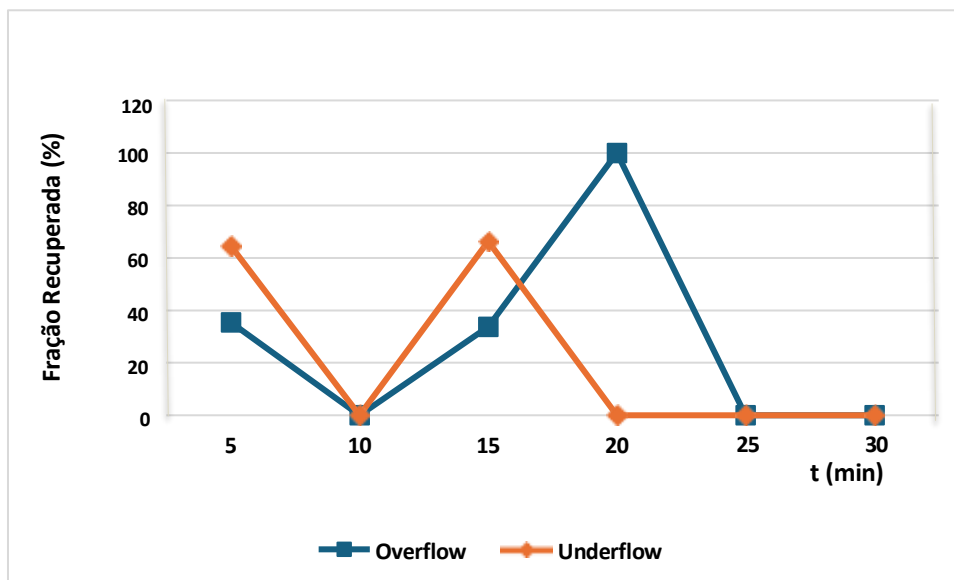


Como o material utilizado se trata de partículas plásticas de dimensão média entre 0,4 e 0,8 mm, está classificado como microplástico (Lee *et al.*, 2024). Considerando que a taxa da concentração de microplástico presente no *over* e *underflow* durante o processo são transientes e que depende do quanto chega na entrada do hidrociclone, a uma pressão de operação de 0,5 bar, houve uma tendência da concentração do *underflow* diminuir em função do tempo, apresentando uma concentração de estabilização, conforme mostra a partir dos 15 minutos de operação. A curva da fração recuperada no *overflow* apresentou um comportamento oposto, como uma tendência de aumento ao longo do tempo.

A Figura 4.4.6 apresentou para o *underflow* uma tendência de aumentar a extração a partir dos 10 minutos e nos 25 e 30 minutos apresentou valores igual a zero, esse mesmo

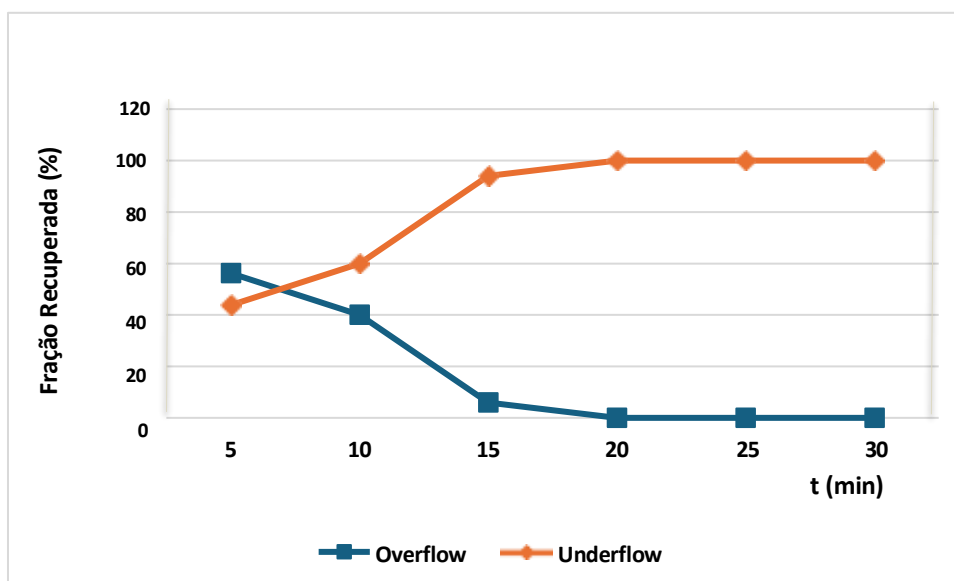
comportamento foi observado para o *overflow*. Esse fato se deu que no momento da coleta das amostras, na corrente da alimentação do hidrociclone não foi observado a presença de microplástico.

Figura 4.4.6- Variação da fração recuperada em função do tempo, sob à pressão de 1,0 bar.



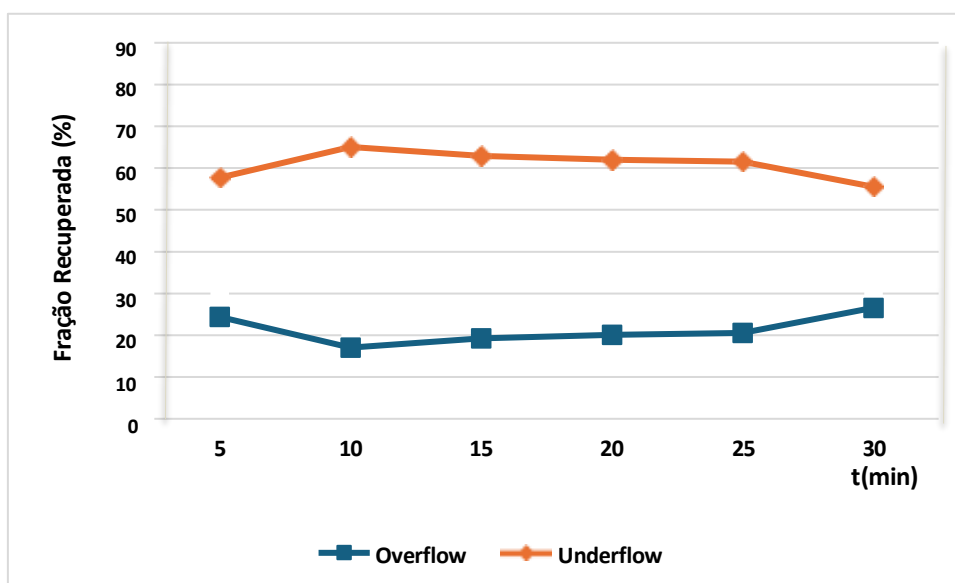
A Figura 4.4.7 ilustra os perfis de ambos, *under* e *overflow*, uma tendência de obedecer ao balanço de massa para o hidrociclone, ou seja, à medida que a fração de recuperação do *overflow* diminuiu, a do *underflow* aumentou. Aparentemente, isso está relacionado com o aumento da pressão de operação, a qual é um dos vetores fundamentais para a extração do material particulado durante o processo (Zhang *et al.*, 2024).

Figura 4.4.7- Variação da fração recuperada em função do tempo, sob à pressão de 1,5 bar.



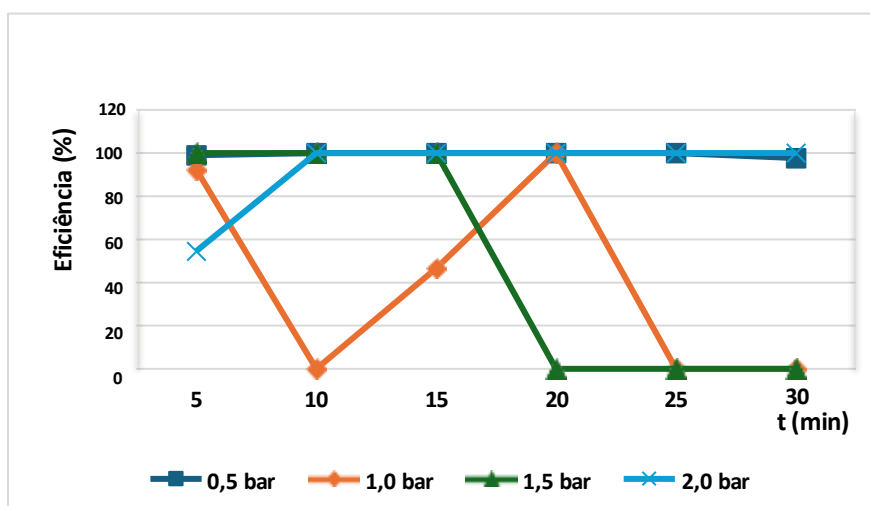
Na Figura 4.4.8, estão ilustrados os perfis da fração recuperada nas duas vazões de saída do hidrociclone (*under* e *overflow*), apresentando uma maior porcentagem no *underflow* durante todo o tempo de operação. Esse comportamento já foi melhorado em relação ao obtido anteriormente, com a pressão de 1,5 bar. Isso deve estar relacionado ao fato de quanto maior a pressão de entrada, que faz aumentar a velocidade do material particulado com auxílio da força centrífuga no interior do hidrociclone (Zhang *et al.*, 2024).

Figura 4.4.8 - Variação da fração recuperada em função do tempo, sob à pressão de 2,0 bar.



4.4.3. Eficiência do filtro de areia

A eficiência do filtro de areia foi calculada pela relação entre a concentração e vazão que saem do *overflow* do hidrociclone e a concentração e vazão que entram na membrana. A Figura 4.4.9 mostra o perfil de desempenho do filtro sob cada pressão de operação aplicada. Observa-se que a eficiência se mantém acima de 90% na maioria dos pontos, como já previsto pela literatura (Martín-Gracia *et al.*, 2022).

Figura 4.4.9 - Eficiência do filtro de areia com o tempo.

Observou-se quando a concentração de microplástico se mostrava igual a zero, o filtro de areia e consequentemente a membrana de microfiltração não apresentou resultados de extração do microplástico, conforme pode-se observar na Figura 25.

4.4.5. Recuperação na membrana de microfiltração

Os dados estão dispostos na Tabela 4.4.5 foram calculados a partir das leituras nos rotômetros do permeado e do concentrado da membrana de microfiltração e com usos da Equação 6 (Seção 2.3.) a recuperação da membrana foi calculada em função da pressão de operação.

Tabela 4.4.5 - Recuperação na membrana de microfiltração em função da pressão de operação

Pressão de operação (bar)	Recuperação – R (%)
0,50	51,33
1,00	70,31
1,50	72,22
2,00	70,00

Observa-se a partir dos resultados apresentados na Tabela 4.4.5 a recuperação da membrana de microfiltração foi influenciada pela pressão de operação. A pressão de 1,50 bar foi a que apresentou maior recuperação para o sistema. Esses dados estão de acordo com as caracterização da membrana de microfiltração, conforme boletim tecnico da membrana que se encontra no Apêndice A.

4.5. EXPERIMENTO 4

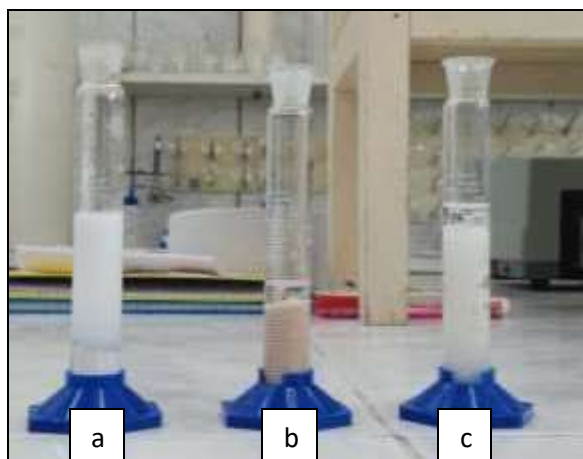
4.5.1. Densidade

Os dados apresentados na Tabela 4.5.1. e Figura 4.5.1. referem-se aos resultados experimentais das densidades do PVC, PE e AC. Essas informações foram fundamentais para a classificação dos diferentes tipos de microplásticos (MPs) e suas respectivas densidades. A partir dos dados coletados nesta etapa, foi possível observar que os materiais e suas densidades possuem uma relação direta com a eficiência de sua remoção no sistema. Além disso, verificou-se que, a partir de uma determinada densidade e tipo de MP, algumas etapas do sistema mostram maior eficiência do que outras em função das densidades dos microplásticos.

Tabela 4.5.1. – Valores de densidade dos microplásticos versus suas variâncias e desvio padrões.

Material	Densidade (g/cm ³)
1- PVC	1,0780
2- Polietileno (PE)	0,4923
3- Acrílico	1,0580

Figura 4.5.1. – Fotos mostrando o comportamento dos microplásticos em meios aquosos para três tipos de materiais (a)PE; (b)PVC; (c)AC



Com os dados coletados nesta etapa do experimento, foi possível avançar para a próxima fase, que consistiu em avaliar a eficiência do sistema híbrido na remoção de MPs. Nessa análise, buscou-se compreender como diferentes tipos de MPs, associados às suas variações de densidade, se comportam ao longo das etapas do sistema híbrido. Esse

estudo foi essencial para identificar quais etapas a seguir que apresentou maior eficiência em função das características específicas dos MPs.

4.5.2. Concentração do microplástico no meio aquoso

As Figuras 4.5.2, 4.5.3 e 4.5.4 mostram a variação da concentração dos MPs (Cmp) estudados (polimetilmetacrilato – Acrílico, policloreto de vinila – PVC e mistura PE, AC e PVC) sob uma pressão de operação de 1,5bar em função do tempo.

Figura 4.5.2. - Variação da concentração do microplástico do acrílico em função do tempo sob à pressão de 1,5 bar para cada ponto de tratamento do sistema.

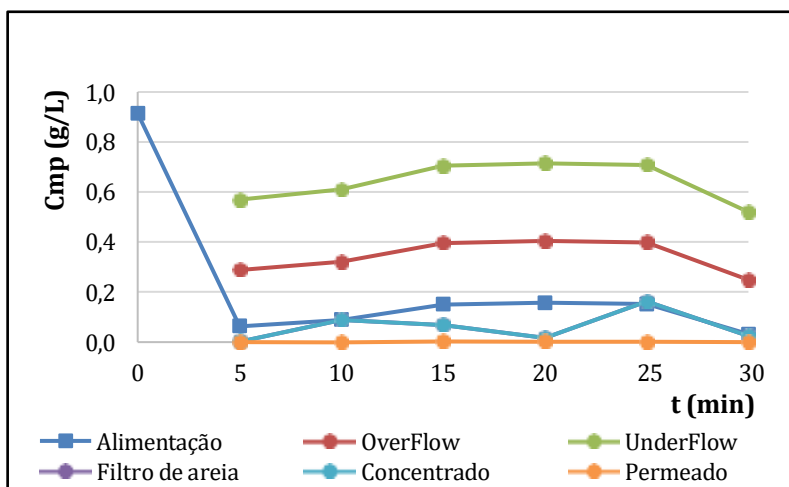


Figura 4.5.3.- Variação da concentração do microplástico do PVC em função do tempo sob à pressão de 1,5 bar para cada ponto de tratamento do sistema.

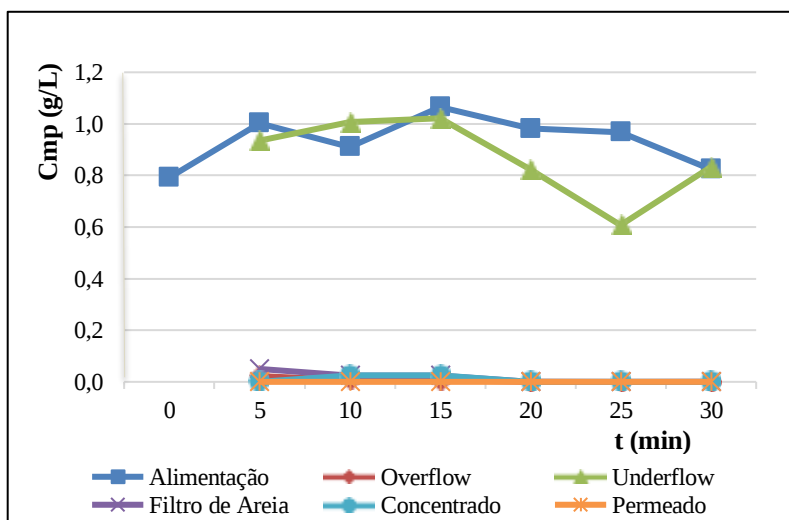
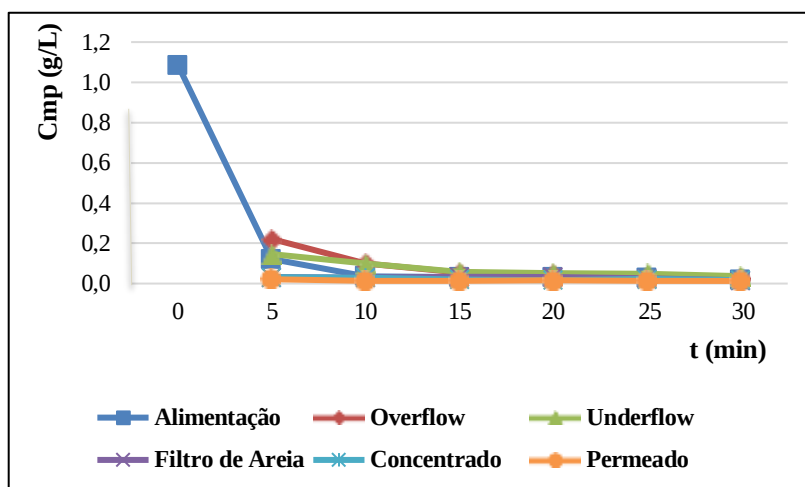


Figura 4.5.4.- Variações das concentrações da mistura dos microplásticos (PE, AC e PVC) no meio aquoso em função do tempo sob à pressão de 1,5 bar para cada ponto de tratamento do sistema.



A análises dos dados obtidos para os dois microplásticos estudados e mistura dos três foram as seguintes:

1) Acrílico: A variação de sua concentração durante a sua extração do meio aquoso, para cada etapa do sistema bem sucedida. Observou que ocorreu uma redução significativa na primeira fase do sistema quando a solução passou pelo hidrociclone, mostrando um perfil similar para ambas correntes (underflow e overflow). A concentração do acrílico o após o filtro de areia e membrana de microfiltração foram bastante significativas, chegando a reduzir a zero na corrente do permeado da membrana. Interessante que a concentração do MP na saída do tanque de alimentação reduziu bastante em função do tempo do experimento, isso significa que o processo da extração do microplástico foi satisfatória.

2) PVC: A concentração do MP na saída do tanque de alimentação ficou bem próxima da concentração do underflow do hidrociclone, no entanto os outros dois sistemas (filtro de areia e membrana de microfiltração) apresentou resultados satisfatórios, chegando a reduzir 100% a concentração do MP.

3) A mistura dos três tipos de microplástico (PE, AC e PVC): os perfis das curvas das concentrações dos três tipos de microplástico, em todos os pontos de coleta de amostras, foram bastantes significativas em termos de extração, houve uma redução nos primeiro cinco minutos, a concentração do MP da corrente do overflow ficou bem próximo a zero, tornando assim mais fácil para os demais sistemas. Esse fato pode estar

relacionado com os valores das densidades e bem como a ação de aglutinação dos microplásticos no meio aquoso, formando assim partículas acima de micrometro, as quais facilita bastante no rendimento do hidrociclone. Esse comportamento também vem a cooperar para o filtro de areia e a membrana de microfiltração.

4.5.3. Fração recuperada do hidrociclone

As Tabelas 4.5.1., 4.5.2 e 4.5.3 mostram a fração recuperada das partículas para o hidrociclone nas correntes do *overflow* e *underflow*, para pressão e vazão constante de 1,5 bar em função do tempo. Os microplásticos estudados foram respectivamente (polimetilmetacrilato – Acrílico, policloreto de venila – PVC e a mistura (PE, AC e PVC).

Tabela 4.5.1. – Valores para as frações de microplástico de acrílico recuperados nas correntes *overflow* e *underflow* em função do tempo.

t (min)	P (bar)	Ca (g/L)	Cu (g/L)	Co (g/L)	Qa (L/min)	Qu (L/min)	Qo (L/min)	FRM Over (%)	FRM under (%)
5	1,50	0,063	0,288	0,569	140	100	40	39,08	32,56
10	1,50	0,089	0,320	0,609	140	100	40	51,17	25,77
15	1,50	0,150	0,396	0,705	140	100	40	74,78	18,85
20	1,50	0,156	0,404	0,714	140	100	40	76,89	18,43
25	1,50	0,152	0,399	0,708	140	100	40	75,06	18,85
30	1,50	0,032	0,249	0,520	140	100	40	21,50	55,59

Tabela 4.5.2. – Valores para as frações de microplástico de PVC recuperados nas correntes *overflow* e *underflow* em função do tempo.

t (min)	P (bar)	Ca (g/L)	Cu (g/L)	Co (g/L)	Qa (L/min)	Qu (L/min)	Qo (L/min)	FRM Over (%)	FRM Under (%)
5	1,5	1,028	0.022	0,934	140	100	40	37.42	1.60
10	1,5	0,911	0.008	1,061	140	100	40	31.77	0.62
15	1,5	1,654	0.006	1,219	140	100	40	36.39	0.44
20	1,5	0,982	0.000	0,822	140	100	40	41.86	0.00
25	1,5	0,967	0.001	0,607	140	100	40	55.83	0.01
30	1,5	0,824	0.000	0,832	140	100	40	34.64	0.00

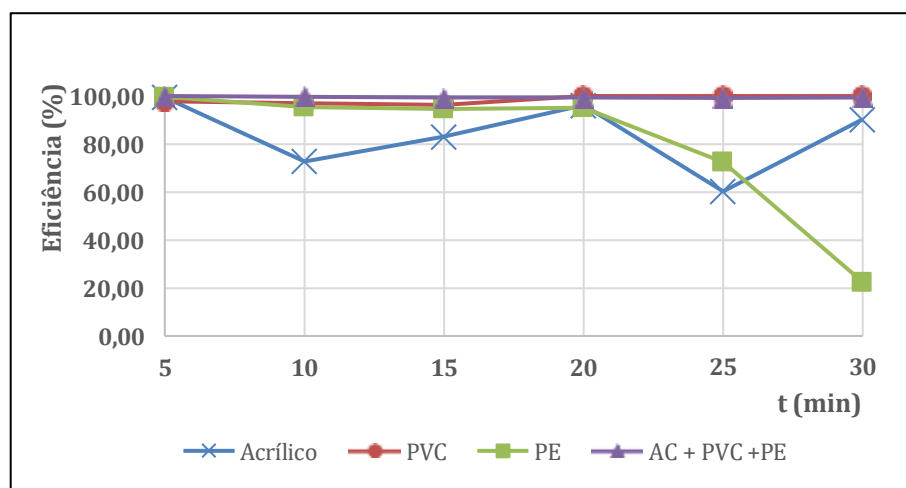
1) Acrílico: A Tabela 4.5.1 mostra que a fração recuperada no overflow (“FRM Over”) tende a aumentar com o tempo, passando de 39,08% em 5 minutos para 76,89% em 20 minutos, atingindo um pico. Posteriormente, ocorre uma queda significativa aos 30 minutos (21,50%), acompanhada por um aumento expressivo na fração recuperada no underflow (“FRM Under”), que sobe para 55,59%. Esse comportamento sugere que, com o tempo, a eficácia do hidrociclone na separação do acrílico pode ser influenciada por fatores como o desgaste da força centrífuga ou a aglomeração das partículas.

2) PVC: Na Tabela 4.5.2, observa-se um padrão diferente em relação ao acrílico. A fração recuperada no overflow varia entre 31,77% e 55,83%, sem uma tendência linear clara. Em momentos iniciais (5 e 10 minutos), o valor de “FRM Over” é relativamente baixo (37,42% e 31,77%, respectivamente), aumentando posteriormente para 41,86% aos 20 minutos e atingindo um pico aos 25 minutos (55,83%). Já a fração no underflow permanece próxima de zero, sugerindo que o PVC é melhor retido no overflow. Isso pode indicar uma maior densidade do PVC em comparação ao acrílico, facilitando sua separação na região superior do hidrociclone.

4.5.4. Eficiência do filtro de areia

A Figura 4.5.8. apresenta o perfil de desempenho do filtro de areia operando sob a pressão de 1,5 bar para os diferentes materiais testados – AC, PVC, PE e a mistura desses componentes. Os resultados demonstram a eficiência do filtro na remoção de microplásticos, evidenciando variações no desempenho em função das características físicas e químicas de cada material.

Figura 4.5.8. – Eficiência do filtro de areia com o tempo



Observou-se na Figura 4.5.8, que a eficiência do filtro de areia varia conforme o tipo de material processado, devido a fatores como densidade e tempo de operação. No caso do PE, a eficiência inicial do filtro foi de 99,62% nos primeiros 5 a 10 minutos, mas caiu para cerca de 22% ao longo do tempo. Esse declínio pode ser atribuído à saturação do filtro durante a operação em batelada, reduzindo sua capacidade de retenção de partículas.

Para o acrílico, a eficiência variou entre 60% e 99%. Essa flutuação ocorre porque, sendo um processo contínuo, o sistema pode remover uma grande quantidade de partículas nos estágios iniciais, mas a eficiência tende a oscilar ao longo do tempo devido à dinâmica de fluxo e retenção do material.

Já na operação com a mistura de MPs e PVC, o sistema manteve uma eficiência elevada e estável, variando entre 98% e 100%. Esse resultado pode ser justificado pela maior densidade e granulometria diferenciada do PVC em relação aos demais materiais, facilitando sua remoção no filtro de areia. Além disso, a presença de materiais com diferentes propriedades pode ter favorecido a distribuição das partículas no meio filtrante, reduzindo a saturação precoce e mantendo a eficiência do processo.

4.5.5. Recuperação na membrana de microfiltração

Os cálculos foram realizados tanto para as vazões obtidas na caracterização do sistema operando de forma contínua sob uma pressão de 1,5 bar quanto para as vazões das bateladas, que também foram conduzidas de maneira contínua ao longo dos experimentos. Os dados obtidos foram organizados e apresentados na Tabela 4.6., permitindo uma análise comparativa entre os diferentes regimes operacionais e auxiliando na avaliação da eficiência do sistema em distintas condições de funcionamento.

Tabela 4.6.4 – Variação da recuperação do sistema de membrana microfiltração versus os materiais de microplásticos estudados.

Material	R(%)
AC	71,23
PE	72,22
PVC	73,55
AC + PE + PVC	85,64

Os resultados apresentados na Tabela 4.6. indicam que a recuperação da membrana de microfiltração foi influenciada pelo tipo de material presente no meio filtrante. Para uma pressão de 1,5 bar, as taxas de recuperação foram de 71,23% para o AC, 72,22% para o PE e 73,55% para o PVC. No entanto, observou-se um desempenho ainda superior quando a filtração ocorreu com a mistura desses materiais, alcançando uma recuperação de 85,64%.

Esses resultados reforçam a importância da configuração híbrida do sistema, demonstrando que a combinação de diferentes materiais pode potencializar a eficiência do processo. Além disso, confirmam o papel essencial da membrana polimérica como etapa final para a remoção eficaz de microplásticos, evidenciando sua relevância dentro da estratégia integrada de tratamento da água.

6. CONCLUSÃO

- **Caraterização:**

A caracterização serviu para subsidiar todos os experimentos posteriores, utilizando com base nos dados obtidos na caracterização para o decorrer do experimento. Nessa etapa, observou o efeito da pressão versus a vazão de produção de cada componente do sistema.

- **Índice de densidade de Sedimentos (SDI) e parâmetros físico-químicos:**

O cálculo do SDI foi essencial para avaliar o potencial de entupimento das membranas, permitindo ajustes precisos para melhorar a eficiência do sistema, que se mostrou bastante significativa durante as etapas de operação. O SDI e parâmetros físico-químicos, como: cor e turbidez, foram averiguados para subsidiar informações para a quantificação do MP.

- **Quantificação através do cálculo da concentração:**

Foi observado que o hidrociclone operou com sucesso, mostrando a diminuição da concentração do microplástico em função da pressão de operação, na ordem aproximada de 50% (0,5bar), 60% (1,0 bar), 100% (1,5 bar) e 70% (2,0bar) para o experimento 3.

Em relação à eficiência total, as pressões ente 0,5 bar e 1,5 bar apresentaram melhores resultados quando se trata da remoção do microplástico pelo *underflow*, implicando um *overflow* com menos material particulado. Sob a pressão de 1,5 bar, a eficiência do *underflow* foi bem abaixo quando comparada às outras pressões.

O filtro de areia teve uma eficiência muito boa retirando cerca de 90% a 100% os microplásticos que foram liberados no overflow. Na etapa da membrana de microfiltração sob às pressões estudadas a recuperação da membrana de microfiltração aumentou em função da pressão de operação, chegando atingir 70%, com uma extração do microplástico na ordem de 100%.

- **Experimento 4: (polimetilmetacrilato – Acrílico, policloreto de vinila – PVC e a mistura (PE, AC e PVC):**

A separação do PVC foi a mais consistente ao longo do tempo, com recuperação no overflow variando entre 31,77% e 55,83%, enquanto a recuperação no underflow foi inferior a 1,60%. Para o acrílico, a recuperação no overflow aumentou progressivamente

de 39,08% aos 5 minutos para um pico de 76,89% aos 20 minutos, indicando uma separação eficiente nesse período.

Já a mistura de PE, AC e PVC apresentou um comportamento mais instável, com valores de recuperação no overflow variando entre 34,69% e 76,48%, enquanto no underflow os valores ultrapassaram 100% em alguns casos, sugerindo um acúmulo inesperado de material ou possíveis flutuações nas medições. A interação entre polímeros de diferentes densidades pode ter influenciado esse comportamento, tornando a separação menos previsível e exigindo um controle mais rigoroso dos parâmetros operacionais.

A membrana de microfiltração demonstrou ser uma etapa essencial para a retenção de partículas, especialmente quando associada a outros processos, como o hidrociclone e o filtro de areia, garantindo uma remoção mais eficiente dos contaminantes.

Os experimentos indicaram que materiais de diferentes densidades e granulometrias apresentaram comportamentos distintos ao longo do processo. O PVC, por exemplo, devido à sua maior densidade, foi mais facilmente removido na etapa inicial, enquanto o polietileno e o acrílico, de menor densidade, apresentaram maior permanência no sistema, exigindo a complementação das etapas subsequentes para uma remoção eficaz.

A mistura desses materiais resultou em um melhor desempenho do sistema, evidenciando a importância de um tratamento que considere a diversidade dos microplásticos presentes nos ambientes aquáticos. Além disso, os dados reforçam a necessidade de um sistema híbrido que combine diferentes tecnologias para maximizar a remoção de microplásticos.

REFERÊNCIAS

- ANDRADY, A. L. (2017) The plastic in microplastcs: A review. *Marine Pollution Bolletin*, 199(1) 12-12
- APHA/AWWA/WEF (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd Edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Denver.
- BARTZOKAS, A., DASSIOS, G., & KOKKALIS, E. (2012). Water Turbidity: A Review of Measurement Techniques and its Impact on Aquatic Ecosystems. *Global NEST Journal*, 14(1), 76-85.
- BROWNE, M. A., GALLOWAY, T. S., & THOMPSON, R. C. (2011). Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines. *Environmental Science & Technology*, 44(9), 3404-3409.
- CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. (2021). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- CORRADINI, F., MEZA, P., EGUILUZ, R., CASADO, F., HUERTA-LWANGA, E., & GEISSEN, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of The Total Environment*, 671, 411-420.
- COSTA, M. F., et al. (2018). Contaminação por microplásticos em corpos d'água brasileiros. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 50, 123-135.
- CRUZ, J. R. Z. O. C. D. Eficiência de um hidrociclone de geometria “rietema” para pré-filtragem de Água para irrigação. 2010.
- FRANÇA, C. L. de. (2010). *Acervos de obras de arte em plástico: perfil das coleções e propostas para conservação destes bens*. Dissertação, programa de pós-graduação em Artes da escola de belas artes, Universidade Federal de Minas Gerais, 153 p.
- FRANÇA, K. B., SILVA, A. M., & MOTA, C. R. (2015). Avaliação do Índice de Densidade de Sedimentos (SDI) para Otimização de Processos de Filtração de Água. *Engenharia Ambiental*, 12(2), 42-56.
- FRANÇA, R. A. (2020). *Eficiência de Pré-tratamentos no Sistema de Purificação de Água*. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).
- FRANÇA, R. S. (2019). *Desenvolvimento de Sistemas Híbridos para Tratamento de Água Contaminada com Microplásticos*. Universidade Federal de Campina Grande, Tese de Doutorado.
- FRANÇA, R., SILVA, M., & PEREIRA, J. (2023). Análise da Condutividade Elétrica em Soluções Aquosas. *Revista Brasileira de Química*, 34(2), 123-135.
- GALLOWAY, T. S., COLE, M., LEWIS, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1(5), 1-8.
- GEYER et al. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3, issue 7. 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700782

- HASHMI, K.A., HAMZA, H.A., WILSON, J.C. (2004). *Canmet hydrocyclone: an emerging alternative for the treatment*. Mineral Engineering, v. 17, p. 643-649.
- KOELMANS, A. A., BESSELING, E., SHIM, W. J. (2016). Nanoplastics in the Aquatic Environment: Critical Review. In M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter* (pp. 325-340). Springer.
- Lee, J.; Cheon, S.; Kim, C.; Joo, S.; Choi, K.; Jeong, D.; Lee, S.; Yoon, J. (2024). Nationwide evaluation of microplastic properties in municipal wastewater treatment plants in South Korea. *Environmental Pollution*. v. 358.
- LIMA, G. F., PEREIRA, F. R., COSTA, H. P. (2016). Parâmetros Físico-Químicos na Qualidade da Água. *Revista de Ciências Ambientais*, 12(2), 101-110.
- Martín-garcía, A. P.; Egea-corbacho, A.; Franco, A. A.; Albendín, G.; Arellano, J. M.; Rodríguez-barroso, R.; Coello, M. D.; Quiroga, J. (2022). M. Application of intermittent sand and coke filters for the removal of microplastics in wastewater. *Journal of Cleaner Production*. v. 380, p. 1-11.
- Ministério da Saúde. Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 4 maio 2021. Disponível em: <http://www.saude.gov.br/portaria888>. Acesso em: 18 jun. 2024
- MONTAGNER, C. C., DIAS, M. A., PAIVA, E. M., VIDAL, C. (2021). Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. *Microplastics: environmental occurrence and analytical challenges*. *Química Nova* 44 (10).
- OLIVEIRA-CASTRO, G. M.. Degradation of microplastics in aquatic environments: Effects of UV radiation and hydrolysis. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, 40(2), 123-135. (2018)
- PEREIRA, A. B. Estudo comparativo do desempenho de um hidrociclone, convencional e modificado, na remoção de microplásticos no meio aquoso. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, LABDES - Laboratório de Dessalinização, Campina Grande.
- PEREIRA, A. B., SANTOS, M. C. (2022). Utilização de Hidrociclones em Sistemas Híbridos para Tratamento de Águas Contaminadas. Universidade Federal de Campina Grande.
- QUEIROZ, R. M. Sistemas de membranas de microfiltração/nanofiltração e ultrafiltração/osmose inversa: uma alternativa para redução do nitrato em águas doces e salabras. 2017. p 28. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, LABDES - Laboratório de Dessalinização, Campina Grande.
- ROCHMAN, C. M., Hoh, E., HENTSCHEL, B. T., & KAYE, S. (2013). Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to five types of plastic pellets: implications for plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, v.2, 1646-1654.
- SCHNEIDER, R. P., TSUTIYA, M. T., Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso. ABES, 1ª ed., São Paulo, 2001.

- SILVA, J. F., ALMEIDA, R. T., PEREIRA, M. C. (2020). Métodos de Filtração na Remoção de Sólidos em Suspensão na Água. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*.
- SILVA, J. R. Tratamento de Efluentes: Técnicas de Remoção de Cor. São Paulo: Editora Ambiental, 2018.
- SOUZA, A. L., SILVA, C. R., OLIVEIRA, J. P. (2015). Análise da Qualidade da Água em Sistemas de Tratamento. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, 9(3), 212-220.
- SOUZA, F. R., OLIVEIRA, A. B., & SANTOS, C. D. (2018). Impact of Water Turbidity on Treatment Processes in Drinking Water Systems. *Water Research*, 45(3), 278-290.
- SVAROVSKY, L. (2000). "Hydrocyclones." Holt, Rinehart and Winston, Inc.
- TARLETON, E. S., & WAKEMAN, R. J. (2007). "Solid/Liquid Separation: Equipment Selection and Process Design." Elsevier.
- TCHOBANOGLOUS, G., BURTON, F. L., & STENSEL, H. D. (2003). "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse." McGraw-Hill Education.
- VAGAS, J. G. V., SILVA, B. V., OLIVEIRA, L. K., MOLINA, E. F. (2022). Microplásticos: uso na indústria cosmética e impactos no ambiente aquático. *Quím. Nova* 45 (06)
- Zhang, T.; Li, J.; Yang, D.; Wang, Z.; Zhao, W.; Fu, P.; Wang, H. (2024). High-efficiency microplastic removal in water treatment based on short flow control of hydrocyclone: Mechanism and performance. *Water Research*, v. 267, p. 1-11.
- Zhang, Y.; Zhou, D.; Wang, S.; Zhou, F.; Wang, G.; Su, J. (2024). Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*. v. 6, p. 1-14.

ANEXO A

BOLETIN TÉCNICO DA MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO



Módulo de Microfiltração: Alimentação Lateral

O módulo de microfiltração fabricado pela PAM Membranas Seletivas Ltda. é confeccionado com membranas de alta tecnologia de fabricação própria. Estas são produzidas com rigoroso sistema de qualidade.

A microfiltração é um método eficiente para esterilização de fluidos, pois remove 99,99% dos microorganismos (vírus e bactérias) e sólidos suspensos do fluido a ser processado. O principal mecanismo de separação com membranas de microfiltração é a exclusão por tamanho molecular. A estrutura assimétrica da membrana faz com que moléculas maiores que o poro da membrana sejam rejeitadas pela mesma, enquanto as menores passarão pela membrana permanecendo na corrente de permeado. Por proporcionar uma filtração superficial, as membranas de microfiltração da PAM Membranas Seletivas possuem baixa incrustação e consequentemente alto fluxo, o que permite a fabricação de equipamentos compactos de alta eficiência.

Propriedades Típicas da Membrana

Geometria	Cilíndrica do tipo fibra oca
Material	Polieterimida (PEI)
Camada Seletiva	Externa
Diâmetro Externo (mm)	0,95
Tamanho de Poro (μm)	0,40
Limites de pH	2 - 13

Esquema do Módulo de Microfiltração



Material de Construção	PVC
Conexão	BSP Fêmea de 1/2"
Sentido Filtração	Fora para dentro da Fibra
Pressurização	Caraça
Pressão de Operação	Depende do fluido a ser tratado
Pressão máxima de operação (kgf/cm ²)	5,0
Temperatura máxima de operação (°C)	55

PAM Membranas Seletivas Ltda.
Parque Tecnológico do Rio de Janeiro - Módulo 1
Rua do Fundão - Cidade Universitária
Rio de Janeiro - RJ - CEP 21.641-910
Tel: (21) 2741-1000 | Fax: (21) 2560-4104
pam@pamembranas.com.br
www.pamembranas.com.br



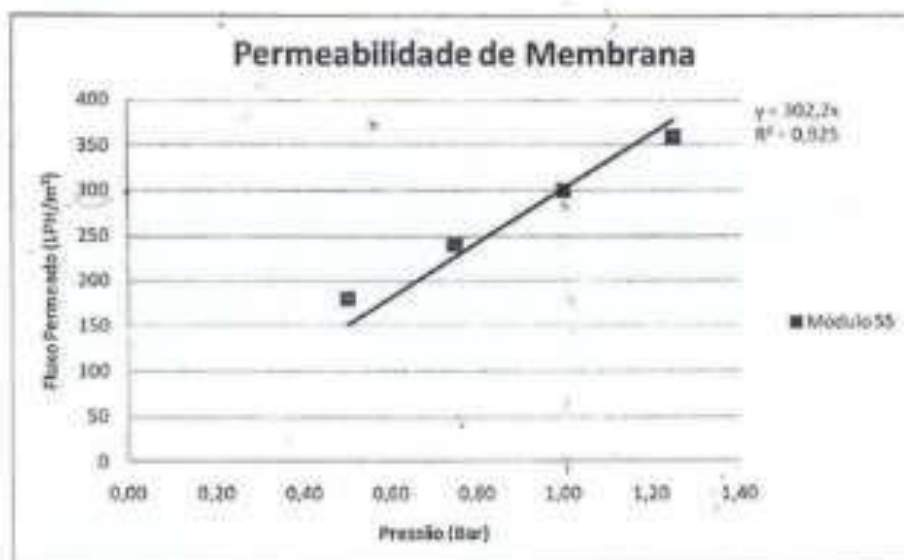
Certificado de Qualidade

1115

Propriedades do Módulo:

Identificação	0055
Processo	Microfiltração
Comprimento útil (mm)	420
Diâmetro externo (mm)	50
Empacotamento (m ³ /m ²)	800
Área de Filtração (m ²)	0,5
Permeabilidade (LPH/m ² .Bar)	

Determinação da Permeabilidade Hidráulica:



Os resultados aqui expressos retratam nossos resultados de ensaios realizados sob condições controladas, utilizando água previamente microfiltrada.

Este documento foi emitido eletronicamente pela garantia da qualidade, portanto não necessita ser assinado.

Flávio Souza
Garantia da Qualidade

Rua Paulo Teófilo Barreto, 405 CD 6A
Parque Tecnológico Estácio MP, Módulo 1
Itaó da Pinda | Cidade Universitária
Rio de Janeiro - RJ | CEP: 21.541-475
Tel: (21) 2123-1850 | Fax: (21) 2585-4334
pam@par-membranas.com.br
www.par-membranas.com.br

ANEXO B

BOLITIN TECNICO DAS BOMBAS CENTRIFUGA USADAS NO SISTEMA

- **BOMBA DE ALIMENTAÇÃO DO HIDOCICLONE**

**Características Técnicas**

- Potência: 3 CV;
- Estágios: 1;
- Tensão: 220V/380V;
- Sucção (Entrada): 2.1/2 pol. (bsp);
- Recalque (Saída): 2.1/2 pol. (bsp);
- Vazão máxima: 36.800 L/h para 6 metros (mca);
- Vazão mínima: 10.900 L/h para 26 metros (mca);
- Altura máxima de sucção: 8 m;
- Motor: Weg (IP21);
- Rotação: 3.500 rpm (2 Pólos);
- Carcaça: Ferro fundido;
- Rotor: Alumínio - 127mm;
- Eixo: Inox;
- Selo mecânico: Aço inox;
- Temperatura máxima: 70°C.

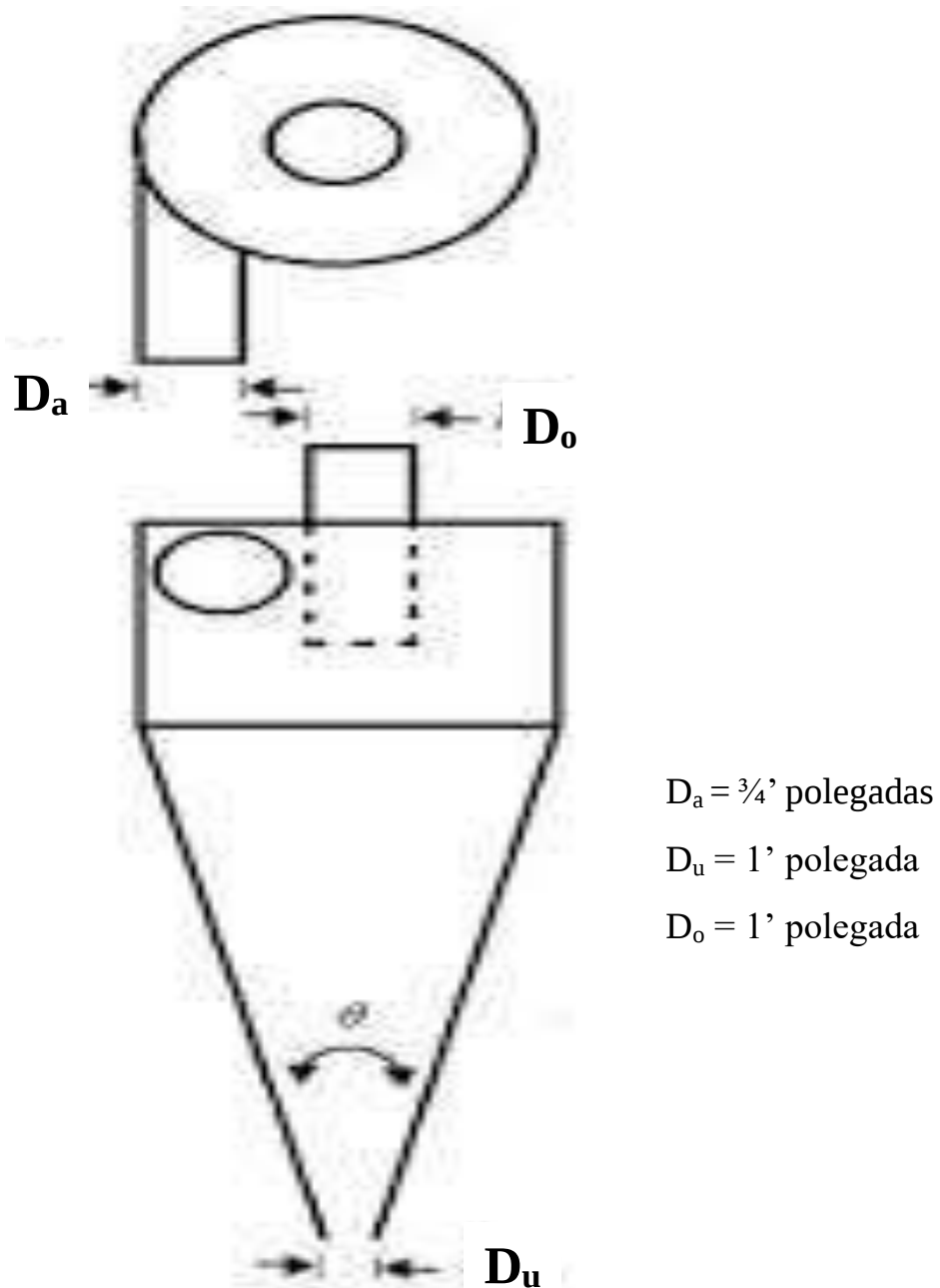
- **BOMBA AUXILIAR DA MEMBRANA POLIMERICA**

**Características Técnicas**

- Potência: 1 CV;
- Tensão: 110V/220V;
- Sucção (Entrada): 1.1/2 pol. (bsp);
- Recalque (Saída): 1 pol. (bsp);
- Vazão máxima: 11.500 l/h para 12 mca(metros);
- Vazão mínima: 1.600 l/h para 28 mca(metros);
- Motor: Hércules (IP21);
- Rotação: 3.500 rpm (2 Pólos);
- Carcaça: Alumínio;
- Rotor: Alumínio (Fechado);
- Eixo: Aço carbono;
- Temperatura máxima permitida: 80°C.

ANEXO C

DIMENSÕES DO HIDROCICLONE



D_a – Diâmetro da alimentação

D_u – Diâmetro da *underflow*

D_o – Diâmetro do *overflow*

ANEXO D**BOLETIN TÉCNICO DO FILTRO DE AREIA**

Capacidade de filtragem	17000 L
Tipos de filtros	De areia
Tipos de piscinas adequadas	Jacuzzi
É portátil	Não
Quantidade de vias	6
Material	Fibra de vidro

Marca	Dancor
Modelo	Dancor DFR 11 - Sem Bomba



As especificações do boletim técnico completa e manual podem ser retiradas através do link: https://www.dancor.com.br/wp-content/uploads/2023/01/manual-filtro_com_carrinho.pdf

ANEXO E

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO

Protocolo N°:	Localidade:	Profundidade da coleta: ---
Interessado:	Local de coleta/Procedência: Abastecimento	Data da entrega: 05/09/2024
CPF/CNPJ:	Data da coleta: 05/09/2024	Hora da entrega: 16:40
Endereço:	Hora da coleta: Não informado	Tipo de frasco: Frasco plástico
Município:	Responsável pela coleta:	Data da Análise: 06/09/2024

LAUDO ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

6.1.1 Parâmetro	7 Método	8 Limite mínimo de 9 detecção	10 Resultados	Valor de referência(*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25°C	2510 B	0,1	360,8	Não estabelecido
11 Potencial Hidrogeniônico a 25,0°C, pH	Potenciométrico	0,1	7,3	6,0 a 9,0
Turbidez, (uT)	2130 B	0,1	0,8	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	2120 C	1,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca^{2+}), mg/L	3500-Ca	0,1	20,3	Não estabelecido
Dureza em Magnésio (Mg^{2+}), mg/L	3500-Mg	0,1	10,9	Não estabelecido
12 Dureza Total (CaCO_3), mg/L	2340-C	0,1	96,1	300,0
Sódio (Na^+), mg/L	3500-Na B	0,1	21,8	200,0
Potássio (K^+), mg/L	3500-K B	0,1	4,7	Não estabelecido
Alumínio (Al^{3+}), mg/L	3500-Al B	0,01	0,01	0,2
Ferro Total, mg/L	3500-Fe B	0,01	0,03	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO_3)	2320 B	0,1	0,0	Não estabelecido
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO_3)	2320 B	0,1	0,0	Não estabelecido
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO_3)	2320 B	0,1	68,0	Não estabelecido
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO_3)	2320 B	0,1	68,0	Não estabelecido
CO_2 livre, mg/L	4500- CO_2 C	0,1	4,4	Não estabelecido

SO_4^{2-}), mg/L	Sulfato (SO_4^{2-})	4500-SO ₄ ²⁻ E	0,1	5,2	250,0
PO_4^{3-}), mg/L	Fosfato	4500-P C	0,1	0,3	Não estabelecido
Cl ⁻), mg/L	Cloreto (Cl ⁻)	4500-Cl ⁻ B	0,1	67,5	250,0
NO ₃ ⁻), mg/L	Nitrato N-	4500-NO ₃ ⁻ H	0,01	0,06	10,0
Amônia (N-NH ₃), mg/L		Colorimétrico	0,01	0,47	1,2
Sílica, mg/L (SiO ₂)		4500-SiO ₂ C	0,1	9,4	Não estabelecido
ILS (Índice de Saturação de Langelier)		Calculado	-	-1,07	Não estabelecido
STD (Sólidos Totais Dissolvidos), mg/L		2540 C	0,1	227,6	500,0

(*)Valor de referência estabelecido pela Legislação Brasileira (**Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde**).

Observações:

- 1- Análises realizadas de acordo com: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (24th Edition)*
- 2- Os resultados emitidos se referem única e exclusivamente à amostra analisada neste laboratório.
- 3- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.
- 4- A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.
- 5- Este laudo não pode ser reproduzido sem a aprovação do LABDES, exceto se for reproduzido na íntegra.

Prof. Kepler Borges França (PhD)

Químico responsável

(CRQ – 9.19.3.1303118)

APÊNDICE

APÊNDICE A - Análises de cor, turbidez, pH/T°C e condutividade elétrica (k) da 1º, 2º e 3º batelada, do experimento 1, realizado no sistema híbrido.

PARÂMETROS 1º BATELADA (MICROPLASTICO) P=0,5 BAR																
Tempo (min)	Cor				Turbidez (NTU)				pH/T°C				Cond. Elétrica K (µS/cm)			
	Al.	HC	F.A.	Memb.	Al.	HC	F.A.	Memb.	Al.	HC	F.A.	Memb.	Ali.	HC	F.A.	Memb.
0	52	---	---	---	17,60	---	---	---	8,30	---	---	---	394,90	---	---	---
5	44	31	18	7	12,54	6,80	3,40	1,58	8,30	8,30	8,30	8,30	380,70	396,40	396,70	394,60
10	34	12	7	3	10,14	2,50	1,20	0,66	8,30	8,20	8,30	8,30	391,00	385,30	391,80	389,50
15	25	13	9	0	7,80	1,80	1,20	0,41	8,20	8,10	8,10	8,10	384,00	389,50	385,90	378,70
20	20	7	7	0	5,00	1,00	1,00	0,58	8,20	8,20	8,30	8,20	382,60	384,90	387,90	382,00
25	10	4	0	0	4,12	0,65	0,67	0,41	8,20	8,10	8,10	8,10	392,80	383,00	386,00	380,00
30	10	3	0	0	2,14	0,62	0,46	0,40	8,20	8,10	8,10	8,00	389,60	380,10	378,00	374,00
Informações																
Volume T		250,0 cm³														
Tempo		30 min														
Concentração do microplástico		0,83 g/L														
Volume Utilizado		150 L														

Al. – Alimentação

HC – Hidrociclone

F.A – Filtro de Areia

Memb. – Membrana de microfiltração

PARÂMETROS 2º BATELADA (MICROPLASTICO) P=1,0 BAR																
Tempo (min)	Cor				Turbidez (NTU)				pH/TºC				Cond. Elétrica K (µS/cm)			
	Al.	HC	F.A.	Memb.	Al.	HC	F.A.	Memb.	Al.	HC	F.A.	Memb.	Ali.	HC	F.A.	Memb.
0	100	---	---	---	109,00	---	---	---	8,80	---	---	---	502,00	---	---	---
5	69	88	20	7	74,00	64,00	11,10	0,25	8,60	8,60	8,60	8,60	494,30	494,50	485,80	490,80
10	39	47	17	6	36,00	28,00	7,40	0,35	8,60	8,60	8,50	8,50	492,50	495,00	492,50	493,50
15	23	24	11	6	17,70	12,90	2,80	0,32	8,60	8,50	8,40	8,40	488,90	490,00	490,90	491,70
20	17	17	14	7	10,00	9,30	1,09	0,26	8,50	8,40	8,30	8,40	493,00	487,10	487,00	483,70
25	14	10	8	5	5,70	3,50	1,21	0,28	8,00	8,20	8,10	8,10	488,30	495,20	492,00	486,00
30	14	12	10	3	4,20	3,30	0,82	0,11	8,10	8,20	8,10	8,10	488,00	484,40	491,00	484,70
Informações																
Volume T			250,0 cm³													
Tempo			30 min													
Concentração do microplástico			0,83 g/L													
Volume Utilizado			150 L													
					Al. – Alimentação											
					HC – Hidrociclone											
					F.A – Filtro de Areia											

Al. – Alimentação

HC – Hidrociclone

F.A – Filtro de Areia

Memb. – Membrana de microfiltração

PARÂMETROS 3º BATELADA (MICROPLASTICO) P=1,5 BAR																
Tempo (min)	Cor				Turbidez (NTU)				pH/TºC				Cond. Elétrica K (µS/cm)			
	Al.	HC	F.A.	Memb.	Al.	HC	F.A.	Memb.	Al.	HC	F.A.	Memb.	Ali.	HC	F.A.	Memb.
0	88	---	---	---	70,12	---	---	---	8,80	---	---	---	540,70	---	---	---
5	55	40	20	6	50,00	44,33	10,00	0,33	8,60	8,60	8,50	8,70	490,09	493,50	490,00	493,80
10	44	33	18	5	33,44	25,60	7,40	0,25	8,60	8,50	8,50	8,60	492,78	490,80	488,90	490,00
15	29	25	11	5	16,00	10,00	3,78	0,33	8,40	8,40	8,30	8,40	480,00	478,00	478,90	491,60
20	17	12	12	6	12,11	8,90	2,00	0,23	8,30	8,20	8,10	8,00	475,50	480,00	485,60	484,60
25	10	10	7	3	4,55	3,30	2,01	0,14	8,00	8,00	7,90	7,90	481,80	478,60	475,00	488,00
30	7	8	7	0	3,30	3,12	1,88	0,09	7,70	7,80	7,70	7,60	477,80	480,00	478,80	477,70
Informações																
Volume T			250,0 cm³													
Tempo			30 min													
Concentração do microplástico			0,83 g/L													
Volume Utilizado			150 L													
					Al. – Alimentação											
					HC – Hidrociclone											

Al. – Alimentação

HC – Hidrociclone

F.A – Filtro de Areia

Memb. – Membrana de microfiltração

APÊNDICE B - Análises de cor, turbidez, pH/T°C e condutividade elétrica (k) da 4º, 5º e 6º batelada, do experimento 2, realizado no sistema híbrido.

PARÂMETROS 4º BATELADA (MICROPLASTICO) P=0,5 BAR																									
Tempo (min)	Cor						Turbidez (NTU)						pH/T°C						Cond. Elétrica K (µS/cm)						
	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	
0	89	--	--	--	--	--	55,0	--	--	--	--	--	8,0	--	--	--	--	--	390,0	--	--	--	--	--	
10	67	60	52	3	1	0	50,0	44,3	44,0	3,0	0,3	0,3	8,0	7,8	7,8	7,7	7,7	7,4	391,0	374,0	377,0	370,0	379,0	380,0	
20	60	51	49	2	0	0	50,0	43,0	39,0	3,3	0,3	0,3	7,7	7,7	7,7	7,6	7,5	7,3	381,0	379,0	378,0	376,0	373,0	372,0	
30	58	39	36	0	0	0	51,0	44,0	35,0	2,1	0,2	0,2	8,0	7,9	7,7	7,6	7,3	7,4	388,2	378,7	389,7	375,0	374,0	379,0	
40	46	38	32	3	1	0	49,0	40,0	33,0	2,0	0,2	0,2	7,9	8,0	7,9	7,5	7,0	7,3	377,0	378,0	372,0	378,0	370,0	371,0	
50	47	37	32	1	0	0	45,0	39,0	33,0	1,1	0,1	0,2	8,0	7,9	7,6	7,6	7,0	7,3	384,0	379,0	380,0	370,1	377,0	380,0	
60	41	31	28	2	0	0	43,0	35,0	32,0	1,0	0,3	0,2	7,9	7,7	7,7	7,5	7,1	7,2	379,0	373,3	375,0	375,0	380,0	377,0	
70	38	32	27	5	0	0	39,0	33,0	29,0	1,1	0,3	0,1	7,8	7,8	7,7	7,5	7,0	7,3	378,0	370,0	376,0	373,0	377,0	375,0	
80	30	30	23	1	3	0	38,0	30,0	25,0	0,8	0,4	0,0	7,8	7,9	7,8	7,6	7,0	7,0	377,0	379,0	373,0	378,0	370,0	371,0	
90	28	27	19	2	0	0	37,0	29,0	20,0	0,3	0,3	0,0	7,7	7,8	7,6	7,5	7,2	7,0	380,0	375,0	371,0	372,0	367,0	370,0	
100	27	26	16	0	0	0	35,0	27,0	16,0	0,2	0,0	0,0	8,0	7,7	7,7	7,7	7,0	7,1	380,0	374,0	377,0	375,7	368,0	370,0	
110	28	24	14	0	2	0	33,0	19,0	10,0	0,1	0,0	0,0	7,6	7,7	7,6	7,7	6,9	6,9	377,0	378,0	372,0	378,0	370,0	371,0	
120	29	20	10	0	0	0	30,0	17,0	5,0	0,1	0,0	0,0	7,5	7,4	7,5	7,5	6,9	7,0	388,2	378,7	389,7	375,0	374,0	379,0	
Água alimentação (Dessalinizada)																									
Cor						Turbidez (NTU)						K (uS/cm)				pH/T°C									
0,00						0,78						355,00				8,00				Al. – Alimentação					
Informações																									
Volume T						2000,0 cm³						Hid. Under – Hidrociclone Underflow													
Tempo						120 min						Hid. Over - Hidrociclone Overflow													
Concentração do microplastico						1,66 g/L						F.A – Filtro de Areia													
Volume Utilizado						2000 L						Memb. Conc – Concentrado da membrana													

Al. – Alimentação

Hid. Under – Hidrociclone Underflow

Hid. Over - Hidrociclone Overflow

F.A – Filtro de Areia

Memb. Conc – Concentrado da membrana

Memb. Perm. – Permeado da membrana

PARÂMETROS 5º BATELADA (MICROPLASTICO) P=1,0 BAR																									
Tempo (min)	Cor						Turbidez (NTU)						pH/T°C						Cond. Elétrica K (µS/cm)						
	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	
0	60	--	--	--	--	--	77,0	--	--	--	--	--	8,0	--	--	--	--	--	391,0	--	--	--	--	--	
10	51	38	27	3	1	0	70,0	58,0	53,0	1,3	2,0	0,3	7,8	7,4	7,0	7,0	6,9	6,8	390,0	374,1	380,0	370,0	380,0	380,0	
20	50	36	20	2	0	0	71,0	57,0	53,0	0,5	0,3	0,3	7,0	7,3	7,0	7,1	7,1	6,9	387,0	378,0	377,0	374,0	375,0	377,0	
30	47	36	23	0	0	0	68,0	39,0	39,0	0,3	0,2	0,2	6,7	6,8	7,1	6,9	7,0	7,0	390,0	380,0	381,0	371,0	373,0	370,0	
40	51	30	18	1	2	0	61,0	38,0	35,0	0,3	0,2	0,2	6,7	7,0	7,0	6,9	6,9	6,5	380,0	378,4	378,0	375,0	373,1	371,0	
50	43	27	16	0	0	0	59,0	39,0	30,0	0,2	0,1	0,2	7,1	7,0	6,8	6,9	6,8	6,7	384,0	379,0	380,0	370,1	377,0	380,0	
60	35	21	16	2	0	0	39,0	31,0	27,0	0,1	0,3	0,2	6,7	6,8	6,7	6,8	6,6	6,4	379,0	373,3	375,0	375,0	380,0	377,0	
70	33	20	12	5	0	0	34,0	28,0	24,0	0,3	0,3	0,1	6,9	6,7	7,0	6,9	6,7	6,5	378,0	370,0	376,0	373,0	377,0	375,0	
80	28	17	10	3	3	0	30,0	27,0	22,0	0,1	0,4	0,1	6,5	6,9	6,5	7,0	6,9	6,3	377,0	370,5	374,0	374,0	372,0	376,0	
90	23	15	12	0	0	0	33,0	23,0	22,0	0,1	0,3	0,1	7,0	7,0	6,4	6,5	7,0	6,5	380,0	375,0	371,0	372,0	367,0	370,0	
100	20	15	8	2	0	0	29,0	20,0	17,0	0,1	0,3	0,1	7,3	7,0	6,5	6,7	7,0	6,6	380,0	374,0	377,0	375,7	368,0	370,0	
110	20	11	7	1	2	0	22,0	18,0	15,0	0,1	0,3	0,0	7,0	7,1	6,9	6,5	6,9	6,7	377,0	378,0	372,0	378,0	370,0	371,0	
120	13	11	6	0	0	0	18,0	17,0	10,0	0,1	0,3	0,0	7,8	7,0	6,9	7,0	6,9	6,6	381,0	379,0	378,0	376,0	373,0	372,0	
Água alimentação (Dessalinizada)													Al. – Alimentação Hid. Under – Hidrociclone Underflow Hid. Over - Hidrociclone Overflow												
Cor						Turbidez (NTU)			K (uS/cm)		pH/T°C														
0,00						0,78			355,00		8,00														
Informações																									
Volume T						2000,0 cm³																			
Tempo						120 min																			
Concentração do microplastico						1,66 g/L																			
Volume Utilizado						2000 L																			

PARÂMETROS 5º BATELADA (MICROPLASTICO) P=1,0 BAR																									
Tempo (min)	Cor						Turbidez (NTU)						pH/T°C						Cond. Elétrica K (µS/cm)						
	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	Al.	Hid. Under	Hid. Over	F.A.	Memb. Conc	Memb. Perm.	
0	89	--	--	--	--	--	55,0	--	--	--	--	--	8,0	--	--	--	--	--	390,0	--	--	--	--	--	
10	67	60	52	3	1	0	50,0	44,3	44,0	3,0	0,3	0,3	8,0	7,8	7,8	7,7	7,7	7,4	391,0	374,0	377,0	370,0	379,0	380,0	
20	60	51	49	2	0	0	50,0	43,0	39,0	3,3	0,3	0,3	7,7	7,7	7,7	7,6	7,5	7,3	381,0	379,0	378,0	376,0	373,0	372,0	
30	58	39	36	0	0	0	51,0	44,0	35,0	2,1	0,2	0,2	8,0	7,9	7,7	7,6	7,3	7,4	388,2	378,7	389,7	375,0	374,0	379,0	
40	46	38	32	3	1	0	49,0	40,0	33,0	2,0	0,2	0,2	7,9	8,0	7,9	7,5	7,0	7,3	377,0	378,0	372,0	378,0	370,0	371,0	
50	47	37	32	1	0	0	45,0	39,0	33,0	1,1	0,1	0,2	8,0	7,9	7,6	7,6	7,0	7,3	384,0	379,0	380,0	370,1	377,0	380,0	
60	41	31	28	2	0	0	43,0	35,0	32,0	1,0	0,3	0,2	7,9	7,7	7,7	7,5	7,1	7,2	379,0	373,3	375,0	375,0	380,0	377,0	
70	38	32	27	5	0	0	39,0	33,0	29,0	1,1	0,3	0,1	7,8	7,8	7,7	7,5	7,0	7,3	378,0	370,0	376,0	373,0	377,0	375,0	
80	30	30	23	1	3	0	38,0	30,0	25,0	0,8	0,4	0,0	7,8	7,9	7,8	7,6	7,0	7,0	377,0	379,0	373,0	378,0	370,0	371,0	
90	28	27	19	2	0	0	37,0	29,0	20,0	0,3	0,3	0,0	7,7	7,8	7,6	7,5	7,2	7,0	380,0	375,0	371,0	372,0	367,0	370,0	
100	27	26	16	0	0	0	35,0	27,0	16,0	0,2	0,0	0,0	8,0	7,7	7,7	7,7	7,0	7,1	380,0	374,0	377,0	375,7	368,0	370,0	
110	28	24	14	0	2	0	33,0	19,0	10,0	0,1	0,0	0,0	7,6	7,7	7,6	7,7	6,9	6,9	377,0	378,0	372,0	378,0	370,0	371,0	
120	29	20	10	0	0	0	30,0	17,0	5,0	0,1	0,0	0,0	7,5	7,4	7,5	7,5	6,9	7,0	388,2	378,7	389,7	375,0	374,0	379,0	
Água alimentação (Dessalinizada)													Al. – Alimentação Hid. Under – Hidrociclone Underflow Hid. Over - Hidrociclone Overflow F.A – Filtro de Areia Memb. Conc – Concentrado da membrana Memb. Perm. – Permeado da membrana												
Cor						Turbidez (NTU)			K (uS/cm)		pH/T°C														
0,00						0,78			355,00		8,00														
Informações																									
Volume T						2000,0 cm³																			
Tempo						120 min																			
Concentração do microplastico						1,66 g/L																			
Volume Utilizado						2000 L																			

APÊNDICE C – FRAÇÃO RECUPERADA NO HIDROCICLONE

Tempo	Fração Recuperada (%) vs Tempo (min)			
	Overflow			
	0,5 bar	1,0 bar	1,5 bar	2,0 bar
5	30,00	35,38	56,20	29,73
10	36,84	-	40,00	20,75
15	55,20	33,71	5,95	23,40
20	55,10	100,00	0,00	24,44
25	53,85	-	0,00	25,00
30	72,73	-	0,00	32,35

Tempo	Fração Recuperada (%) vs Tempo (min)			
	Underflow			
	0,5 bar	1,0 bar	1,5 bar	2,0 bar
5	70,00	64,62	43,80	70,27
10	63,16	-	60,00	79,25
15	44,80	66,29	94,05	76,60
20	44,90	0,00	100,00	75,56
25	46,15	-	100,00	75,00
30	27,27	-	100,00	67,65

APÊNDICE D – EFICIÊNCIA TOTAL DO HIDROCICLONE

0,5 bar	
Eficiência Total (%)	
Underflow	Overflow
30,00	15,00
30,00	15,00
24,00	24,00
20,00	30,00
24,00	24,00
13,33	40,00
20,00	30,00
0,00	60,00
0,00	60,00
0,00	60,00
-	-
-	-

1,0 bar		1,5 bar		2,0 bar	
Eficiência Total (%)		Eficiência Total (%)		Eficiência Total (%)	
Underflow	Overflow	Underflow	Overflow	Underflow	Overflow
31,92	17,48	20,76	26,64	14,29	6,04
-	-	25,88	17,25	14,69	3,85
33,15	16,85	34,12	2,16	14,57	4,45
0,00	33,71	35,29	0,00	14,53	4,70
-	-	35,29	0,00	14,51	4,84
-	-	35,29	0,00	14,15	6,77