



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

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE HIDROCICLONES,
CONVENCIONAL E MODIFICADO, NA REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICOS
EM MEIO AQUOSO**

ADRIANA BARBOSA DA COSTA PEREIRA

Campina Grande - PB, Setembro de 2022

Adriana Barbosa da Costa Pereira

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE HIDROCICLONES,
CONVENCIONAL E MODIFICADO, NA REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICOS
EM MEIO AQUOSO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito e em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Química.

Orientadores:

Prof. Kepler Borges França (PhD)

Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Campina Grande - PB, Setembro de 2022

P436e Pereira, Adriana Barbosa da Costa.
Estudo comparativo do desempenho de hidrociclones, convencional e modificado, na remoção de microplásticos em meio aquoso. / Adriana Barbosa da Costa Pereira. - Campina Grande, 2022.
97 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.
"Orientação: Prof. Dr. Kepler Borges França, Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto"
Referências.

1. Processos Químicos. 2. Microplásticos. 3. Hidrociclones. 4. Eficiência de Separação. I. França, Kepler Borges. II. Farias Neto, Severino Rodrigues de. III. Título.

CDU 66.011(043)

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE HIDROCICLONES,
CONVENCIONAL E MODIFICADO, NA REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICOS
EM MEIO AQUOSO**

Adriana Barbosa da Costa Pereira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito e em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Química.

Aprovada em 06/ 09/ 2022, pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Luis Gonzaga Sales Vasconcelos

Prof. Dr. Antonio Tavernard Pereira Neto

Prof. Dr. Sidinei Kleber da Silva

Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira

Prof. Kepler Borges França (PhD)

Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
UNIDADE ACADEMICA DE ENGENHARIA QUIMICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900
Telefone: (83) 2101-1100
Site: <http://cct.ufcg.edu.br>

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA, REALIZADA EM 06 DE SETEMBRO DE 2022

(Nº 128)

CANDIDATO(A): **Adriana Barbosa da Costa Pereira**. COMISSÃO EXAMINADORA: Luis Gonzaga Sales Vasconcelos, Prof., Dr., UFCG/ **Presidente da Sessão e Examinador Interno**, Kepler Borges França, Prof., Dr., UFCG/ **Orientador**, Severino Rodrigues de Farias Neto, Prof. Dr., UFCG/ **Orientador**, Antonio Tavernard Pereira Neto, Prof., Dr., UFCG/ Examinador Interno, Sidinei Kleber da Silva, Prof., Dr., UFCG/ Examinador Externo, Fernando Fernandes Vieira, Prof., Dr., UEPB/ Examinador Externo. TITULO DA TESE: "**Estudo Comparativo do Desempenho de Hidrociclones, Convencional e Modificado, na Remoção de Micropásticos em Meio Aquoso**". ÁREA CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos Químicos - HORA DE INÍCIO: **09:00 horas** – LOCAL: **Auditório do LABDES - UFCG**. Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, sendo **APROVADO**. Face à aprovação, declara o(a) Presidente da Comissão, achar-se a examinada, legalmente habilitado a receber o **Grau de Doutor**, no domínio da Engenharia Química, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como direito, providenciar a expedição do Diploma, o que a mesma faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Maricé Pereira de Araújo - Secretária - do PPGEQ e os membros da Comissão Examinadora e o(a) candidato(a). Campina Grande, 06 de setembro de 2022.

Maricé Pereira de Araújo

Secretária

Luis Gonzaga Sales Vasconcelos, Prof., Dr., UFCG

Presidente da Comissão e Examinador Interno

Kepler Borges França, Prof., Dr., UFCG

Orientador

Severino Rodrigues de Farias Neto, Prof., Dr., UFCG
Orientador

Antonio Tavernard Pereira Neto, Prof., Dr., UFCG
Examinador Interno

Sidinei Kleber da Silva, Prof., Dr., UFCG
Examinador Externo

Fernando Fernandes Vieira, Prof., Dr.,UEPB
Examinador Externo

Adriana Barbosa da Costa Pereira
Candidata



Documento assinado eletronicamente por **SEVERINO RODRIGUES DE FARIAS NETO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/09/2022, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUIS GONZAGA SALES VASCONCELOS, PROFESSOR 3 GRAU**, em 06/09/2022, às 18:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARICE PEREIRA DA SILVA, SECRETÁRIA**, em 08/09/2022, às 08:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Barbosa da Costa, Usuário Externo**, em 09/09/2022, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **SIDINEI KLEBER DA SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 13/09/2022, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANTONIO TAVERNARD PEREIRA NETO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 14/09/2022, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **KEPLER BORGES FRANCA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2022, às 14:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2675434** e o código CRC **FEEF205B**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Socorro e Adalberto. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que trabalha incansavelmente para que eu enxergue minha coragem, o lindo caminho que trilhei e trilho e também minhas falhas, para que me torne uma pessoa melhor a cada dia.

Aos meus pais, Adalberto e Socorro, meus maiores exemplos de coragem e maiores incentivadores do estudo, que mesmo diante as dificuldades me apoiaram em cada projeto e deram junto comigo cada passo. Essa conquista não seria possível sem vocês, essa conquista é para vocês.

A minha irmã, Adriele, minha dupla, que sempre me deixa fazer e ser parte de sua vida. Ao poder lhe ajudar com o pouco que aprendi nessa caminhada mal sabe você que é a mim que presenteia.

Ao meu marido, Leonardo, que é sinônimo de parceria e aconchego (seja longe ou perto), autor do “força, baixinha!” e parte dessa força. Sou grata a Deus por me permitir partilhar a vida com você, que é lar e sempre me fará querer ficar.

Aos meus sogros, José Pereira e Francisca, por me presentear com uma segunda família, por toda ajuda nessa caminhada e pelo carinho de sempre.

Ao professor Kepler, por me acolher em sua família LABDES e não medir esforços para que essa pesquisa acontecesse, obrigada por todos os ensinamentos nessa jornada do doutorado.

Ao professor Severino, que foi o primeiro professor a me apresentar a pesquisa em 2010, e desde então me auxilia nesse caminho com seus ensinamentos. Pessoa e profissional exímio.

Aos meus amigos de longa data, do LABDES e do LPFI pela ajuda e momentos de descontração, nesse caminho lindo e desafiador.

A Capes, pelo apoio financeiro.

*“Por isso não tema, pois estou com você;
não tenha medo, pois sou o seu Deus. Eu o
fortalecerei e o ajudarei; eu o segurarei
com a minha mão direita vitoriosa”*

- Isaías 41:10

RESUMO

Pesquisas recentes apontam para os possíveis riscos quanto a ingestão de microplásticos e nanoplásticos por seres humanos e animais, confirmadas pela presença destes na corrente sanguínea por exemplo, como mostrou a pesquisa realizada na Universidade Amsterdã, na Holanda, e publicada em 2022 na revista *Environment International*, ao analisar amostras do sangue de 22 doadores. Esses materiais são largamente utilizados na indústria farmacêutica (presentes em cosméticos), e podem ser originados de tecidos, pneus, entre outros. Diante a problemática, esforços vêm sendo demandados objetivando a identificação dos MP e NP no ambiente (terrestre, aquático e no ar), seu tratamento e remoção, este último envolvendo pesquisas ainda incipientes, mas de tamanha importância para redução da exposição da biota aos microplásticos e seus danos. O presente trabalho tem por objetivo o estudo de duas configurações de hidrociclones em sistema de bancada, na separação de microplásticos no meio aquoso. A remoção de microplásticos do tipo polietileno (PE) numa concentração mínima de 0,83g/L é avaliada na presente pesquisa por meio de hidrociclones construídos em material de baixo custo e manutenção. Os resultados avaliados para duas configurações do equipamento e seis condições de alimentação cada, apontaram uma remoção entre 70% a 93% do microplásticos polietileno (PE) presente no afluente alimentado ao sistema, sendo maiores taxas de remoção para o MP conseguidas para uma configuração denominada no presente trabalho de hidrociclone convencional. A segunda proposta de configuração do equipamento, denominada de hidrociclone modificado (HM), contou com alteração geométrica da seção interna da saída overflow, o *vortex finder*, tendo o HM apresentando boas capacidades de processamento de suspensão com menores pressões de alimentação. Por meio do estudo comparativo para os sistemas hidrociclone, uma capacidade de processamento de 48L/min permitiu maior remoção dos MP em ambos os sistemas, maior eficiência de separação de polietileno no HC e o hidrociclone modificado como configuração de hidrociclone concentrador (face ao convencional, pela análise da razão de fluido produzida nos equipamentos). Uma análise estatística por gráfico de pareto apresentou a magnitude de cada fator estudado, configurações do hidrociclone e vazões de operação, sendo a modificação do *vortex* a variável independente de maior significância e influência sob o processo para o estudo desenvolvido.

Palavras-chave: Microplásticos; Hidrociclones; Eficiência de Separação.

ABSTRACT

Recent research points to possible risks regarding the ingestion of microplastics and nanoplastics by humans and animals, confirmed by their presence in their blood sample, for example, as shown by research conducted at the University of Amsterdam in the Netherlands and published in 2022 in the journal *Environment International*, by analyzing blood samples from 22 donors. These materials are widely used in the pharmaceutical industry (present in cosmetics), and can originate from fabrics, tires, among others. In face of this problem, efforts have been demanded aiming the identification of MP and NP in the environment (terrestrial, aquatic and air), their treatment and removal, latter including research still. The present work aims to study two configurations of hydrocyclones in a benchtop system, in the separation of microplastics in aqueous medium. The removal of polyethylene (PE) microplastics in a minimum concentration of 0.83g/L is evaluated in the present research by means of hydrocyclones made of low cost and low maintenance material. The results evaluated for two configurations of the equipment and six feeding conditions each, pointed out a removal between 70% to 93% of the polyethylene microplastic (PE) present in the affluent fed to the system, being higher removal rates for PM achieved for a configuration named in the present work as conventional hydrocyclone. The second proposed configuration of the equipment, called modified hydrocyclone (HM), counted on geometric changes in the internal section of the overflow outlet, the vortex finder, and the HM presented good suspension processing capabilities with lower feed pressures. Through the comparative study for the hydrocyclone systems, a processing capacity of 48L/min allowed higher removal of MP in both systems, higher separation efficiency of polyethylene in the HC, and the modified hydrocyclone as a concentrator hydrocyclone configuration (versus the conventional one, by analyzing the fluid ratio produced in the equipment). A statistical analysis by pareto chart showed the magnitude of each factor studied, hydrocyclone configurations and operating flows, with the modification of the vortex being the independent variable of greatest significance and influence on the process for the study developed.

Keywords: Microplastics; Hydrocyclones; Separation Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transformados plásticos em milhões de toneladas.....	21
Figura 2 - Representação do escoamento interno aos hidrociclones.	28
Figura 3 - Componentes da velocidade em seção do hidrociclone: tangencial (v_{θ}), axial (v_a) e velocidade radial (v_r).....	29
Figura 4 - Perfil de velocidade axial em hidrociclone.....	30
Figura 5 - Perfil de velocidade tangencial em hidrociclone.	31
Figura 6 - Perfil de velocidade radial em hidrociclone.	32
Figura 7 - Zonas de escoamento secundário no interior do hidrociclone.	33
Figura 8 - Fluxograma do Hidrociclone Convencional e/ou Modificado.	43
Figura 9 - Dimensões do hidrociclone convencional.	46
Figura 10 – Hidrociclone em PVC (a) Partes cônicas do hidrociclone; (b) Parte superior cilíndrica com destaque para entrada tangencial; (c) Hidrociclone após montagem (sem constar com a saída overflow).	47
Figura 11 – Hidrociclone modificado (a) Saída superior roscável; (b) <i>Vortex II</i> confeccionado e (c) Montagem do HM.	48
Figura 12 - Desenho técnico, realizado no software Inventor, do sistema experimental para processo de separação água-microplásticos.....	49
Figura 13 – Componentes do sistema digital implementado.....	51
Figura 14 - Sistema para separação água-microplástico construído e montado no LABDES.....	53
Figura 15 - Sequência dos procedimentos realizados após coleta das amostras, para a quantificação da massa MP.	54
Figura 16 - Determinação da densidade de sólidos pelo método do deslocamento ou proveta graduada (a) Provetas contendo álcool 70° (b) Provetas após adição de 2g de microplástico - leitura de v_2	57
Figura 17 - Variação do comportamento da vazão e pressão lidas nos intervalos de tempo de estabilização e coletas no HC.	58
Figura 18 - Variação do comportamento da vazão e pressão lidas nos intervalos de tempo de estabilização e coletas no HM.	58
Figura 19 - Imagens microscópicas do microplástico em água.....	62
Figura 20 - Eficiência total - corrente underflow do Sistema HC.....	64
Figura 21 - Eficiência total - corrente overflow do Sistema HM.....	66
Figura 22 - Eficiência total (a) correntes overflow e (b) correntes underflow, dos sistemas HC e HM.....	67

Figura 23 - Razão de fluido em função da vazão de alimentação no sistema HC e sistema HM.....	69
Figura 24 - Razões de fluido percebidas no HC e HM para as diferentes condições de vazão de alimentação da suspensão, durante processo de remoção dos MP.	70
Figura 25 - Eficiências Totais obtidas no HC e HM para as diferentes condições de vazão de alimentação da suspensão, no processo de remoção dos MP.	71
Figura 26 - Eficiência total reduzida em função da vazão para as correntes concentradas de ambos os sistemas.....	72
Figura 27 - Porcentagem referente ao efeito “T” na separação PE para condições intermediárias e altas de capacidade de processamento.	73
Figura 28 - Eficiências no sistema HC em função da percentagem de MP alimentados ao sistema à uma vazão de 48 L/min.....	74
Figura 29 -Diagrama de pareto para a fração de MP e eficiência de separação no processo.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relações geométricas para algumas famílias conhecidas de hidrociclones. .	27
Tabela 2 - Intervalos de tempo pré-determinados para estabilização e coletas no HC e HM.....	52
Tabela 3 - Planejamento experimental do realizado nos sistemas HC e HM para uma concentração de alimentação de polietileno $C_{MP} = 0,83 \text{ g/L}$	55
Tabela 4 - Valores para as frações de MP recuperados nas correntes de saída do HC frente à vazão de alimentação.....	60
Tabela 5 - Valores para as frações de MP recuperados nas correntes de saída do HM frente à vazão de alimentação.....	62

NOMENCLATURA

C_a	Concentração de sólidos na alimentação	[g/L]
C_o	Concentração de sólidos no <i>overflow</i>	[g/L]
C_u	Concentração de sólidos no <i>underflow</i>	[g/L]
D_c	Diâmetro cilíndrico do hidrociclone	[mm]
D_i	Diâmetro de entrada do hidrociclone	[mm]
D_o	Diâmetro da saída <i>overflow</i>	[mm]
D_u	Diâmetro da saída <i>underflow</i>	[mm]
FRM_{over}	Fração de massa recuperada no <i>overflow</i>	[-]
FRM_{under}	Fração de massa recuperada no <i>underflow</i>	[-]
L	Altura cônica do hidrociclone	[mm]
L_c	Altura cilíndrica do hidrociclone	[mm]
L_o	Altura externa da saída <i>overflow</i>	[mm]
L_{v1}	Altura do <i>vortex finder</i> do hidrociclone convencional	[mm]
L_{v2}	Altura do <i>vortex finder</i> do hidrociclone modificado	[mm]
L_T	Comprimento do corpo do hidrociclone ($L_c + L$)	[m]
m	Massa do sólido (microplástico)	[g]
P_a	Pressão de alimentação no manômetro analógico	[bar]
P_{LIDA}	Pressão de alimentação lida no manômetro digital	[bar]
P_{under}	Pressão da saída <i>underflow</i>	[bar]
Q_a	Vazão de alimentação	[L/s]
Q_o	Vazão de saída <i>overflow</i>	[L/s]
Q_u	Vazão de saída <i>underflow</i>	[L/s]
Q_{A_R}	Vazão de alimentação no rotâmetro analógico	[L/min]
Q_{LIDA}	Vazão de alimentação lida no rotâmetro digital	[L/min]
R_L	Razão de fluido	[-]
$R_{L_{over}}$	Razão de fluido na corrente <i>overflow</i>	[-]
$R_{L_{under}}$	Razão de fluido na corrente <i>underflow</i>	[-]
t_i	Intervalos de tempo	[s]
v_1	Volume inicial da proveta	[L]
v_2	Volume final da proveta	[L]
v_a	Velocidade axial	[m/s]

v_{θ}	Velocidade tangencial	[m/s]
v_r	Velocidade radial	[m/s]
X_{sa}	Fração mássica de sólido - alimentação	[-]
X_{so}	Fração mássica de sólido - <i>overflow</i>	[-]
X_{su}	Fração mássica de sólido - <i>underflow</i>	[-]
W_a	Vazão mássica de alimentação	[g/s]
W_o	Vazão mássica do <i>overflow</i>	[g/s]
W_u	Vazão mássica do <i>underflow</i>	[g/s]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA – Análise de Variância

ABIPLAST – Associação Brasileira de Indústria do Plástico

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CCT – Centro de Ciências e Tecnologia

CFD – *Computacional Fluid Dynamics*

ET – Eficiência Total

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

ER – Eficiência Total Reduzida

FRM – Fração de Massa Recuperada

HC – Hidrociclone Convencional

HM – Hidrociclone Modificado

LABDES – Laboratório de Referência em Dessalinização

LPFI – Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem

MP – Microplásticos

MSR – Metodologia de Superfície de Resposta

NP – Nanoplásticos

PE – Polietileno

PET – Polietileno Tereftalato

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PVC – Policloreto de Vinila

SARS-Cov2 - Coronavirus 2 da Síndrome Respiratória Aguda Grave

VR – Vidro de Relógio

UAEQ – Unidade Acadêmica de Engenharia Química

3D - Tridimensional

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. Difundindo o Plástico	20
2.1.1. Microplásticos	22
2.1.2. Remoção de MP do meio aquoso.....	24
2.2. Hidrociclones	25
2.2.1. Princípio de Funcionamento	27
2.2.2. Fenômenos Físicos na Hidrociclonagem.....	32
2.2.3. Parâmetros relacionados à Separação	33
2.3. Separação Sólido-Líquido	36
2.3.1. Hidrociclones em Aplicações Diversas.....	36
2.3.2. Hidrociclones em Aplicações envolvendo MP	38
2.4. Avaliação Estatística das Respostas	41
MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. Material Particulado	44
3.2. Preparação da solução (água - microplásticos)	45
3.3. Hidrociclones	45
3.3.1. Hidrociclone Convencional (HC)	45
3.3.2. Hidrociclone Modificado (HM).....	47
3.4. Sistema Experimental.....	48
3.4.1. Bando de Dados - Sistema Digital	50
3.4.2. Operação do Sistema Hidrociclone.....	51
3.4.3. Coleta de Amostras.....	52
3.4.4. Quantificação dos MP no Meio Aquoso	53
3.5. Casos Estudados.....	54
RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1. Determinação da Densidade do Material Particulado	56
4.2. Monitoramento da Pressão e Vazão.....	57
4.3. Fração de Massa Recuperada (FRM).....	60
4.3.1. Sistema Hidrociclone Convencional.....	60
4.3.2. Sistema Hidrociclone Modificado	62
4.4. Sistema HC versus Sistema HM.....	64
4.4.1. Eficiência Total	64

4.4.2. Razão de Fluido.....	69
4.4.3. Eficiência Total Reduzida	72
4.5. Efeito da Concentração de MP no Sistema de Hidrociclone Convencional	74
4.6. Efeito e Interação das Variáveis na Separação de MP	75
CONCLUSÕES.....	78
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE	88

INTRODUÇÃO

Vários componentes podem estar presentes em meios aquosos, dentre eles materiais particulados, óleos e graxas, nutrientes (acarretando o crescimento de microrganismos e algas), bem como substâncias tóxicas adsorvidas as superfícies desses materiais.

Uma problemática existente, abordada principalmente a partir do ano de 2004 até os dias atuais é a presença de plásticos em ambientes aquáticos, em sua forma íntegra ou degradada, traduzidos por primários ou secundários, respectivamente. A preocupação deve-se a disposição e disponibilidade de uma grande quantidade de materiais plásticos no ambiente, por um longo período, acarretando danos.

A literatura aborda como definição, os plásticos em tamanhos menores sendo os microplásticos (MP) e/ou nanoplásticos (NP). O tamanho e formato são alguns dos fatores que facilitam a sorção de substâncias tóxicas/ contaminantes em resíduos plásticos, dificultam a retenção e facilitam a ingestão dos mesmos por seres da cadeia trófica, a exemplo de MP e NP encontrados no interior de animais marinhos bem como em espécies consumidas pelos seres humanos.

De maneira geral, os processos para tratamento de suspensões aquosas seguem normalmente categorias física, química e/ou biológica, sendo a escolha feita de acordo com as exigências para cada tipo de água a ser tratada e para cada fim planejado após tratamento. Geralmente, esse tratamento envolve a utilização de equipamentos com princípios físicos de remoção e separação de sólidos, a exemplo de grelhas e decantadores, tratamento por tanques e por fim a desinfecção e remoção dos nutrientes dispostos nas suspensões.

Um constante estudo para o tratamento e descarte dessas água é necessário a fim de lidar com normas ambientais e, para o caso dos resíduos plásticos, reduzir a disposição desses materiais no meio ambiente. Apesar da atuação das ETAR ou ETE, estações de tratamento de águas residuais e estações de tratamento de efluentes, respectivamente, a remoção dos MP dessas águas apresentam-se ainda como desafio devido às características desses componentes que dificultam tal processo de remoção, como tamanho reduzido, formato e densidade.

Números para eficiência de ETE no mundo são apresentados por alguns autores,

os quais obtiveram em torno de 65% da remoção de MP em águas residuais (Liu et al., 2019) e 99.9% do MP em efluente secundário de uma ETE na Finlândia, conseguidos pela aplicação de tratamentos avançados terciários como biorreator de membrana (Talvitie et al., 2017). Por se apresentarem como uma classe emergente de poluentes em águas residuais e ausência de ETE projetadas para eliminação dos MP, a poluição pelos microplásticos no ecossistema torna-se inevitável, em maior ou menor grau, dependente da tecnologia aplicada (NGO et al., 2019). Desta forma, objetiva-se o desenvolvimento ou aprimoramento de mecanismos existentes e menos onerosos que possam subsidiar o tratamento dessas águas contendo microplásticos.

Diversos trabalhos na literatura são encontrados acerca da utilização de hidrociclones, visto a gama de aplicabilidade considerada para tal equipamento bem como as vantagens relacionadas à construção e operação do mesmo. Estes equipamentos ocupam um menor espaço (equipamento menor) quando comparado a outros equipamentos com mesmo princípio de separação, exemplo as centrífugas, menor custo de manutenção, por não possuírem partes móveis, e apresentam boa eficiência em boa parte das aplicações.

Ainda devido ao potencial de aplicação dos hidrociclones, várias configurações têm sido propostas na literatura, de forma a atender dadas especificidades dos processos. Pesquisas acerca de novas adaptações como a incorporação de um meio filtrante para o *vortex finder* (Wang e Wu, 2017) e em parte (s) do corpo do equipamento (Vieira, 2006; Zhao et al., 2010; Façanha, 2012; Lin e Wu, 2019; Salvador et al., 2019) originaram os chamados hidrociclones filtrantes, equipamentos utilizados na separação sólido-líquido ou líquido-líquido que se diferenciam dos hidrociclones convencionais pela adição do meio filtrante.

Visto que os hidrociclones permitem uma vasta aplicação em processos de separação e que os microplásticos apresentam-se como poluentes facilmente permeáveis em estações direcionadas ao tratamento de água, apesar de pesquisas ainda incipientes, esforços vêm sendo realizados no tocante à separação microplásticos em meios aquosos. Portanto, é de fundamental importância a continuidade nas pesquisas e proposição de tecnologias que permitam a redução de micro partículas plásticas dispostas no ambiente, visto consequências oriundas da ingestão desses poluentes, por exemplo (Watts et al., 2014; Li, Tse & Fok, 2016). É nesse contexto que o presente trabalho se propõe a contribuir.

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o efeito da modificação da seção

geométrica do *vortex finder* em comprimento e porosidade, por meio de cortes intercalados axialmente, na eficiência de separação de microplásticos em água. Os diferentes casos de estudo realizados são apresentados nos objetivos específicos:

- Projeto e montagem de dois sistemas utilizando um hidrociclone convencional e outro modificado na separação de microplásticos;
- Avaliar o sistema com hidrociclone convencional (HC) na remoção de micropartículas de polietileno (PE) em águas sintéticas na concentração de 0,83g/L;
- Verificar o efeito do alongamento do *vortex finder* na hidrodinâmica do equipamento, denominado hidrociclone modificado (HM), para mesma concentração de PE avaliado no HC;
- Realizar um estudo comparativo do desempenho dos hidrociclones convencional e modificado, na remoção de microplásticos PE, para diferentes condições (vazão e pressão) de operação;
- Avaliar o efeito de diferentes concentrações de alimentação de polietileno, para condição de operação e sistema que permitiram maior eficiência de separação do microplástico.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**2.1. Difundindo o Plástico**

O material plástico ganhou espaço em vários setores e usos do cotidiano nos últimos anos, tendo uma expansão significativa em sua produção e comercialização a partir do século XX. Plásticos, tratam-se de materiais poliméricos sintéticos produzidos a partir de matérias-primas que combinadas proporcionam propriedades físicas e químicas específicas, formulados para serem rígidos ou flexíveis, apresentando alta plasticidade.

Adentrando na descoberta desses materiais sintéticos, o químico belga Leo Hendrik Baekland por volta de 1900, iniciou seus experimentos em busca de um material sintético estilo goma-laca e de baixo custo. Ele foi o responsável pela descoberta da Baquelita, resina utilizada na moldagem em formas e teve seus produtos amplamente comercializados para outras empresas na época.

“Do advento do baquelite em 1907 até a segunda guerra mundial muitos materiais novos surgem e são amplamente divulgados pela indústria de materiais plásticos, valendo-se de uma retórica utópica sobre o brilhante futuro da humanidade diante dos novos materiais, que concretizariam um maior controle sobre o mundo natural, suas limitações e agressões (FRANÇA, 2010 apud MEIKLE, 1995)”

No desenvolvimento de materiais surge a busca por novas matérias-primas para confecção dos mesmos, nesse contexto a indústria petrolífera ganha espaço e materiais plásticos derivados de substâncias naturais, como o petróleo, passam a ser produzidos.

De acordo com Guia ambiental da indústria de transformação e reciclagem de materiais plásticos (2011), na cadeia petroquímica, o terceiro elo é o setor de transformação do material plástico, sendo responsável pela produção de produtos plásticos utilizados em várias aplicações (desde embalagens alimentícias até a construção civil). A produção dar-se-á a partir do grânulo/ pellet, resina termoplástica que sofre

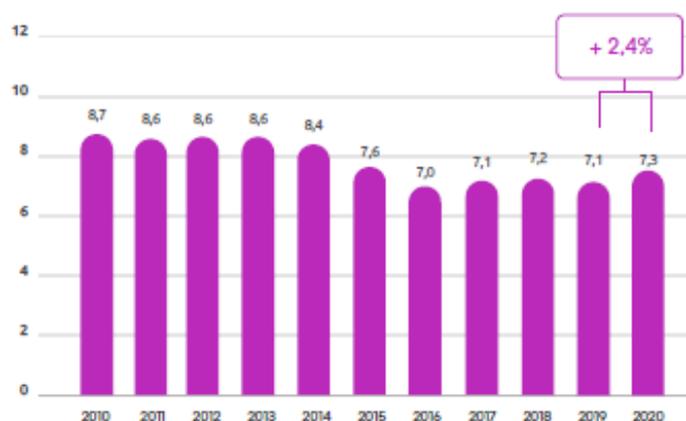
transformação por meio dos processos de extrusão, injeção, entre outros, para produção dos produtos plásticos.

Quanto a sua classificação, os polímeros podem ser divididos em três categorias de acordo com características de solubilidade e/ou fusibilidade, os termoplásticos, termorrígidos e elastômeros, este último sendo as borrachas. Por definição, e resumidamente, os termoplásticos apresentam-se como maleáveis ou liquefeitos a partir do aquecimento ou resfriamento, podendo ser até dissolvidos em diversos solventes, sem acarretar perda de suas propriedades. Com relação aos termorrígidos ou também conhecidos como termofixos uma vez feitos não podem ser remoldados ou reauecidos, tendo a garantia do rompimento das ligações, isto é, quebra que resulta na degradação de suas propriedades (FRANÇA, 2010).

Dentre os polímeros, destacam-se alguns termoplásticos como o polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PE), policloreto de vinila (PVC), e politereftalato de etileno (PET).

Devido a suas diversas vantagens, tais como durabilidade, os plásticos vêm sendo comumente utilizados pela sociedade moderna. No Brasil, um crescimento de 2,4% de 2019 para 2020 foi registrado para o setor de transformados plásticos, como mostra a Figura 1, mesmo em Abril havendo uma queda de 15% registrada no setor (ABIPLAST, 2020). Para se ter uma ideia do montante, segundo dados do relatório *Plastics – the Facts 2021* da *Plastics Europe and EPRO* obteve-se uma produção global na marca de 348 milhões de toneladas de plásticos no ano de 2017.

Figura 1 - Transformados plásticos em milhões de toneladas.



Fonte: Abiplast (2020).

Apesar de esforços, a quantidade de produtos plásticos utilizados pela sociedade,

a disposição incorreta e a dificuldade na fiscalização aparecem como alguns dos fatores para a problemática atual, a grande quantidade de resíduos plásticos dispostos no ambiente. Dados apresentados por Barnes et al. (2009) em seu trabalho, mostram que apesar da quantidade e propriedade dos resíduos sólidos produzidos diferirem nos países do mundo, cerca de 10% destes são os plásticos, correspondendo a 80% dos resíduos sólidos acumulados nas praias e oceanos.

Como expectativa futura acerca do supracitado, até 2050, cerca de 12 bilhões de toneladas de resíduos plásticos podem ser lançados em aterros ou meio ambiente, de acordo com dados de tendência global para a curva de produção de plásticos (GEYER et al., 2017).

Ao serem descartados, os plásticos tem sua vida útil dependente de fatores como natureza química do mesmo, características do ambiente no qual são dispostos e como a degradação ocorre. Das formas de degradação é possível salientarmos duas delas, a degradação biológica e a proveniente de fatores ambientais, isto é, intempéries, o que para os plásticos convencionais ocorre em um longo espaço de tempo. Por se tratarem de materiais quimicamente resistentes em comparação a outros, como o papel lignocelulósico, tornam-se materiais difíceis e de longo tempo de exposição no meio ambiente (ANDRADY, 2003; ANDRADY & NEAL, 2009). Autores já abordavam em seus trabalhos a preocupação com os resíduos plásticos, entretanto na última década tiveram essa preocupação atenuada.

2.1.1. Microplásticos

Fatores abióticos e bióticos podem degradar os plásticos, sendo a radiação UV, a ação mecânica e a hidrólise, importantes nesse processo de fragmentação e disponibilização dos plásticos, aos microrganismos. Nesse contexto, temos as partículas menores geradas a partir do processo de degradação, denominados então de mesoplásticos (meso), microplásticos (micro) e nanoplásticos (nano) (COSTA et al., 2016; CAIXETA et al., 2018).

Os microplásticos 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 assim classificados. Os microplásticos primários são manufacturados na escala de até 5,0 mm para atenderem a um fim direto, e em sua maioria adicionados a produtos a serem comercializados.

Muitos dos produtos contendo MP são utilizados diariamente, esfoliantes, sabonetes, pasta de dente e loções, ocorrendo o inevitável, que se trata do despejo direto em sistemas de esgoto domésticos desses microplásticos a partir do processo de enxague dos cosméticos utilizados, dessa maneira, esses e outros resíduos plásticos têm como fonte receptora as ETAR, estações responsáveis pelo tratamento da localidade (CARR et al., 2016).

Outra fonte de microplásticos primários pode estar relacionada à produção de produtos plásticos pela utilização de matéria-prima particulada, podendo ser descrita pela geração de resíduos durante o processo de manufatura, perdas durante o manuseio do material ou até mesmo perdas no decorrer do próprio processo de fabricação do produto final. Esse e outros fatores podem contribuir para acúmulo dos microplásticos no ambiente (ROCHA-SANTOS & DUARTE, 2017).

Microplásticos secundários estão relacionados à degradação ou decomposição de plásticos de maiores dimensões, sejam como subprodutos descartados na produção de peças na indústria plástica ou submetidas a fenômenos físicos, químicos e/ou biológicos quando dispostos no meio ambiente, a exemplo das sacolas plásticas.

Recentemente, o mundo foi acometido pela pandemia do Sars Cov-2, a qual atenuou a necessidade de cuidados de higiene das mãos e além disso, o uso de máscaras faciais. As máscaras, produzidas com polímeros como PE e PS, também podem contribuir para o montante de resíduos plásticos expostos a degradação ambiental em caso de descartes inadequados, originando MP secundários.

Existem diversas formas de contaminação por microplásticos nos mais variados ambientes, sejam eles terrestre, aquático, no ar. Além dos oriundos pela degradação ou disposição dos MP contidos em pastas de dente, esfoliantes faciais, por exemplo, as práticas na agricultura a partir do lodo contendo esses sedimentos, bem como a lavagem de roupas sintéticas que liberam partículas direto nas redes de esgoto também são incluídas nesses meios de contaminação.

Mercês et al. (2021) realizou um levantamento de informações acerca dos impactos que os microplásticos têm causado no ambiente e saúde humana e abordou que os microplásticos têm estado presentes na interação com a biota marinha de maneira que, os animais ali presentes frequentemente confundem os resíduos plásticos como alimento, e os ingerem. Uma passagem desse conteúdo por toda uma 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.

Em estudo desenvolvido com oito voluntários de países distintos, relatado por Criado (2018) na revista *El PAÍS*, apresentaram-se resultados para nove tipos de microplásticos, entre eles o PET e PP encontrados em fezes humanas, coletadas desses voluntários. O estudo contou com as anotações dos participantes voluntários sobre o que haviam consumido durante uma semana, incluindo se era fresco ou alimentos contidos em embalagens comercializáveis e apesar de não ser possível identificar a origem dessas partículas encontradas, todos os voluntários consumiram alimento embalados e pelo menos seis dos oito haviam consumido peixe durante esse período. Confirmando a suspeita de que, independentemente da via de contaminação, os plásticos chegam ao intestino, segundo Philipp Schwabl, gastroenterologista e hepatologista e principal autor do trabalho desenvolvido.

A presença identificada na pesquisa supracitada pode estar relacionada a ingestão direta dos MP pelos organismos ou indireta pela alimentação de espécies de nível trófico inferior. A ingestão de plásticos pela biota marinha foi comprovada a partir do conteúdo estomacal de várias espécies, incluindo zooplâncton (Cole et al., 2013) e aves marinhas. Por apresentarem maior área superficial pela quantidade considerável, detritos plásticos marinhos podem absorver ou transportar poluentes químicos, conduzindo à cadeia alimentar esses componentes, perpassando dos níveis tróficos inferiores, como invertebrados, aos níveis mais altos, incluindo espécies predadoras (LI, TSE & FOK, 2016).

2.1.2. Remoção de MP do meio aquoso

Acerca da problemática existente, vários trabalhos vêm abordando métodos aplicadas a identificação, caracterização e remoção dos micro e nanoplásticos. Segundo Aguiar (2021), um salto no número de publicações foi verificado no ano de 2021 para busca do termo “microplásticos” de acordo com os dados Scopus, enquanto que em 1963 na mesma plataforma o termo “plástico” já se apresentava como foco para vários trabalhos na literatura.

As ETAR apresentam-se, como abordados por autores a exemplo de Carr et al. (2016) e Talvitie et al. (2017), como sistemas que impedem a passagem dos microplásticos (MP), entretanto, como mencionado por Gouveia (2018), apesar de boas

percentagens de retenção das partículas por ETAR, por se tratarem de estações receptores de grande caudais de água, o montante de microplásticos ainda presentes em corpos receptores é significativo.

A remoção por princípios físicos através de dispositivos de filtração e separação, por exemplo, é método amplamente aplicado devido à simplicidade e eficiência conseguida, envolvendo geralmente a utilização de uma série de filtros que permitam a retenção contínua dos microplásticos e passagem da água (HANIF et al., 2022).

Tratamentos químicos, a exemplo de Tagg et al. (2016), que estudaram a remoção de microplásticos usando o processo Fenton, desmostrou-se como método eficiente para isolar microplásticos de água e outros materiais biológicos, entretanto sendo os componentes sulfato de ferro e alumínio utilizados e descartados em resíduos que saem das estações de tratamento, problemas podem ser acarretados à biota (AGUIAR, 2021; BARBOSA, 2000).

Outros métodos abordados em trabalhos, aplicados à remoção de NP e MP envolveram a agregação por microrganismos (Liu et al., 2021a; Cunha et al., 2020), degradação fotolítica, degradação por microrganismos (Mor & Sivan, 2008; Ghosh, Pal & Ray, 2013) e degradação térmica.

Como abordado por Aguiar (2021), apesar de métodos existentes, como exemplos dos supracitados, e métodos promissores em desenvolvimento, grandes desafios relacionam-se a aplicação em larga escala, custo de implementação e eficiências promovidas na remoção.

2.2. Hidrociclones

Os hidrociclones apresentam-se como equipamentos separadores versáteis e podem ser utilizados em aplicações envolvendo fases sólida, líquida e/ou gasosa. Em comparação a centrífuga, da classe dos equipamentos separadores, o hidrociclone apesar de apresentar princípio de operação similar, tem como uma das vantagens um menor custo.

Para ambos, é requerida uma diferença de densidade entre as fases envolvidas no processo de separação, que funciona como um dos parâmetros para efetividade do separador centrífugo. Na centrífuga, é possível uma extensão do tempo de residência no equipamento de maneira a compensar uma pequena diferença existente entre as densidades das fases, não sendo possível essa extensão para os hidrociclones. Impostos a

uma diferença de densidade significativa entre as fases, hidrociclones podem apresentar efetividade na separação de partículas na margem de até 2,0 μm de diâmetro, tendo sua eficiência reduzida para diâmetros menores (RUSHTON et al., 2000).

Acerca do desempenho dos hidrociclones, segundo Barbosa (2011) existem parâmetros influenciáveis, divididos em geométricos e operacionais. “Na primeira classe estão: as dimensões do hidrociclone (diâmetro de entrada, corpos cilíndrico e cônico, *vortex finder*, entre outros) e na segunda classe estão as propriedades termo físicas dos fluidos e sólidos (peso específico dos sólidos, viscosidade do fluido na alimentação, porcentagem de sólidos na alimentação, pressão de admissão e granulométrica do sólido)” (apud SVAROVSKY, 1981).

Em geral, os hidrociclones convencionais como assim referenciados em trabalhos da literatura, apresentam em sua construção uma entrada e duas saídas, localizadas no corpo do hidrociclone constituído por uma parte cônica unida coaxialmente a uma parte cilíndrica. As saídas correspondem as vias nas quais haverá a saída de cada das fases submetidas a separação, saída superior do corpo do hidrociclone, *overflow*, e saída inferior chamada de *underflow* ou *apex*.

Algumas vantagens e desvantagens dos hidrociclones são listadas por Lopes (2018), como um baixo custo de aquisição, não presença de partes móveis o que os torna pouco onerosos no quesito manutenção e elevada capacidade de processamento para o volume ocupado, em contrapartida, por exemplo, em aplicações distintas à necessidade de aquisição ou desenvolvimento de hidrociclones com parâmetros geométricos distintos na busca do desempenho requerido para cada processo.

Considerando os vários processos existentes nas indústrias e suas demandas específicas, vários autores estudaram e implementaram modificações no hidrociclone convencional, sejam relacionadas a geometria ou agregando uma outra operação de processamento ao equipamento. No primeiro, as mudanças na geometria deram origem a novas configurações, classificadas então como famílias. A Tabela 1 apresenta algumas das famílias clássicas dos hidrociclones e suas proporções geométricas encontradas.

Tabela 1 - Relações geométricas para algumas famílias conhecidas de hidrociclones.

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	0,4	5	20°
Bradley	0,13	0,2	0,33	6,85	9°
Mozley	0,15	0,21	0,57	7,43	6°
Waman	0,29	0,2	0,31	4	15°
Demco	0,22	0,5	1	4,7	25°

Fonte: Adaptado de Kyriakidis (2018).

As famílias dos hidrociclones são determinadas por proporções fixas encontradas na relação geométrica entre as principais dimensões do hidrociclone e o diâmetro da parte cilíndrica (D_c) do mesmo. Essa proporcionalidade entre as variáveis de construção do equipamento podem ser associadas ao desempenho do mesmo, relacionando-o a um hidrociclone com alta capacidade e/ou poder de classificação no processo de separação.

2.2.1. Princípio de Funcionamento

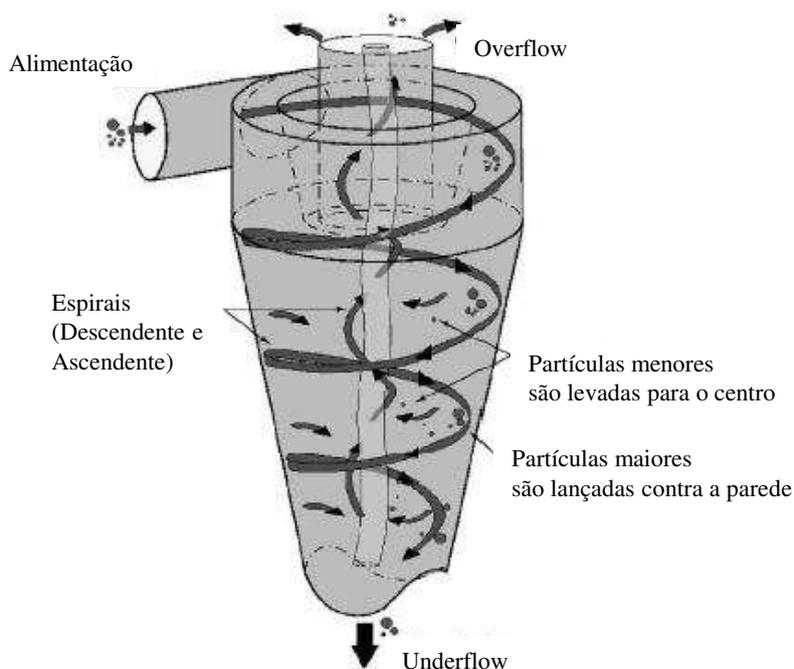
Como mencionado, a geometria do hidrociclone conta com parte cilíndrica justaposta a uma parte cônica, ao longo das quais ocorre o processo de separação. Geralmente, o hidrociclone conta com uma entrada tangencial pela qual é introduzida a alimentação da suspensão a ser utilizada no processamento e duas saídas pelas quais são coletados os produtos do processo de separação, correntes para as fases envolvidas.

O funcionamento do equipamento consiste na introdução sob pressão da mistura ou ainda, suspensão, por uma entrada tangencial que pode ser constituída de um duto circular ou retangular, o tubo de saída chamado *overflow* por vezes considerada corrente diluída, e o *vortex finder*, duto axial que é produto do alongamento do tubo superior para o interno do hidrociclone. A parte cilíndrica é acoplada à parte cônica do equipamento e uma outra saída do hidrociclone é dada pelo *underflow* localizada ao final da parte cônica.

Os hidrociclones são comumente utilizados em separações envolvendo fases sólido-líquido ou líquido-líquido, e apresenta como princípio para seu funcionamento a sedimentação centrífuga. Considere partículas sólidas (como a fase dispersa) suspensas em uma fase líquida, cada uma das partículas estará submetida a um balanço de forças,

dentre elas a força centrífuga, desta maneira submetidas a aceleração centrífuga gerada pelo movimento circular da alimentação no interior do equipamento, a separação das partículas da fase contínua será promovida. A alimentação, que por vezes chamaremos aqui de suspensão, é realizada tangencialmente na entrada localizada na parte superior do cilindro, e como resultado das forças geradas as partículas são encaminhadas para as paredes do equipamento, que quando mais densas do que a fase líquida serão coletadas na saída inferior do mesmo (SVAROVSKY, 2000). A Figura 2 esquematiza o supracitado.

Figura 2 - Representação do escoamento interno aos hidrociclones.



Fonte: Adaptada de Cullivan et al. (2003).

De acordo com Vieira (2006), considerando o formato cônico do hidrociclone e consequentemente diâmetros menores à medida que aproxima-se da saída *underflow*, maiores serão as velocidades impostas ao fluido quanto mais houver a alimentação do mesmo no equipamento.

Oriundo do movimento rotacional da suspensão há o aparecimento de um comportamento espiral descendente, também conhecido por vórtice externo, conduzindo as partículas maiores e mais densas presentes na suspensão a serem descarregadas pelo *underflow*, e um espiral ascendente (vórtice interno). Este último, considerando somente parte da suspensão coletada no *underflow*, será constituído da parcela não eliminada nessa

diração e terá movimento rotacional oposto ao espiral descendente, partículas menores e menos densas são então levadas ao centro do hidrociclone e conduzidas à saída superior (*overflow*).

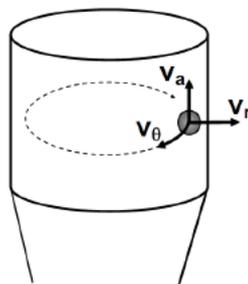
Quanto ao seu poder de separação, pode-se trazer genericamente duas categorias na classificação dos hidrociclones: concentradores e/ ou clarificadores. As denominações apresentam relação direta ao objetivo obtido para cada categoria, de maneira que: para a primeira, o ponto chave se encontra numa maior quantidade da fase líquida sendo retirada do *underflow* (corrente concentrada), o que pode acarretar uma maior quantidade de sólidos presentes no *overflow* (corrente diluída ou clarificada) e não garantia da obtenção de eficiências totais tão altas. Em contrapartida, em hidrociclones clarificadores o processo ocorre para obtenção de correntes *overflow* mais diluídas, ou ainda, mais limpas possíveis.

Sendo a dinâmica do escoamento crucial para entendimento do mecanismo de funcionamento dos separadores, na seção seguinte são apresentados os perfis de velocidade envolvidos na separação por hidrociclones.

2.2.1.1. Componentes de Velocidade

O movimento do fluido é explicado por sua distribuição de velocidade, comumente descrita por três componentes em coordenadas cilíndricas (Figura 3).

Figura 3 - Componentes da velocidade em seção do hidrociclone: tangencial (v_{θ}), axial (v_a) e velocidade radial (v_r).

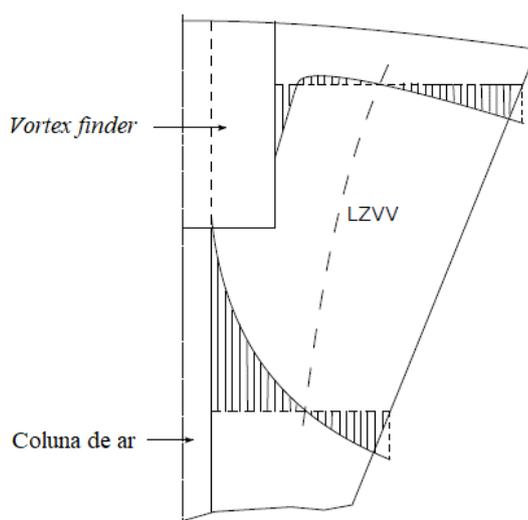


Fonte: Silva (2012).

- Componente Axial da Velocidade

O perfil dessa componente é identificado por dois tipos de velocidade vertical, como observado por Slack et al. (2000), valores positivos de velocidade axial que representam o escoamento ascendente próximo ao centro e negativos para escoamento inverso, ou ainda, descendente próximo à parede do hidrociclone. O parcial contrabalanceamento da corrente descendente pelo escoamento ascendente, definem uma região de velocidade axial, LZVV na Figura 4 (ALVES, 2019).

Figura 4 - Perfil de velocidade axial em hidrociclone.



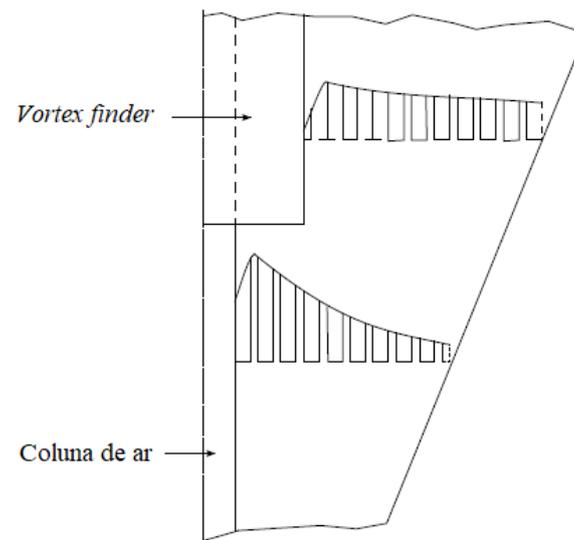
Fonte: Alves (2019) *apud* Kelsall (1952).

Próximo à região do vortex finder, o forte fluxo descendente existente pode originar um fluxo de curto circuito da suspensão alimentada no hidrociclone, consistindo na passagem direta da alimentação para saída superior do hidrociclone, overflow. (SVAROVSKY, 2000; MOGNON, 2015; ALVES, 2019).

- Componente Tangencial da Velocidade

A componente de velocidade tangencial diz respeito à geração das forças centrífugas que promovem o movimento da suspensão no interior do hidrociclone e das forças de cisalhamento que impendem o acúmulo de sólidos suspensos na parede do equipamento (SCHAPEL E CHASE, 1998; VIEIRA, 2006).

Figura 5 - Perfil de velocidade tangencial em hidrociclone.



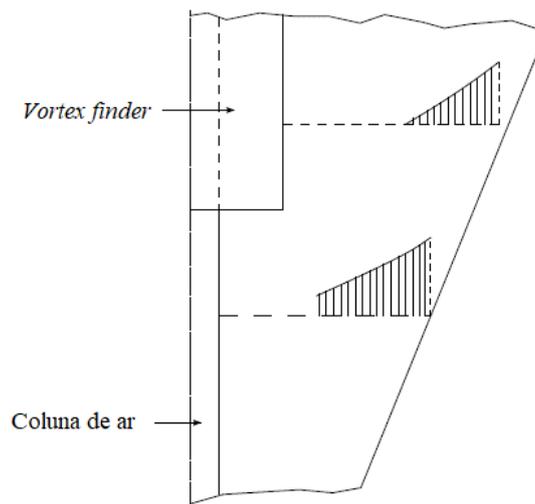
Fonte: Alves (2019) *apud* Kelsall (1952).

Svarovsky (2000) menciona que, dependendo do balanço das forças centrífuga juntamente com a de arraste, exercido na partícula dentro do equipamento, ela se moverá para a parede do equipamento (quando força centrífuga supera a de arraste), ou será levada para parte central do hidrociclone (força de arraste maior que a centrífuga).

- Componente Radial da Velocidade

A componente radial de velocidade apresenta maior dificuldade de medição, visto que em termos absolutos é menor quando comparada as componentes já discutidas aqui, uma vez que o escoamento radial acontece em área muito maior do que as áreas transversais do equipamento e do orifício de alimentação (Marins, 2007). A Figura 6 aborda o perfil de velocidade radial, que apresenta direção da parede ao centro do equipamento.

Figura 6 - Perfil de velocidade radial em hidrociclone.



Fonte: Alves (2019) *apud* Kelsall (1952).

2.2.2. Fenômenos Físicos na Hidrociclonagem

A eficiência de separação está ligada ao desempenho do hidrociclone em operação, e apesar do equipamento possuir uma construção simples quanto comparado a outros separadores, o escoamento em seu interior apresenta particularidades. A suspensão pode adotar alguns caminhos, como trataremos a seguir de alguns deles, o que adiciona complexidade ao entendimento e descrição ao escoamento envolvido.

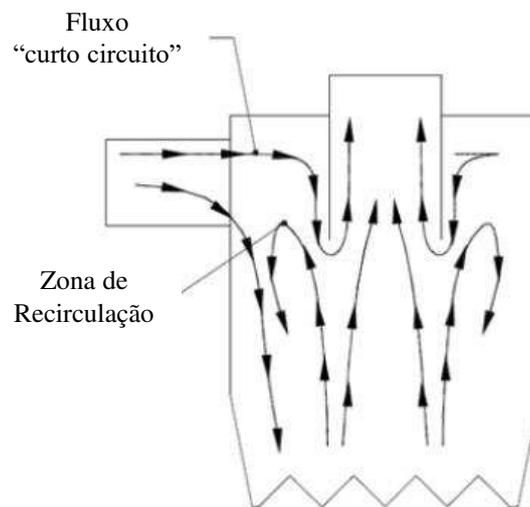
Como abordado, a alimentação é realizada na parte cilíndrica do hidrociclone adentrando de forma tangencial, além da turbulência acentuada no escoamento convencional, pode-se perceber fenômenos adicionais. Como uma das particularidades da hidrociclonagem, próximo a parede externa do *vortex finder* existe uma região de maior turbulência, o “choque” entre a corrente que está percorrendo parte do círculo e a corrente da suspensão que acabara de ser alimentada pode originar o chamado curto circuito ou ainda, *short circuit flow*, de partículas na suspensão. De acordo com Lopes (2018), o gradiente de pressão formado na região e diferença de comprimento entre o vórtice interno e *vortex finder* são parâmetros para ocorrência do fenômeno.

De forma indesejável na hidrociclonagem, o aparecimento do curto circuito acarreta o direcionamento de partículas na suspensão alimentada diretamente ao *overflow*, sem que esta passe pelo processo normal de separação no equipamento. Grosseiramente, se trata da fuga da suspensão que flui para saída *overflow* sem percorrer a trajetória

descendente (vórtice externo) e ascendente, influenciando a eficiência do processo de separação.

Ademais aos fenômenos supracitados, pode haver a formação de uma camada de ar no centro do equipamento, o *air core*, contribuindo também para instabilidade e/ ou direcionamento de fluxo de partículas para saída superior (Figura 7).

Figura 7 - Zonas de escoamento secundário no interior do hidrociclone.



Fonte: Adaptado de Tonin (2012) e Dlamini et al. (2005).

O *air core* é descrito como um fluxo contínuo de ar formado no interior do equipamento, induzido pelas altas velocidades imprimidas no equipamento que acarretam o aparecimento de uma região de baixa pressão no mesmo, geralmente para hidrociclones possuindo saída aberta à atmosfera, uma constante entrada de ar pode ser fazer presente formando essa camada contínua de fluido ar que vai desde o underflow até o *vortex finder* (alongamento da saída overflow para interior do hidrociclone). Uma contrapressão ou mudança na faixa de operação de manuseio do equipamento pode ser utilizada para extinção dessa camada de ar (VIEIRA, 2006).

2.2.3. Parâmetros relacionados à Separação

A avaliação e previsão da performance de separadores, quantitativamente, é realizada por meio de alguns principais parâmetros. Conceitos básicos acerca destes são apresentados nesta seção, de maneira a propiciar um melhor entendimento sobre os

critérios de avaliação do hidrociclone na separação sólido-líquido.

- Capacidade de processamento

Define-se como sendo a vazão volumétrica alimentada no hidrociclone, ou ainda vazão de alimentação Q_a dada em L/s.

- Fração de recuperado ou Fração de Recuperação de Massa (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) podemos utilizar da Equações 1 e 2 para cálculo da FRM do *overflow* e *underflow*, respectivamente.

$$FRM_{over} = 1 - \left(\frac{C_u Q_u}{C_a Q_a} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$FRM_{under} = 1 - \left(\frac{C_o Q_o}{C_a Q_a} \right) \times 100 \quad (2)$$

onde

C_o e C_u são as concentrações de sólidos (MP), na unidade de kg / m³ ou g/L da mistura no *overflow* e *underflow*, respectivamente;

C_a a concentração em kg / m³ ou g/L de sólidos na alimentação;

Q_o e Q_u são as vazões de suspensão em L/s da mistura no *overflow* e *underflow*, respectivamente;

Q_a a vazão de alimentação da suspensão, L/s.

- Eficiência Total de Separação

Relaciona a vazão mássica de sólidos coletados na corrente de interesse e vazão mássica de sólidos da suspensão alimentada no equipamento. No presente trabalho, como é de interesse a avaliação de ambas as saídas do hidrociclone, a eficiência total no *overflow* e *underflow* são apresentadas pelas Equações 3 e 4, respectivamente.

$$ET = \frac{W_{so}}{W_{sa}}, \text{ ou ainda} \quad (3)$$

$$ET = \frac{X_{so}W_o}{X_{sa}W_a} \times 100\%$$

$$ET = \frac{W_{su}}{W_{sa}}, \text{ ou ainda} \quad (4)$$

$$ET = \frac{X_{su}W_u}{X_{sa}W_a} \times 100\%$$

em que,

W_{so} e W_{su} - vazão mássica de sólidos recuperados no overflow e underflow, em g/s;

W_{sa} - vazão mássica de sólidos na alimentação, em g/s;

X_{so} e X_{su} - fração mássica do sólido no overflow e underflow, adimensional;

X_{sa} - fração mássica do sólido na alimentação, adimensional;

W_u e W_a - vazão mássica da suspensão no overflow e underflow, em g/s; e

W_a - vazão mássica da suspensão na alimentação, em g/s.

A eficiência total é calculada independente da forma de coleta da partícula, se a mesma foi descarregada pelo arraste ou ação centrífuga.

- Razão de Fluido

Ao ser submetida ao processo de separação no equipamento, espera-se que parte da suspensão alimentada seja descarregada pelo overflow e parte pelo *underflow*. Inevitavelmente, e inerente a existência ou não do campo centrífugo, em se tratando da separação sólido-líquido, parte dessa fração sólida será arrastada para a saída *underflow* por ação do efeito “T”, efeito este que ocorre no hidrociclone acarretando a divisão de correntes. Uma parcela do líquido juntamente as partículas de maior velocidade é então descarregada pela saída do concentrado (Socool, 2003), originando o efeito “T” que correlaciona-se a razão de líquido ou fluido, dada pelas Equações 5 e 6.

R_L do overflow:

$$R_{L_over} = \frac{Q_o(1 - X_{so})}{Q_a(1 - X_{sa})} \quad (5)$$

R_L do underflow:

$$R_{L_under} = \frac{Q_u(1 - X_{su})}{Q_a(1 - X_{sa})} \quad (6)$$

- Eficiência Total Reduzida

Dois termos são nomeados em se tratando de eficiência, sendo estes: eficiência total, Equações 3 e 4, e eficiência total reduzida.

A diferença aqui diz respeito a subtração do termo de razão de líquido da expressão de eficiência total, visto que a eficiência reduzida (ER) trata o processo de separação das partículas somente devido à ação da força centrífuga no interior do hidrociclone, desconsiderando o efeito “T”. Logo temos que:

$$ER = \frac{ET - R_L}{1 - R_L} \times 100\% \quad (7)$$

onde R_L será dada por R_{L_over} ou R_{L_under} , para a corrente concentrada obtida.

2.3. Separação Sólido-Líquido

2.3.1. Hidrociclones em Aplicações Diversas

Socool (2003) em seu trabalho avaliou o uso de hidrociclones, com entrada da alimentação do equipamento nos formatos circular e retangular, na pré-filtragem de suspensões de areia e solo argiloso para fins de irrigação. Trabalhando os parâmetros da seção de alimentação circular afim de manter estes o mais coerente possível quando alterado para formato retangular, bem como margens de diferencial de pressão no processo.

O autor pôde avaliar o desempenho de quatro hidrociclones para dois os tipos de suspensão de alimentação, comparando os dados experimentais obtidos com dados estimados por modelos encontrados na literatura para previsão de vazão e diferencial de pressão. Para todos os casos analisados, o hidrociclone dotado de seção circular para duto de alimentação apresentou eficiência total superior quando comparado aos três hidrociclones com seção retangular, independente do diferencial de pressão utilizado e tipo de suspensão alimentada. No processo de separação, os dados obtidos mostraram-se

mais satisfatórios para suspensões de areia, apresentando o hidrociclone I (entrada circular) com maior eficiência para baixos diferenciais de pressão nos processos avaliados.

Medronho et. al (2005) obedecendo proporções para família de hidrociclones Bradley, utilizaram da técnica CFD (*computational fluid dynamics*) para estudo da separação de microrganismos e células mamíferas para cultura por meio de hidrociclone, por meio de simulações bidimensionais, trabalhando a entrada do dispositivo como um anel que circundava a parte superior cilíndrica do hidrociclone. Os resultados apresentados mostraram que para o hidrociclone Bradley com diâmetro menor que 10,0 mm o processo de separação de microrganismos não apresenta boa performance, em contrapartida, os autores obtiveram resultados satisfatórios para eficiência do processo em se tratando da separação de células mamíferas.

Delgadillo e Rajamani (2007) utilizaram da fluidodinâmica computacional para avaliar o desempenho de seis geometrias alternativas de hidrociclones comparadas ao design convencional, para tal fizeram uso do software Fluent. Com o intuito de explorar e manipular a hidrodinâmica para alcançar a classificação desejada, os autores avaliaram o desempenho de cada equipamento por meio de variáveis para o balanço de massa e curva de classificação. Os resultados demonstraram o vantajoso uso da técnica CFD no estudo de novos projetos de hidrociclones.

Andrade (2007) estudou o desempenho de hidrociclones, construídos em aço inoxidável e com parâmetros baseados na família Rietema e Bradley, para três diferentes misturas de alimentação, emulsão óleo-água, células de levedura em água e mistura envolvendo partículas de carvão. O autor realizou testes de bancadas para cinco configurações de hidrociclones: CM1 - duas partes cônicas ligadas à cilíndrica do hidrociclone, CM2 e CM4 - inserção de uma rosca na parte cilíndrica com número de filetes distintos, CM3 – configuração CM2 com *vortex finder* prolongado, tendo sido analisadas eficiência global, concentração de cada corrente, bem como razão de líquido para cada sistema bomba-hidrociclone.

Para óleo emulsificado em água, Andrade (2007) verificou maior eficiência de separação para o CM1 e CM2 operando com sistema de reciclo inserido, e dados similares para eficiência global do CM3 em comparação ao CM2, apresentando o primeiro melhor desempenho. Para os casos estudados, o hidrociclone de Bradley, apresentou eficiência global semelhante ou maior em comparação as configurações propostas pelo autor. Em

se tratando da separação de levedura e partículas finas de carvão, os hidrociclones não apresentaram boa eficiência total.

Cruz et al. (2011) com intuito de avaliarem o hidrociclone em aplicações envolvendo a agricultura irrigada, estudaram o hidrociclone da família Rietema em aço galvanizado como pré-filtro na irrigação para retirada de materiais de solo argiloso e areia. Os autores de posse de hidrociclone com D_c igual a 19,20 cm em sistema de bancada, conduziram ensaios para vazões de alimentação entre 10 e 27,0 m³/h e massa de sólidos conhecida, a partir dos quais alcançou-se eficiência total de 30% para menores vazões e até 92% para a maior vazão avaliada com sólido areia. Para suspensão com solo, os ensaios realizados apresentaram comportamentos inversos do obtido para areia, tendo sido a eficiência total decrescente com aumento da vazão na separação de solo por hidrociclone Rietema.

Salvador et al. (2014) verificaram experimentalmente, se o processo de separação no hidrociclone ocorria em sua maior parte pela diferença de densidade ou diferença de tamanho entre as partículas da suspensão alimentada. Para tal, utilizaram suspensões aquosas de rochas fosfáticas em um hidrociclone filtrante concentrador. Com 95% de confiabilidade foi verificado que não houve diferença de densidade entre as correntes de alimentação, *overflow* e *underflow*, sendo a separação realizada pela diferença de tamanho do material particulado.

2.3.2. Hidrociclones em Aplicações envolvendo MP

Alguns dos trabalhos publicados entre 2017 e 2022 acerca da aplicação de hidrociclones de diversas configurações na separação de micropartículas são descritos nesta subseção, contribuindo para discussões envolvendo a fenomenologia existente no processo e aplicações diversas.

É sabido que a densidade das fases envolvidas na separação é parâmetro que influencia o desempenho dos separadores, Fu et al. (2017) exploraram em seu artigo duas abordagens teóricas no estudo da densidade média de uma suspensão contendo dois tipos de plásticos, PET e PVC, oriundos da moagem de resíduos de garrafas plásticas. Os autores apresentaram em sua abordagem II uma boa concordância com os dados experimentais, utilizando do pacote MATLAB para tratamento das equações, e curvas de análise da eficiência em função da densidade do meio.

Os resultados para três vazões de alimentação (0,63; 0,75 e 0,86 L/s) apresentaram uma baixa eficiência de separação quando a densidade aproximou-se a do plástico PET, e para densidade do meio consistente com a média da densidade dos dois tipos de partículas plásticas presentes na suspensão a eficiência de 72% foi obtida para vazão de 0,86 L/s. Fu et. al (2017) concluíram que a densidade do meio deve ser função do diâmetro, densidade dos sólidos, velocidade tangencial, posição radial e viscosidade do meio.

Yu et al. (2017) estudaram a separação de partículas, descritas como partículas raras da terra (como material abrasivo utilizado em polimento mecânico químico) por mini-hidrociclones e diâmetro 10,0 mm, e avaliaram processo de separação mediante a alteração de variáveis de taxa de fluxo, razão de divisão e concentração das partículas sólidas na alimentação. Pela variação de um fator, mantendo os demais constantes, os autores observaram comportamento crescente da eficiência com aumento do fator vazão de alimentação, de modo que para vazão mais alta, o desempenho do hidrociclone se mostrou comprometido (uma baixa na eficiência). Como efeito da divisão de fluxo no equipamento, uma menor razão de 18,72% permitiu maior eficiência, e um aumento de concentração de sólidos indo de 1% a 25% acarretou decréscimo no desempenho do separados ciclônico. A influência dos fatores estudados na eficiência de separação foi avaliada pelo uso de técnicas de superfície de resposta e das condições permitindo maior eficiência no processo.

Uma nova configuração para saída superior do separador foi proposta por Wang e Wu (2017), sendo o tubo do *overflow* de acrílico com 3,0 cm substituído por uma membrana de mesma dimensão, na separação de partículas de amido de milho cm densidade de 3200 kg/m³. Os autores mostraram que a pressão e velocidade de flutuação axial (decrecente da parede para o centro) foram benéficas para não mistura de partículas grossas no *overflow*, e a inserção do tubo de membrana permitiu um poder mais concentrador de partículas no *underflow* no hidrociclone. No mais, a configuração proposta pelos autores exerceu pouca influência sobre a eficiência de separação, mas comportamento significativo no que tange a uma maior diferença de concentração das partículas de interesse entre as correntes de saída do equipamento.

Jiang et al. (2020) também estudaram o efeito do tubo *overflow* ou ainda, de transbordamento na separação de partículas, variando o diâmetro da saída *overflow* em um hidrociclone com construção em forma W em sua seção inferior, para separação de

pó de quartzo com densidade de 2650 kg/m^3 . Alguns parâmetros foram avaliados, sendo resultados para campos de fluxo, velocidade e pressão obtidos por meio de simulações numéricas envolvendo escoamento bifásico (água e ar) e resultados de razão de divisão e eficiência através de aparato experimental. Para diâmetros do *overflow* de 15,0 mm a 35,0 mm, com passo de 5,0 mm, os autores obtiveram uma redução da queda de pressão e velocidade tangencial no hidrociclone com aumento da variável de projeto, em contrapartida ao núcleo de ar gerado no interior do equipamento, que se apresentou mais estável e de maior diâmetro com acréscimo no diâmetro do *overflow*.

Lorentzon (2021) em seu trabalho de dissertação sugeriu a separação de microfibras têxteis em efluentes oriundos de máquinas de lavar roupas/ tecidos. A autora projetou como equipamento base para os estudos, um hidrocilone seguindo proporções similares a família Bradley em escala mini por impressora 3D, HC1, e demais HC2, HC3 e HC4 de acordo com resultados para o hidrociclone base e estudo de variáveis influentes no processo de separação.

A partir de amostragem, estudo de dois meios de filtração e obtenção de massa de microfibras coletadas nas correntes de saída do minihidrociclone, Lorentzon (2021) pôde concluir que para os parâmetros operacionais sugeridos em pesquisa não promoveu-se uma alta separação das microfibras de efluentes da lavanderia, podendo ser justificado pela não homogeneidade na suspensão de microfibras nas amostras, bem como uma diferença pequena de densidade do fluido e microfibras utilizadas. Segundo a autora, mais estudos tornam-se necessários para efetiva listagem da tecnologia por hidrociclones na separação dessas microfibras têxteis, a priori não justificada pela energia e custos dispendiados no estudo.

Yi et al. (2021) propôs a substituição de fitros em equipamentos SWAS em usinas por minihidrociclones para melhorar a qualidade da água reutilizada em processos na indústria. O autor ao analisar o primeiro modelo de alta eficiência Stairmand confeccionado em impressora 3D, utilizou de técnicas de planejamento fatorial para estudo dos diâmetro das saídas (*vortex* e *underflow*) propostos na eficiência de separação de água composto de óxido de alumínio a uma concentração de 25,0 g/L.

A partir de superfícies de resposta, o minihidrociclone com os diâmetros especificados foi avaliado em simulação numérica através do software Fluent, sendo atingida uma eficiência pelo método gravimétrico de aproximadamente 95% para uma razão de valor 1 para as vazões das correntes *overflow* e *underflow*.

Visando a separação de microplásticos por minihidrociclones confeccionados em aço inoxidável, Liu et al. (2022) avaliaram a eficiência do equipamento aplicado a águas contendo Nylon e Polietileno, os quais chamou de MHC_H e MHC_L, respectivamente, quando alteradas condições de razão de divisão e vazão de alimentação no sistema de hidrociclone único e em série.

A partir dos dados obtidos, os autores observaram que para uma menor concentração de partículas plásticas na ordem de 2-30,0 micro alimentados ao MHC_H, menos colisões entre partículas podem ter sido promovidas acarretando uma menor eficiência de separação, bem como uma maior concentração (100ppm), para a qual foi observado um efeito anzol com melhores valores de eficiência para partículas no intervalo de 2-10,0 micro. Ambos os microplásticos de maior e menor densidade, nylon e polietileno, foram retirados com eficiência total mínima de 70% quando alimentados aos minihidrociclones confeccionados, mostrando-se o sistema em série composto por dois minihidrociclones MHC_H com melhor eficácia na remoção dos MP da água em comparação ao sistema único proposto.

Os trabalhos supracitados utilizaram de diferentes tipos e geometrias de hidrociclones na separação de partículas sólidas até 5,0 mm, apresentando a vasta aplicação dos separadores ciclônicos, tendo sido realizado no presente trabalho a remoção de partículas PE que apresentam densidade inferior e próxima a da água, ainda pouco explorada por meio de hidrociclones em escala de bancada.

2.4. Avaliação Estatística das Respostas

Na busca de operações mais assertivas, no que diz respeito a obtenção de dados confiáveis para um menor número de experimentos realizados, o planejamento experimental apresenta-se como ferramenta estatística bem difundida. Nesse contexto, fatores e respostas de interesse para o estudo devem determinados pelo experimentador, para que a posteriori, o sistema parametrizado por uma combinação de fatores ou ainda, variáveis controladas, seja analisado a partir das respostas (saídas de interesse do sistema).

Como técnicas estatísticas de avaliação de informações, surgem a metodologia de respostas de superfícies (MSR), análise de variância (ANOVA), gráfico de pareto, dentre outras. A MSR conta com ajuste de modelos lineares ou quadráticos, em geral, à respostas

obtidas a partir do realizado pelo planejamento fatorial, permitindo avaliação da função que cada fator representa no sistema, bem como nível de importância ou influência destes.

A ANOVA traz como princípio a decomposição da variância total das médias observadas no experimentos, atribuindo se a variação deve-se a fatores conhecidos e controláveis, utilizados como variáveis no planejamento experimental, ou a fatores desconhecidos, de natureza aleatória (BANZATTO e KRONKA, 2006). Para tal, alguns parâmetros estatísticos estão envolvidos na análise pela ANOVA e resumidamente são apresentados:

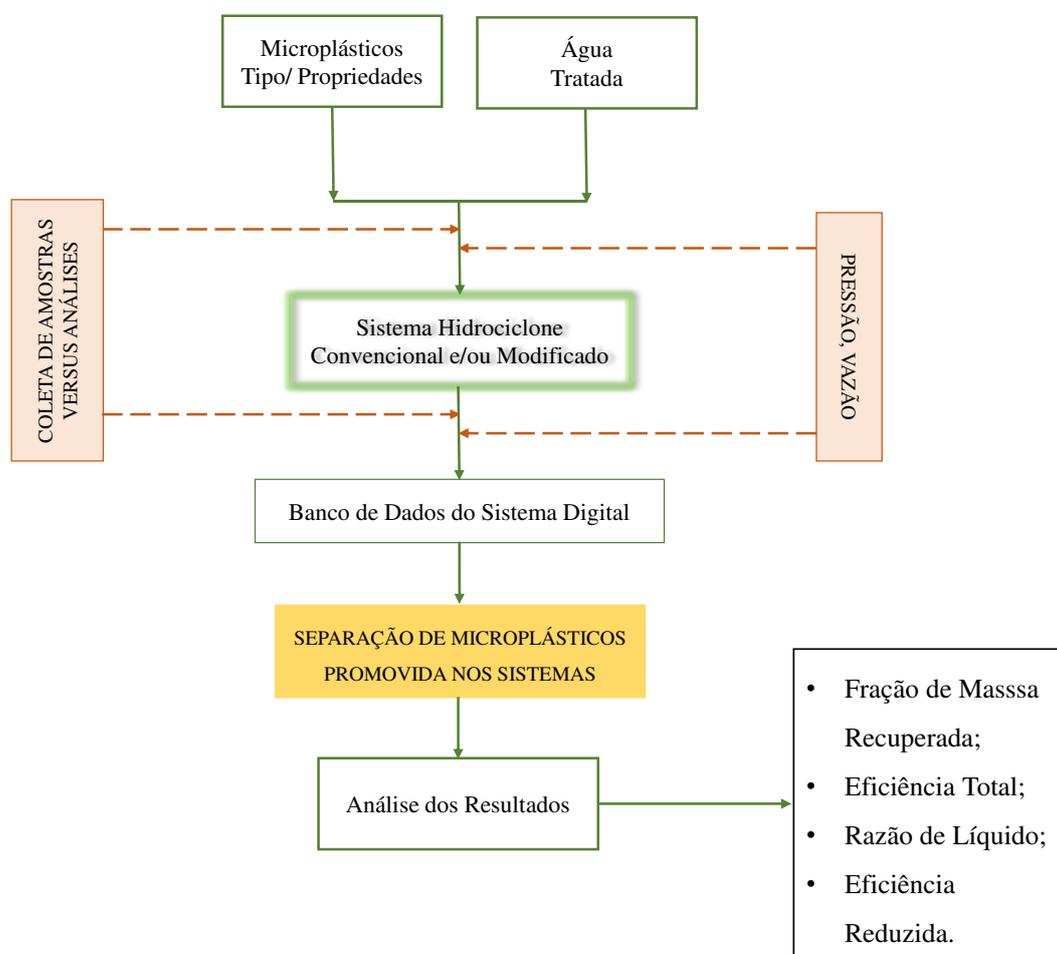
- Variância como medida da dispersão dos dados a um valor esperado;
- Coeficiente de determinação (R^2) que mostra o quão ajustado os valores observados estão ao modelo estatístico, sendo o perfeito ajuste dado pelo valor de 1;
- Valor -p, o qual determina um teste estatístico entre o valor-p de um fator e o valor-p pré-determinado, sendo o fator em questão declarado estatisticamente significativo quando obtidos valores menores do que o pré-determinado, que em geral é dado como 0,05 ou 0,1.

A partir do diagrama ou gráfico de pareto, assim como a MSR, é possível a análise dos efeitos principais ou interação entre os fatores frente às respostas obtidas. O gráfico de pareto, por meio de barras proporcionais impressas, permite a verificação de sensibilidade dos parâmetros estudados, sendo recurso gráfico útil na identificação de quais fatores tem influência significativa sobre cada resposta do sistema e conseqüentemente, melhor ação sobre o processo frente ao benefício ou não benefício do estudo desse fator.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 8 apresenta o fluxograma referente ao estudo experimental utilizando dois hidrociclones, um convencional (HC) e outro modificado (HM), na separação de microplásticos de polietileno de água. As atividades foram desenvolvidas no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), que proporcionou a infraestrutura experimental: aquisição de materiais e montagem do sistema experimental para realização dos experimentos.

Figura 8 - Fluxograma do Hidrociclone Convencional e/ou Modificado.



O fluxograma descreve a utilização, na primeira etapa do trabalho, de um sistema de hidrociclone denominado de convencional (HC). O hidrociclone modificado consiste

em uma alteração no *vortex finder* (alongamento e permeabilização do tubo), que é descrito mais adiante. Dois sistemas propostos foram então estudados, com base em seus desempenhos diante o processo de separação em meio aquoso de microplásticos polietileno.

Um vasto banco de dados foi gerado para as variáveis de pressão e vazão de alimentação no HC e HM. O comportamento dos sistemas foi avaliado tendo os resultados traduzidos em termos de massa PE, eficiências de separação e razão de fluido.

3.1. Material Particulado

Uma gama de microplásticos (MP) são relatados na literatura, juntamente ao desafio na remoção destes de ambientes aquáticos devido às suas particularidades. O polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliestireno (PS) são alguns dos principais tipos de MP encontrados e por apresentarem o valor da densidade próximo ao da água, encontram-se suspensos e/ou dispersos em meios aquosos, dificultando sua remoção.

Para a presente pesquisa, microesferas de PE (0,4 a 0,8 mm) foram selecionadas para preparo das soluções que foram utilizadas no processo de separação pelos hidrociclones HC e HM.

Foi realizada a determinação da densidade do microplástico e classificação em polietileno de baixa, média ou alta densidade. Para se obter a densidade do microplástico contou-se com o apoio de vidraria laboratorial, como béquer, proveta e uma balança de precisão. A metodologia abordada para se determinar a densidade foi a de deslocamento por proveta, com dados alimentados à Equação 8.

$$\rho = \frac{m}{(v_2 - v_1)} \quad (8)$$

onde:

v_1 é dado pelo volume inicial de fluido na proveta graduada (L);

v_2 é o volume final para o fluido e particulado na proveta (L);

m sendo a massa conhecida do particulado (g), adicionado à proveta.

O experimento de densidade do microplástico PE foi realizado em triplicata, e devido a densidade do MP ser menor que a da água, pelo comportamento observado

quando em mistura com o fluido, para execução da técnica descrita utilizou-se de fluido menos denso do que o particulado, o álcool etílico a 70°. Fazendo uso de um sistema de peneiras, a faixa para o diâmetro do MP também pôde ser confirmada.

3.2. Preparação da solução (água - microplásticos)

A preparação da solução consistiu em:

- Pesagem da massa de microplástico a ser utilizado: 150,0 g de microplásticos polietileno com diâmetro médio de 0,6 mm e,
- Volume fixo de água no tanque de armazenamento: 180,0 L.

Para cada série de experimentos, a mistura de microplásticos polietileno e água permaneceu sob agitação contínua através de sistema de agitação com pás fixado na parte superior do tanque. Foi observado que o material particulado adere às paredes do tanque em consequência da atração eletrostática entre as partículas, parâmetros adotados como a agitação permanente no tanque, com tempos descritos no item 3.4.3, permitiram a obtenção de solução dispersa e mais homogênea possível a ser alimentada ao sistema hidrociclone.

Para cada série de experimentos finalizada realizou-se: a retirada dos MP, limpeza do tanque, alimentação de nova massa e mesmo tempo de agitação, em atenção à concentração igual ou bem próxima de 0,83 g/L de PE em água.

3.3. Hidrociclones

O coração do aparato experimental constituiu-se do separador (hidrociclone), construído a partir de um tarugo de PVC (Policloreto de vinila) manuseado em torno CNC (do inglês, *Computer Numeric Control*) pertencente ao laboratório LABDES. Duas configurações para os hidrociclones foram exploradas, denominados de:

- Sistema hidrociclone convencional (HC) e,
- Sistema hidrociclone modificado (HM).

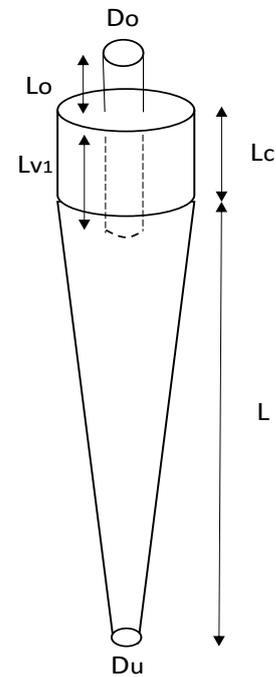
3.3.1. Hidrociclone Convencional (HC)

O hidrociclone convencional (HC) tem dimensões adaptadas do hidrociclone

proposto por Souza (2009) no processo de separação óleo- água., conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Dimensões do hidrociclone convencional.

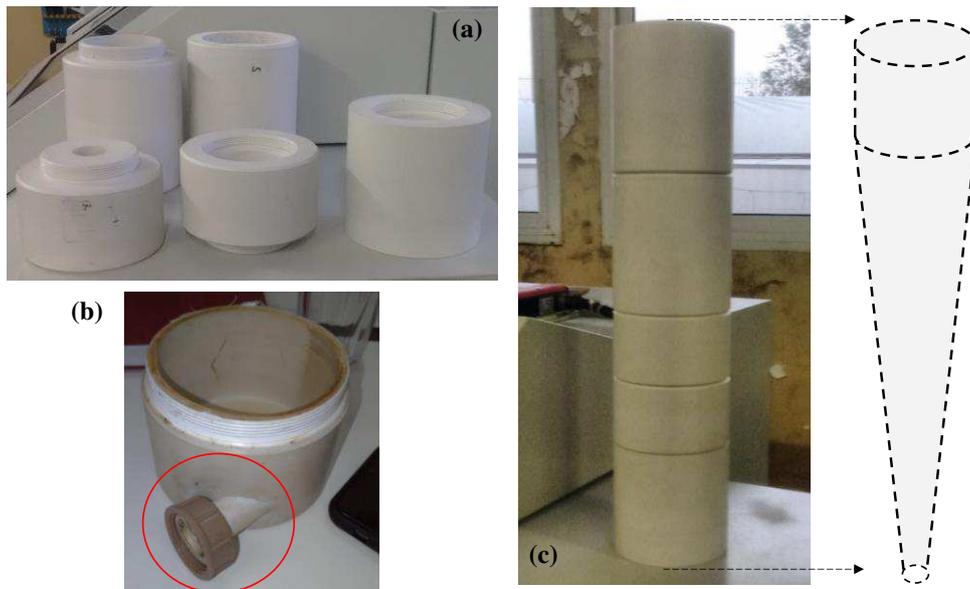
Parâmetros Geométricos	Dimensões utilizadas (mm)
D_o	20,4
D_i	16,1
D_c	102
D_u	15,7
L_o	50
L_c	51
L	499,8
L_{v1}	63



O hidrociclone contou com uma parte cilíndrica justaposta à uma cônica constando de entrada tangencial, de diâmetro D_i , e duas saídas localizadas na região superior (*overflow*) e inferior (*underflow*) do hidrociclone.

O hidrociclone foi confeccionado com diferentes partes seccionadas (a) referentes ao corpo do hidrociclone (c), conectadas por meio de roscas finas junto à parte cilíndrica constando de um tubo de entrada tangencial (b), conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Hidrociclone em PVC (a) Partes cônicas do hidrociclone; (b) Parte superior cilíndrica com destaque para entrada tangencial; (c) Hidrociclone após montagem (sem constar com a saída *overflow*).



Fonte: LABDES (2019) e autora (2022).

3.3.2. Hidrociclone Modificado (HM)

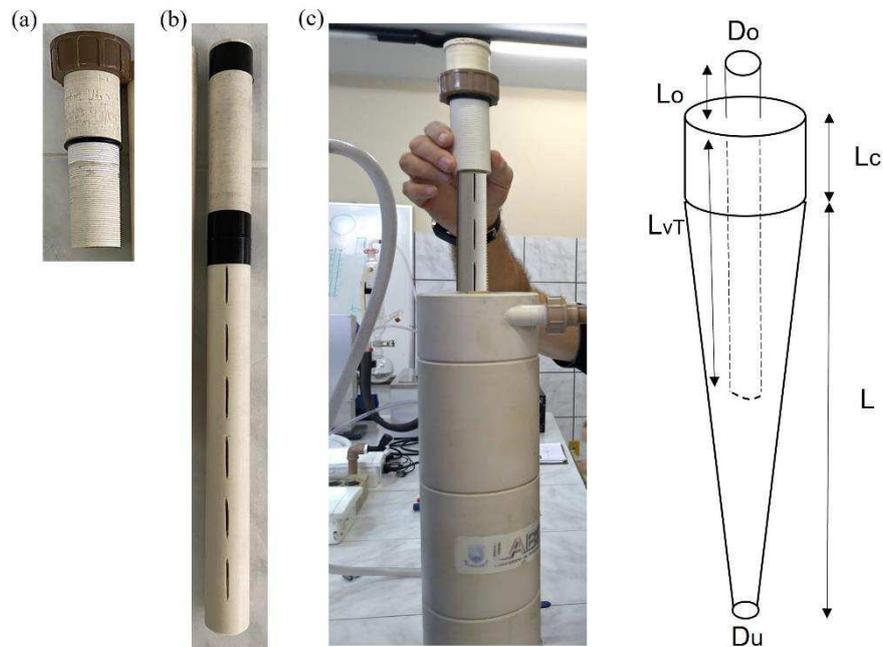
A Figura 11 mostra o perfil da segunda configuração do hidrociclone, o HM. A modificação referente a seção de *vortex finder* contou com a introdução de tubo PVC com cortes externos axiais em toda sua volta, representando uma forma geométrica linear e intercalada (de um corte ao outro). À essa nova região com cortes denominamos de L_{v2} com comprimento de 213,0 mm.

As dimensões do hidrociclone modificado correspondem as utilizadas no hidrociclone convencional apresentado na Figura 9, com exceção da região supracitada, a qual teve seu comprimento alterado de L_{v1} para a soma de L_{v1} com L_{v2} , como ilustrado e identificado por L_{vT} na Figura 11, de comprimento total igual a 273,0 mm.

A Figura 11 apresenta as principais partes ou peças confeccionadas referente a saída *overflow* (a), *vortex* L_{vT} em PVC (b), e montagem do HM (c). O *vortex* II apresentou as seguintes características para os 24 cortes em sua estrutura:

- Altura do corte - 25,0 mm;
- Largura do corte - 1,5 mm;
- Profundidade do corte - 2,0 mm.

Figura 11 – Hidrociclone modificado (a) Saída superior roscável; (b) *Vortex II* confeccionado e (c) Montagem do HM.



Fonte: A autora (2022).

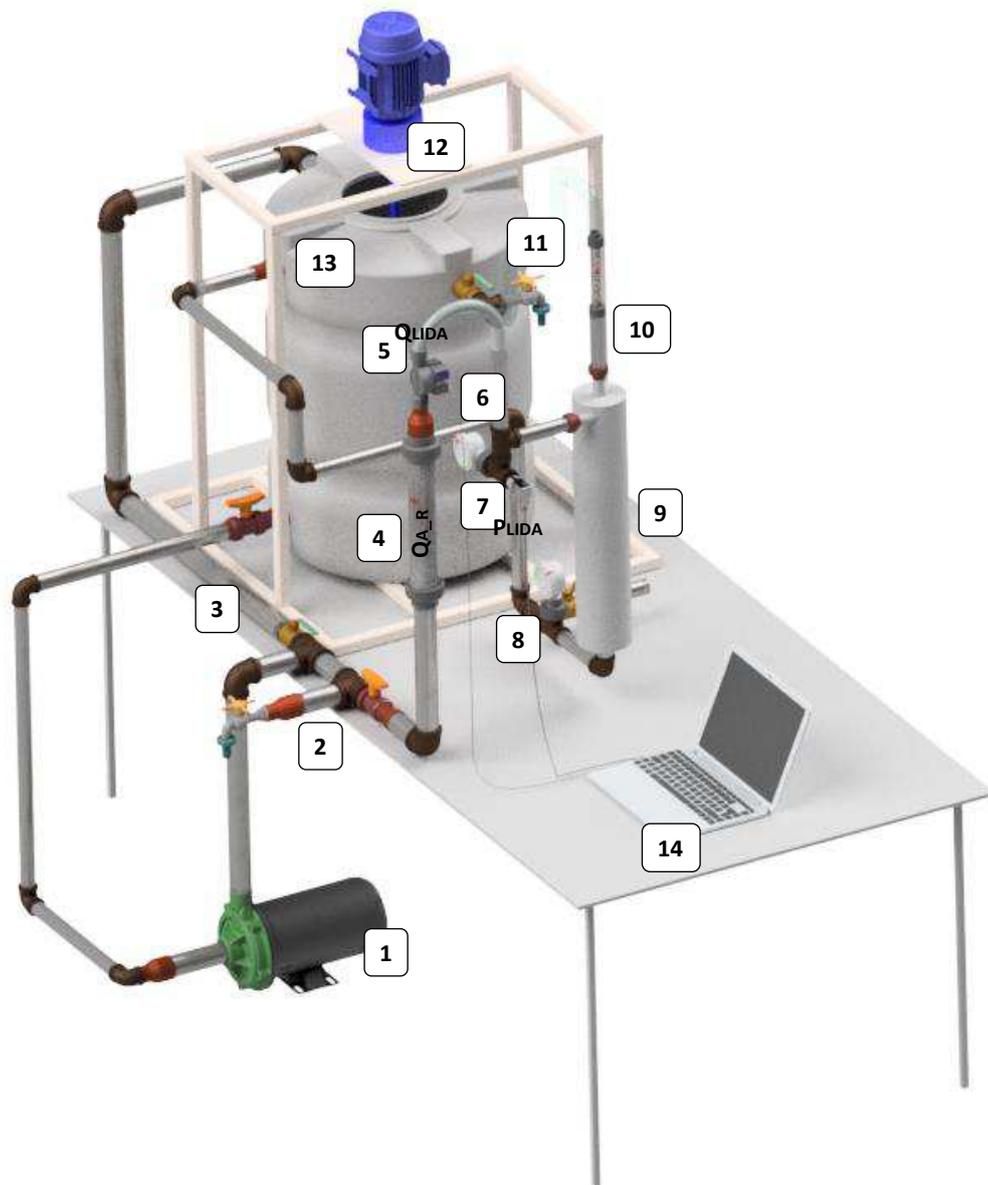
Para o hidrociclone modificado, dois quesitos foram priorizados no sistema. O primeiro deles foi a ideia do *vortex finder* como um “filtro” que permitisse a passagem de parcela do fluido, e segundo a escolha do material acessível para construção do HM. Os quesitos descritos foram atendidos pelo uso do material PVC e confecção dos cortes na estrutura do tubo.

3.4. Sistema Experimental

O sistema, tubulação e acessórios conectados ao hidrociclone, consistiu-se de tubulação em material PVC a jusante e a montante do equipamento, válvulas, medidores de vazão e pressão, pontos de coleta de amostras, tanque para armazenameto da mistura, bomba, e demais acessórios.

A Figura 12 ilustra a configuração projetada para o sistema experimental, com identificação para os principais componentes.

Figura 12 - Desenho técnico, realizado no software Inventor, do sistema experimental para processo de separação água-microplásticos.



Fonte: A autora (2022).

1. Motor-bomba centrífuga 5,0 CV;
2. Coletor e válvula de esfera ½"- corrente da alimentação
3. Válvula de esfera ½"- corrente *bypass*;
4. Rotâmetro analógico (0-70,0 L/min) e digital na corrente da alimentação;
5. Sensor de vazão/ fluxo;
6. Manômetro analógico glicerinado (0-4,0 bar) na entrada do hidrociclone;
7. Sensor de pressão;

8. Manômetro (0-4,0 bar), coletor e válvula de esfera ½” - corrente *underflow*;
9. Hidrociclone de PVC (55,0 cm de comprimento);
10. Rotâmetro (0-37,5 L/min) na corrente *overflow*;
11. Coletor e válvula de esfera ½”- corrente *overflow*;
12. Sistema eixo e pá giratória;
13. Tanque de alimentação (Capacidade de 200,0 L) com agitação contínua;
14. Unidade receptora de dados.

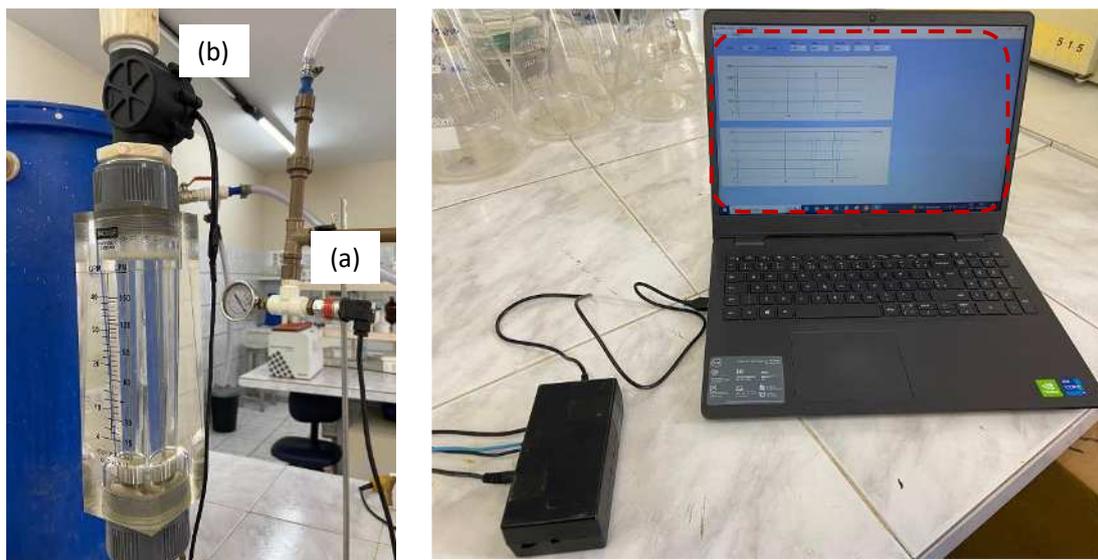
3.4.1. Bando de Dados - Sistema Digital

Na alimentação do sistema hidrociclone, como componente integrante do mesmo foi implementado um sistema digital para controle e aquisição de dados de vazão (2 a 100,0 L/min) e pressão (0 a 10,0 bar).

Iniciou-se com a etapa de calibração do sistema digital, que constou da realização de bateladas com fluido água no sistema hidrociclone para vazões determinadas no rotâmetro analógico (Q_{A_R} indo de 15 a 65 L/min). Nesta etapa, os sensores de vazão e pressão com canal de integração para o arduino, tiveram seus dados processados e entregues a unidade de leitura (*notebook*) através de porta USB.

A Figura 13 apresenta os sensores instalados, pressão (a) e vazão ou fluxo (b) na alimentação do hidrociclone e unidade de aquisição de dados no sistema digital, com destaque para tela com layout do software DATALOGGER utilizado, desenvolvido no âmbito do LABDES. O supervisor desenvolvido em linguagem C# permitiu a comunicação, visualização e armazenamento dos dados (em formato .txt), mais tarde alimentados ao software MATLAB para tratamento utilizando a ANOVA (APÊNDICE A).

Figura 13 – Componentes do sistema digital implementado.



Fonte: A autora (2022).

As etapas realizadas somaram-se para obtenção da curva de ajuste do processo, linear, mais tarde realimentada ao arduino garantindo a calibração do dispositivo. A aquisição de banco de dados de vazão e pressão nas séries de experimentos foi realizada, sendo possível também por meio do sistema digital observar o comportamento dos sistemas HC e HM frente às mudanças de condições de operação como distúrbio de fechamento e abertura de válvulas para as coletas.

3.4.2. Operação do Sistema Hidrociclone

Com a etapa de preparação da solução de alimentação, abordada em seção 3.2, iniciaram-se os experimentos. A homogeneização do meio aquoso (água-microplásticos) foi promovida por recirculação contínua ao longo de 5,0 minutos, que antecederam o intervalo de operação e coletas de amostras, para cada vazão de alimentação no HC e HM.

A operação do hidrociclone em dada vazão se deu por controle da válvula de alimentação, sendo permitidas capacidades de processamento de até 65 L/min por meio de abertura total da válvula de alimentação e fechamento parcial da válvula by-pass.

O trecho de alimentação do hidrociclone foi equipado com componentes analógicos e digitais (em série) para rotâmetros e manômetros, a jusante do hidrociclone foram inseridos manômetro analógico na corrente de saída superior (*overflow*) e

rotâmetro analógico para saída inferior (*underflow*). Esses componentes permitiram as medições das pressões (P_a , P_{LIDA} e P_{under}) e vazões (Q_{A_R} , Q_{LIDA} e Q_{over}) nos sistemas durante a hidrociclonagem.

Os experimentos foram realizados em triplicata, para duas configurações de hidrociclone e seis capacidades de processamento (Q_{A_R} e/ou Q_{LIDA}).

3.4.3. Coleta de Amostras

Após processo de recirculação contínua (tanque e by-pass), a passagem da mistura pelo hidrociclone foi promovida para uma dada vazão de alimentação estabelecida, de modo que:

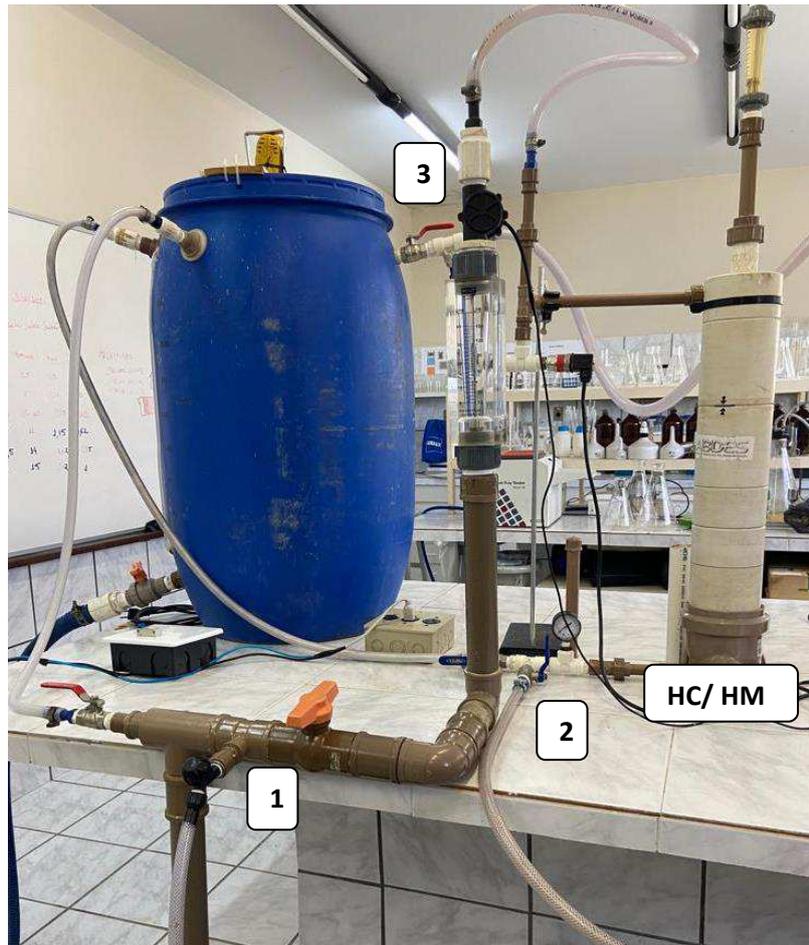
- O HC e HM operaram, cada, a seis capacidades de processamento Q_{A_R} (15, 25, 35, 45, 55 e 65 L/min);
- Estabelecida no rotâmetro analógico a vazão de alimentação para a solução, foram decorridos 2,0 minutos de operação (t_1 e t_3);
- Após o intervalo de tempo t_1 , realizou-se a abertura do ponto de coleta da alimentação (t_2). As coletas de amostras do *overflow* e *underflow* deram-se no intervalo t_4 .

As coletas mencionadas acima foram realizadas nos intervalos de tempo especificados na Tabela 2, sendo os pontos de coleta das correntes de alimentação (1) e saídas *underflow* (2) e *overflow* (3) apresentados na Figura 14.

Tabela 2 - Intervalos de tempo pré-determinados para estabilização e coletas no HC e HM.

Intervalo de tempo (s)	Sistema/ Correntes	Coleta de Amostras
$0s \leq t_1 < 120s$	Recirculação do Sistema	Não
$120s \leq t_2 < 130s$	Alimentação	Sim
$130s \leq t_3 < 250s$	Recirculação do Sistema	Não
$250s \leq t_4 < 260s$	<i>Overflow e Underflow</i>	Sim (Simultâneas)

Figura 14 - Sistema para separação água-microplástico construído e montado no LABDES.



Fonte: A autora (2022)

Nas correntes *overflow* e *underflow*, as válvulas destinadas às coletas foram alocadas próximas às válvulas de retorno dessas correntes ao tanque, sendo realizado o fechamento destes retornos antes da abertura dos pontos de coleta.

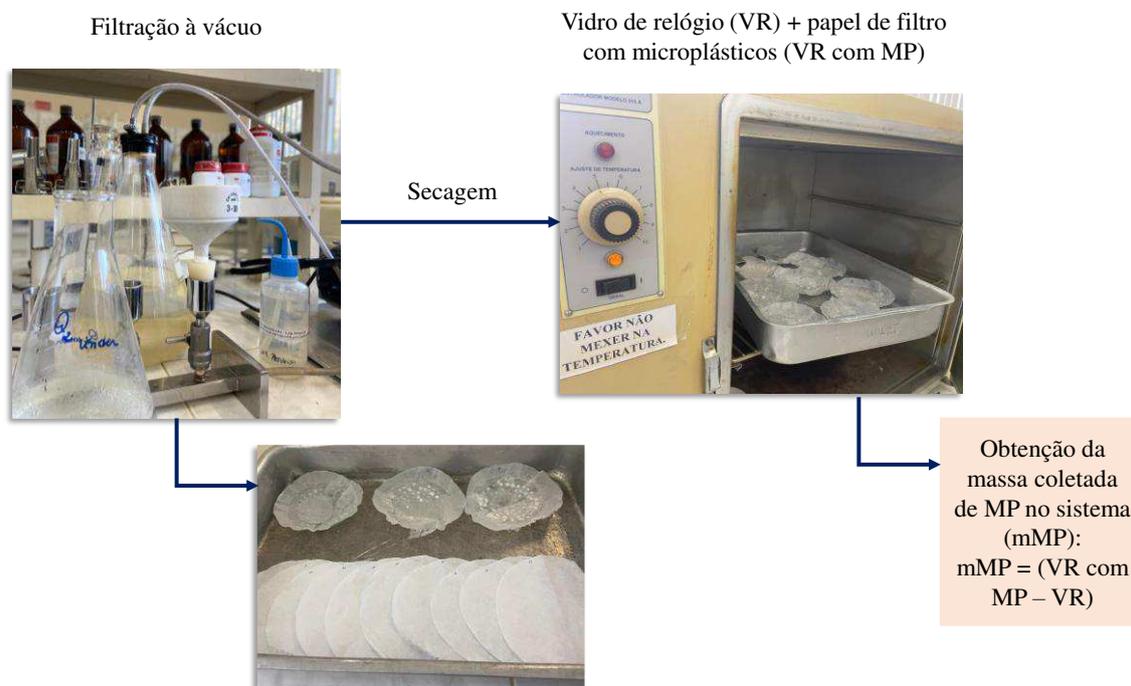
O tempo de coleta foi listado como parâmetro fixo no processo, e cada amostra coletada teve seu peso e volume determinados, sendo permitida a obtenção de banco de dados para as três correntes (*alimentação*, *over* e *under*) em cada séries de experimentos no HC e/ou HM.

3.4.4. Quantificação dos MP no Meio Aquoso

A quantificação das amostras coletadas foi realizada por meio de filtração, secagem e pesagem dos microplásticos em triplicatas, envolvendo os passos decritos (ilustrados na Figura 15):

- Após a coleta de amostras com microplásticos, por aproximados 3,0 segundos, se deu a pesagem da solução em erlenmeyers;
- Na etapa de filtração foi utilizado um sistema à vácuo composto por funil de porcelana tipo Buchner e papel de filtro utilizado na filtração de pó de café;
- Após retenção dos microplásticos nos filtros de papel, eles foram distribuídos em vidro de relógio dispostos em bandejas, para a secagem dos MP em estufa. O processo de secagem foi realizado em estufa à (100-110)°C por cerca de 2,0 horas;
- As amostras após saírem da estufa foram então resfriadas em dessecador por um período de 30,0 minutos e em seguida pesadas, sendo possível realizar a quantificação da massa de microplásticos coletada nas amostras durante o processo.

Figura 15 - Sequência dos procedimentos realizados após coleta das amostras, para a quantificação da massa MP.



Fonte: A autora (2022)

3.5. Casos Estudados

A Tabela 3 apresenta os casos de estudo do planejamento para o presente trabalho. Esse modelo foi aplicado para as duas configurações de hidrociclone (HC de *vortex* L_{v1} e

HM de *vortex* L_{VT}) tendo sido atendidas seis condições de operação de alimentação.

Tabela 3 - Planejamento experimental do realizado nos sistemas HC e HM para uma concentração de alimentação de polietileno $C_{MP} = 0,83$ g/L.

Ensaio	L_{VI} / L_{VT} (mm)	Q_{A_R} (L/min)
1	63	15
2	63	25
3	63	35
4	63	45
5	63	55
6	63	65
7	273	15
8	273	25
9	273	35
10	273	45
11	273	55
12	273	65

A avaliação de desempenho para uma concentração constante de MP foi parametrizada por cálculos de eficiência, que permitiram um estudo comparativo entre os sistemas HC e HM.

A influência da concentração de alimentação de MP (C_{MP}) foi mais tarde parâmetro avaliado para o ensaio da Tabela 3 que permitiu uma maior eficiência de separação. Para tal, quatro outras concentrações de microplásticos (1,25; 1,66; 2,0 e 2,5 g/L) foram avaliadas juntamente à concentração C_{MP} de 0,83g/L.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são discutidos os resultados experimentais obtidos na remoção de microplásticos de baixa densidade por meio de duas configurações de hidrociclone, convencional e modificado, sendo avaliado:

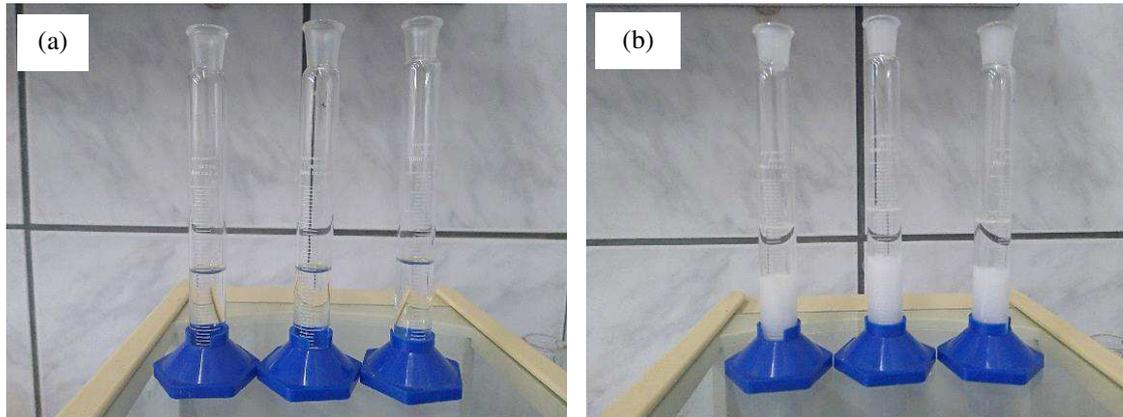
- Operação do sistema hidrociclone convencional (HC);
- Operação do sistema hidrociclone modificado (HM);
- Sistema hidrociclone convencional na remoção de microplásticos;
- Sistema hidrociclone modificado na remoção de microplásticos;
- Estudo comparativo dos sistemas HC e HM com suspensão MP;
- Efeito da vazão do sistema e configuração do hidrociclone na eficiência de separação de microplásticos.

Dentre os sistemas com hidrociclone, a proposta do sistema modificado na separação de microplásticos foi realizado no presente trabalho visto as investigações acerca da introdução de dispositivos no interior do hidrociclone de modo a acarretar redução do redemoinho em torno da saída *overflow* e conseqüentemente menor fluxo de curto circuito de partículas na região.

4.1. Determinação da Densidade do Material Particulado

A Figura 16 apresenta as imagens realizadas durante a execução do método por deslocamento para determinação da densidade do microplástico polietileno, conforme descrito no Capítulo 3 (item 3.1). O MP possui uma forma irregular (não sendo possível mensurar seu comprimento e largura), o que impossibilitou a determinação do seu volume real e peso por métodos convencionais.

Figura 16 - Determinação da densidade de sólidos pelo método do deslocamento ou proveta graduada (a) Provetas contendo álcool 70° (b) Provetas após adição de 2g de microplástico - leitura de v_2 .



Sendo a densidade uma medida de massa do soluto pelo volume da solução, e considerando uma massa (m) de 2,0 g para o microplástico PE em um volume inicial de fluido na proveta de 6ml (v_1), pela Equação 8 do Capítulo 3 obteve-se a densidade média de 910 g/L para o polietileno.

4.2. Monitoramento da Pressão e Vazão

A Tabela 2 do Capítulo 3 apresenta os intervalos de tempo pré-determinados para as coletas de amostras durante o processo, as quais foram monitoradas através do sistema analógico e digital instalado para melhoria do processamento de dados. Essa metodologia foi aplicada visando estudar e correlacionar os fenômenos observados às variações da pressão e vazão no HC e HM.

As Figuras 17 e 18 mostram os perfis da variação lida da vazão e pressão de alimentação por meio do sistema digital durante a hidrociclonagem para vazões intermediárias e altas ajustadas no rotâmetro analógico ($Q_{A,R}$), para os intervalos de coleta de amostras (t_2 para alimentação; t_4 para *over* e *under*) e intervalos referentes a operação dos sistemas sem coletas (t_1 e t_3).

Figura 17 - Variação do comportamento da vazão e pressão lidas nos intervalos de tempo de estabilização e coletas no HC.

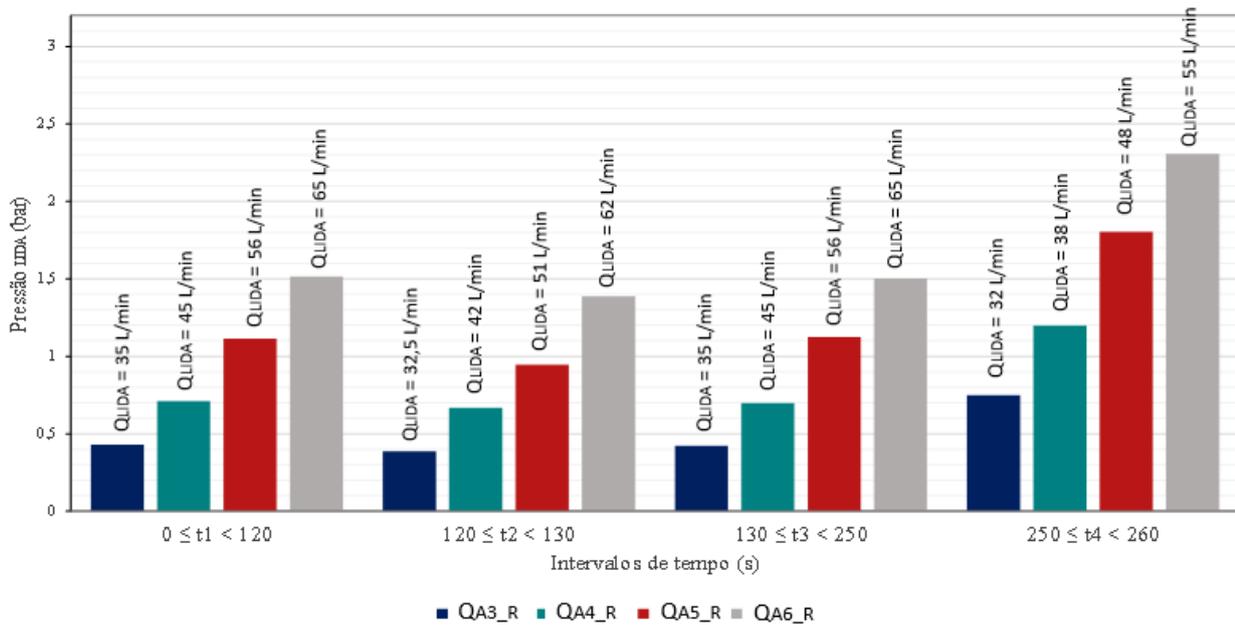
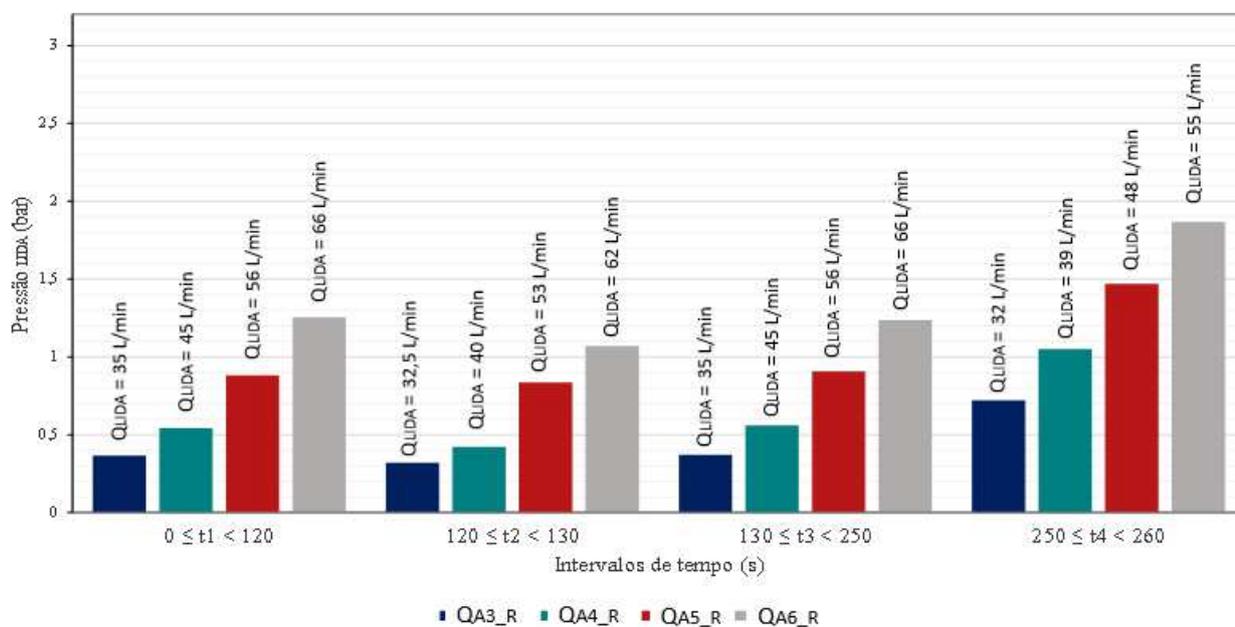


Figura 18 - Variação do comportamento da vazão e pressão lidas nos intervalos de tempo de estabilização e coletas no HM.



Após recirculação e anterior às coletas, os sistemas operaram por exatos 2,0 minutos à uma vazão Q_{A_R} , detalhadas em 3.4.3 do Capítulo 3, sendo considerado como tempo de estabilização dos sistemas, t_1 e t_3 das Figuras 17 e 18. Um comparativo da vazão

e pressão lidas nesses intervalos apresenta uma “rápida” estabilização conseguida nos sistemas, mesmo após o distúrbio promovido pela abertura dos pontos de coletas *over* e *under* em t_3 .

Observa-se nas Figuras 17 e 18 que a abertura dos pontos de coleta promoveu uma queda nos valores de vazão e aumento de pressão lidas, sendo registradas maiores oscilações no intervalo t_4 , independente da vazão ajustada no rotâmetro analógico (Q_{A_R}) e do sistema posto em operação (HC ou HM). Ao impedir o retorno da mistura para o tanque (pelo fechamento dessas válvulas) e iniciar a coleta na corrente (pela abertura dos pontos de coleta *over* e *under*), mudanças fluidodinâmicas nas correntes da água foram promovidas sendo estas também decorrentes das mudanças existentes na geometria hidráulica das tubulações/ saídas.

É interessante notar ainda que para altas vazões de alimentação no rotâmetro analógico ($Q_{A4_R} = 45$, $Q_{A5_R} = 55$ e $Q_{A6_R} = 65$ L/min), maiores valores de pressão lida foram apresentados no sistema digital, quando realizadas a abertura dos pontos de coleta *over* e *under* (intervalo t_4). Sendo a velocidade dada como a vazão pelo tempo, pela abertura das coletas e conseqüentemente diminuição de Q_{A_R} , menores velocidades de alimentação da suspensão foram percebidas, o que pode ter ocasionado uma menor dispersão dos MP traduzindo-se por maiores perdas por atrito e então, maiores pressões percebidas para este intervalo.

Ao se trabalhar menores vazões de alimentação no rotâmetro analógico (15 e 25 L/min), além das abordadas graficamente nas Figuras 17 e 18, notaram-se pequenas oscilações nos flutuadores do rotâmetro, não possibilitando a leitura da vazão e pressão com exatidão. Ao utilizar o sistema digital, que fornece melhor escala de medição foi então possibilitada a leitura dessas variáveis no processo, sendo possível notar que menores capacidades de processamento causaram maior instabilidade nos sistemas.

Para a variável pressão, foi possível perceber o quão sensível foi esta variável à pequenas mudanças no sistema, sendo para qualquer vazão de alimentação uma menor pressão promovida no HM face ao HC. O sistema digital implementado, permitiu leitura e aquisição dos dados de vazão e pressão com exatidão versus os valores ajustados no rotâmetro analógico (Q_{A_R}), para avaliação de desempenho dos sistemas propostos.

4.3. Fração de Massa Recuperada (FRM)

Um dos parâmetros avaliativos de sistemas que promovem separação, a exemplo dos hidrociclones, é a parcela de matéria alimentada que foi recuperada ao final do processo. O cálculo de FRM foi realizada para as correntes *overflow* e *underflow* do hidrociclone, utilizando as Equações 1 e 2 apresentadas no Capítulo 3.

Nas seções seguintes são apresentados os resultados para as frações de MP recuperadas nos sistemas com hidrociclone convencional e modificado.

4.3.1. Sistema Hidrociclone Convencional

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos da FRM para o sistema convencional a partir de amostras coletadas em 3,0 segundos, para cada vazão de operação.

Tabela 4 - Valores para as frações de MP recuperados nas correntes de saída do HC frente à vazão de alimentação.

$Q_{A,R}$ (L/min)	Q_{LIDA} (L/min)	P_{LIDA} (bar)	FRM_{over} (%)	FRM_{under} (%)	Erro (%)
15	15	0,2	43,10	88,06	31,16
25	21	0,6	21,41	90,25	11,66
35	32	0,8	12,03	94,36	6,39
45	38	1,2	9,82	95,25	5,07
55	48	1,8	6,46	96,95	3,41
65	55	2,3	8,64	97,38	6,02

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4 é possível observar que o hidrociclone convencional proporcionou uma alta recuperação de microplásticos (PE) no *underflow* e uma diminuição dessa recuperação no *overflow*, em função do aumento da vazão de operação do sistema. Os perfis quantitativos apresentados pelos valores da FRM traduzem o que vêm sendo abordado por autores acerca de estudos com hidrociclones, nos quais, em geral, o desempenho do hidrociclone é melhorado pelo aumento das condições de operação do sistema.

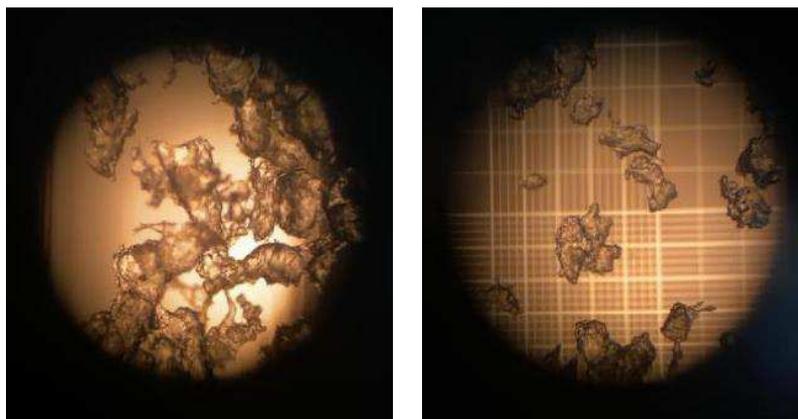
De acordo com o cálculo da FRM, era de se esperar que a soma das FRM das correntes *over* e *under* correspondessem a 100% (igual a unidade), todavia esse valor foi excedido na recuperação de massa pelo sistema HC. Parâmetros envolvidos na hidrociclonagem, como: tempo de coleta de amostra, variação da velocidade dos microplásticos no interior das tubulações em função de seus diferentes diâmetros, bem como pontos de acúmulos de microplásticos podem ter contribuído para “desordem” do comportamento dos MP na fase aquosa. A operação do sistema em intermediárias e altas vazões permitiu a obtenção de uma menor discrepância para soma da FRM nas saídas do hidrociclone, como apresentado pelo cálculo do erro da Tabela 4, sendo desta forma uma menor variação na coleta de MP percebida quando impostas altas condições de operação.

Ainda diante o exposto, menores condições de operação no sistema contribuíram para uma menor fração de MP recuperada no *underflow*, consequência de uma provável redução no tempo de residência para a mistura água-microplásticos no interior do equipamento. Os resultados mostram um propício aparecimento de fluxo “curto circuito” de partículas da suspensão alimentada a baixas condições de operação, traduzindo-se por uma facilidade de carreamento de MP pelo *overflow* como consequência de menores velocidades promovidas na alimentação.

É interessante notar que mesmo o microplástico PE apresentando uma densidade próxima da água, esperava-se que maiores frações de MP fossem recuperadas no *overflow*, no entanto os dados da Tabela 4 indicam que o microplástico tende a se direcionar igualmente pela saída inferior ou *underflow*, este fato pode ser explicado pela forma das partículas do microplástico, regiões mais concentradas e distribuição de tamanho das partículas, influenciando diretamente nas forças de arraste, empuxo, centrífuga e peso atuantes no hidrociclone, termos estes explorados em detalhes por Barbosa (2011).

Vazões intermediárias e mais altas no HC promoveram um aumento das forças de arraste e centrífuga e consequentemente um arraste das partículas de plástico, mesmo apresentando uma densidade menor que da água. Essa predominância indica que a forma e comportamento das partículas em água, como observado na Figura 19 para diferentes regiões de uma mesma amostra, são uma possível explicação para maiores valores de coletas de MP (mínima de 94% para o HC) na saída nomeada concentrada, como esperado para maiores vazões ou pressões de alimentação em separadores ciclônicos.

Figura 19 - Imagens microscópicas do microplástico em água.



4.3.2. Sistema Hidrociclone Modificado

A fração recuperada de micropartículas para o hidrociclone modificado está apresentada na Tabela 5. A priori, pequenas mudanças para a vazão lida do sistema em operação foram percebidas em comparação ao obtido no sistema da Tabela 4, tendo ambos os sistemas uma boa capacidade de processamento (capacidade de alimentação).

Tabela 5 - Valores para as frações de MP recuperados nas correntes de saída do HM frente à vazão de alimentação.

$Q_{A,R}$ (L/min)	Q_{LIDA} (L/min)	P_{LIDA} (bar)	FRM_{over} (%)	FRM_{under} (%)	Erro (%)
15	15	0,15	43,41	53,94	2,64
25	20	0,25	65,41	43,36	8,78
35	32	0,75	61,00	32,00	6,99
45	39	1,1	61,68	35,59	2,72
55	48	1,5	66,78	28,65	4,56
65	55	1,9	69,59	33,12	2,71

As frações de massa recuperada PE no *overflow* para o sistema HM apresentaram percentual médio de 70% dos sólidos alimentados ao sistema para intermediárias e altas vazões de alimentação no sistema. Diferentemente do obtido para o hidrociclone convencional, o hidrociclone modificado teve seu comportamento em acordo com o

princípio de separação por hidrociclones, descrito em literatura, sendo maiores parcelas de partículas (leves/ menos densas) induzidas a saída superior do equipamento. Esse comportamento foi observado para o sistema HM, exceto para a menor vazão e pressão de operação do sistema.

Pode-se observar pelos resultados apresentados na Tabela 5 que, apesar de uma maior recuperação de microplásticos pelo *overflow*, 33% em média do MP foi direcionado ao *underflow*. Ao se introduzir um tubo alongado no centro do hidrociclone, apesar de se promover menor fluxo “curto-circuito” de partículas no interior do equipamento, o comprimento do *vortex finder* pode também influenciar na diminuição na parcela de partículas que migram do vórtice ascendente para o descendente e, conseqüentemente uma menor coleta desses sólidos no *underflow*, como abordado por Silva (2014).

Um aumento na vazão de operação para o HM promoveu uma maior coleta de massa de MP na corrente concentrada, neste caso *overflow*, enquanto que menores vazões provocaram uma certa divisão de fluxo de partículas que adentraram no sistema. O cálculo do erro para a soma de FRM pelas correntes *over* e *under* do HM em relação à unidade, apresentado na Tabela 5, mostram pequenas discrepâncias para o valor referência, tendo a modificação do *vortex finder* promovido menores correntes de fluxo “curto circuito” próximas à região de alimentação do hidrociclone e conseqüentemente, passagem do volume da suspensão por todo o comprimento do HM.

Para o caso de vazões intermediárias impostas, pode-se perceber um comportamento estável do processo, não havendo ganho nem perda na fração de MP recuperada no *overflow* e para maiores vazões um aumento em torno de 4-8% de microplásticos nessa corrente concentrada, o que pode não justificar o acréscimo de custo operacional na recuperação de maior fração de MP em comparação ao já obtido em condições intermediárias (32 e 39 L/min).

Em conjunto aos resultados observados para as séries de experimentos, nota-se que a vazão de 15 L/min apresentou-se como mais instável, sendo impossibilitada sua leitura no rotâmetro analógico, e no digital valores médios por volta de 15 a 17 L/min. Operando o sistema a baixas vazões pode-se perceber como respostas ao ocorrido, um possível choque de correntes de fluxo que adentram no equipamento e saem pelo *overflow* num mesmo instante, causando o aparecimento de fluxo “curto circuito” no sistema HC. Em se tratando do HM, parcelas acumuladas de MP próximas à saída inferior, induzidas ao centro do equipamento pelo forte vórtice ascendente, pode ter sido fenômeno ocorrido em dado instante de tempo.

4.4. Sistema HC versus Sistema HM

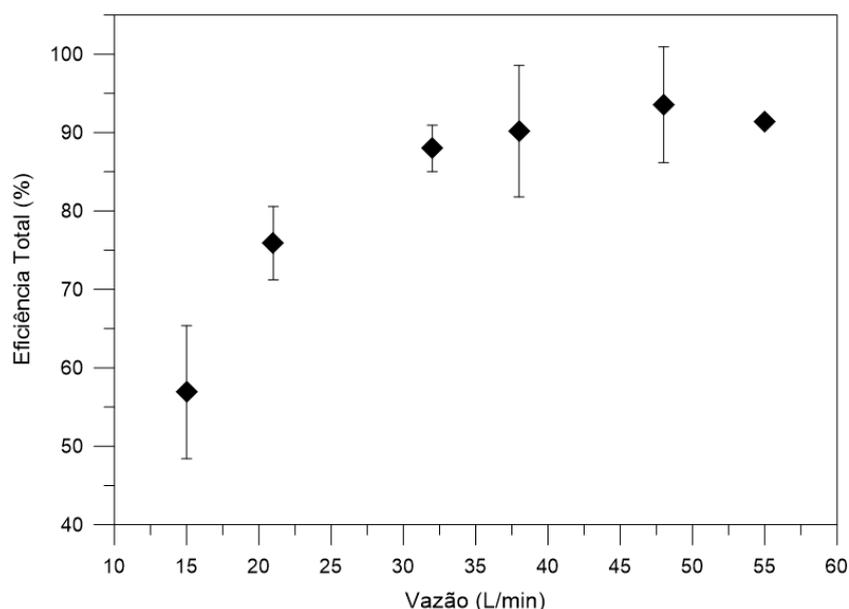
A eficiência total leva em consideração a separação fluido-sólido através da contribuição da parcela centrífuga e parcela do chamado “efeito T”, inerente ao processo.

Essa seção abordou a análise individual e comparativa dos sistemas HC e HF em termos da eficiência total (Equações 3 e 4), tratando-se de resposta inicial, norteadora e avaliativa para o processo de separação, e eficiência reduzida, ou ainda, eficiência de separação obtida pela força centrífuga promovida no interior do equipamento.

4.4.1. Eficiência Total

A eficiência total do hidrociclone convencional ($L_{v1} = 63,0$ mm) foi averiguada com a realização de 18 séries de experimentos, variando-se a vazão de alimentação para uma concentração constante de microplásticos PE, conforme apresentado no item 3.5 do Capítulo 3. Para o HC, independente das parcelas de forças atuantes no processo de separação, o sistema mostrou-se de alta eficiência, sendo alcançado até para baixas pressões em torno de 55% na remoção dos MP alimentados em suspensão, como apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Eficiência total - corrente *underflow* do Sistema HC.



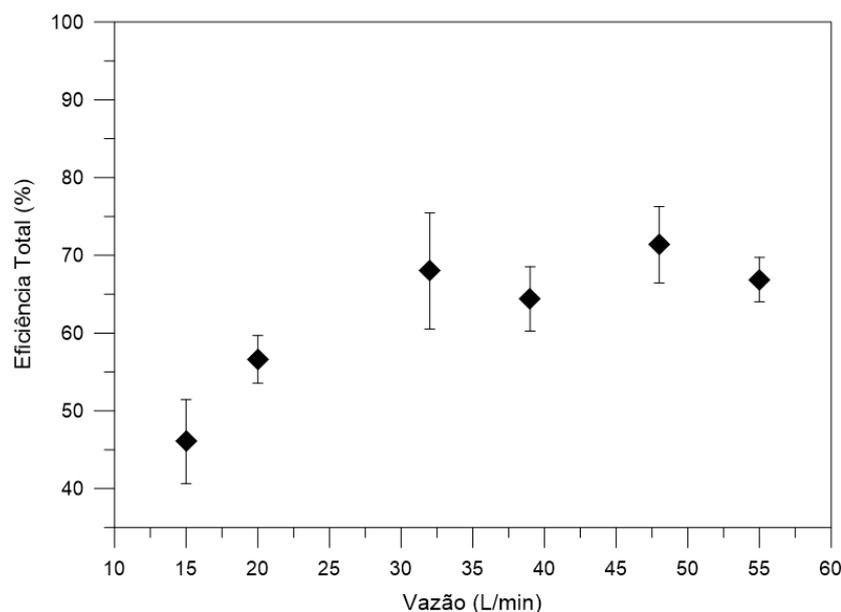
Observa-se na Figura 20 que o sistema HC apresentou tendência de curva crescente em relação a eficiência total obtida, corroborando com dados na literatura para os quais o aumento das condições de operação como vazão ou pressão induzem a uma maior coleta de partículas sólidas na separação fluido-sólido.

É sabido que altas condições impostas a um sistema se traduzem em altos custo de operação, os resultados obtidos para o presente sistema mostraram que a utilização de faixas intermediárias para a vazão alimentação promoveram eficiências totais com valores bem próximos e comportamento da curva quase constante (como pode-se observar no trecho entre 32 L/min à 58 L/min da Figura 20), frente às maiores vazões de operação. Desta forma objetivando um menor custo de operação, uma remoção em torno de 92% do MP pode ser conseguida com condições não extremas de operação, como no HC por meio da vazão de alimentação de 38 L/min operando a 1,2 bar.

Para baixas vazões de alimentação, trazendo à tona o já abordado, tem-se uma maior instabilidade do sistema hidrociclone, nesse contexto os dados apresentados graficamente na Figura 20 devem ser tratados com bastante minúcie, visto que a eficiência total na condição de menor capacidade de processamento pode não ser condizente a real coleta de partículas neste ponto. Desconsiderando a menor capacidade de processamento ($Q_{A,R} = 15$ L/min), o sistema HC permitiu altas taxas de remoção para MP polietileno, ou ainda, 75% de eficiência mínima conseguida para uma segunda menor vazão ajustada no sistema.

Maiores taxas de remoção de microplásticos no sistema HC foram obtidas por um acréscimo no termo de vazão de operação até 48 L/min, sendo percebido que acima dessa condição o sistema HC tendeu a ser menos eficiente. Logo para a série de experimentos realizadas, a condição máxima de alimentação surge como o ponto o qual promove menores eficiências totais de separação, podendo ser explicado por uma maior turbulência e não benefício desta à ação centrífuga na separação de partículas leves.

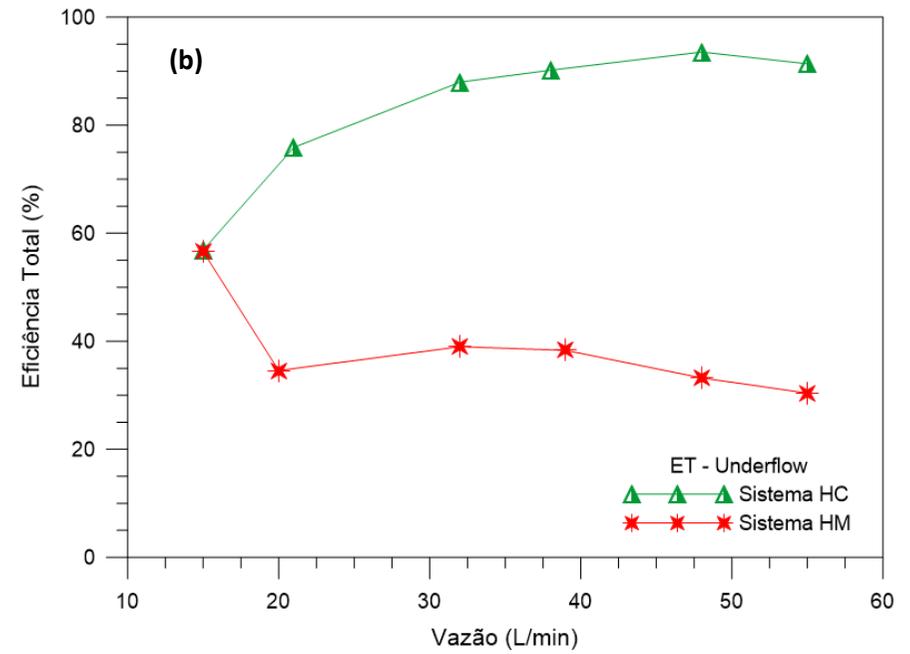
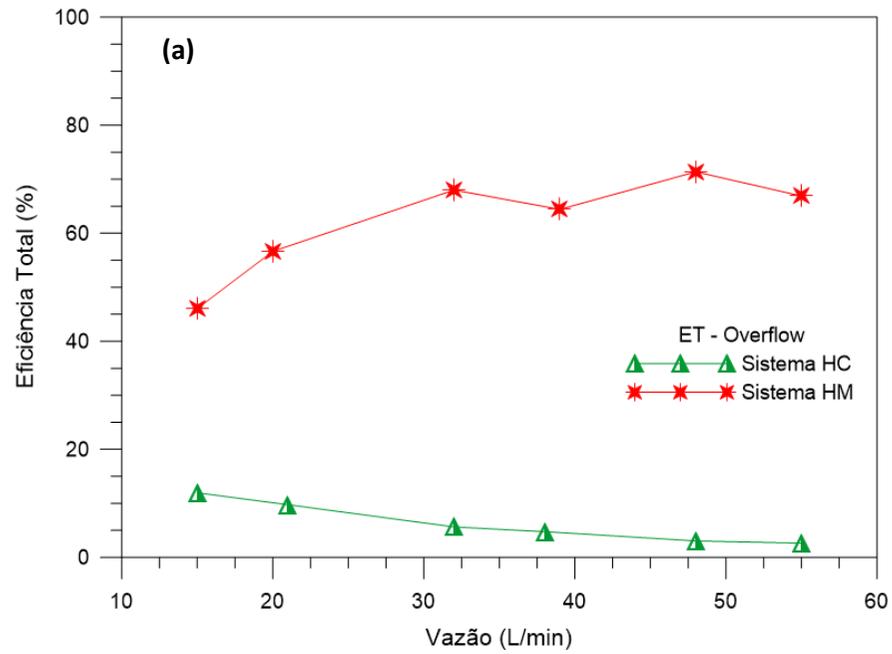
A Figura 21 apresenta graficamente os dados obtidos para eficiência total do sistema HM ($L_{VT} = 273,0$ mm) operando nas mesmas condições de vazão de alimentação e concentração de PE do sistema HC. Pode-se observar que para quaisquer das condições de vazão impostas ao sistema HM, o mesmo apresentou eficiência total máxima de 72%, e no geral, eficiência total de separação na faixa de 47 a 72%.

Figura 21 - Eficiência total - corrente *overflow* do Sistema HM.

De acordo com o apresentando graficamente, nos trechos correspondentes à 32 L/min e 48 L/min e 39 L/min e 55 L/min houveram comportamentos crescente e decrescente, respectivamente, para a eficiência total de separação dos microplásticos. Esse comportamento traduz uma mudança na hidrodinâmica do hidrociclone pela inserção de corpo tubular no centro do equipamento. Apesar da promoção da “quebra” do *air core* existente e fluxo “curto circuito” de partículas pelo *overflow*, a modificação na seção do *vortex finder* funcionou como “barreira” à migração das partículas do vórtice ascendente para as paredes do hidrociclone e vice versa, originando uma não constância no que diz respeito as frações de MP recuperadas, que foram ora induzidas à saída concentrada ora a saída diluída.

Assim como observado para o sistema HC, os dados apresentados na Figura 21 permitiram a obtenção de condições intermediárias satisfatórias, sendo possível uma recuperação em torno de 70% dos MP alimentados em suspensão a $Q_{LIDA} = 32$ L/min, o que torna o sistema interessante à obtenção de uma operação menos onerosa para esta condição com uma baixa pressão de alimentação de 0,75 bar.

Adentrando na discussão das particularidades de cada sistema hidrociclone proposto e seu desempenho na remoção de microplásticos, foram também obtidos os dados de eficiência total para as outras duas correntes, *underflow* para o HM e *overflow* para o HC, denominadas de correntes “diluídas”. A Figura 22 apresenta o percentual de remoção obtido nas correntes diluídas e correntes concentradas dos dois separadores ciclônicos.

Figura 22 - Eficiência total (a) correntes *overflow* e (b) correntes *underflow*, dos sistemas HC e HM.

É interessante notar que, independentemente do sistema posto em operação, as correntes concentradas em MP apresentaram, no geral, comportamentos crescentes para eficiência total com o incremento de valores nas vazões (ou pressões) de alimentação, comportamento este já apresentado em trabalhos da literatura.

A saída *overflow* apresentou maior concentração de MP por L de amostra presente no sistema HM, de modo que a inserção do *vortex* II promoveu uma inversão do observado anteriormente para o sistema HC, que teve como corrente concentrada a saída inferior do hidrociclone (Figura 22b)

O observado na Figura 22a para o sistema HM pode ser explicado pela quebra e modificação do comportamento hidrodinâmico do hidrociclone em função da modificação realizada em seu centro, “barreira” esta que pode ter levado a menores intensidades das forças atuantes das partículas acarretando uma maior coleta dos microplásticos pelo vórtice ascendente. Fator contribuidor para ocorrência do fenômeno observado está relacionado ao aparecimento de um vórtice ascendente de maior intensidade, permitindo o carreamento dos MP, leves e de pequeno diâmetro, para saída superior do hidrociclone. Para o HC, a não existência do *vortex finder* alongado com cortes, permitiu a migração das partículas do centro às paredes do equipamento combinada ao arraste do fluido contendo partículas, logo menor recuperação dos MP no *overflow* com aumento da vazão de operação.

Em se tratando do obtido para eficiência na saída *underflow* em ambos os sistemas, como apresentado na Figura 22b, é possível notar que mesmo o HM não apresentando a saída inferior como corrente concentrada em MP, para a menor vazão imposta ao sistema (15 L/min), apresentou desempenho semelhante ao observado pelo sistema HC nesta condição, sendo possível para ambos a obtenção de uma eficiência total de separação de aproximadamente 56%. Logo, uma baixa vazão traduziu-se em menores velocidade de entrada, menores choques da suspensão com o tubo central do HM e maior carreamento das partículas num dado volume de fluido para o *underflow*.

No HC mesmo havendo o incremento em valores de vazão do sistema, a partir do ponto de operação de 32 L/min os dados para eficiência total mantiveram-se quase que constantes, sendo conseguidas altas taxas remoção do microplásticos para condições intermediárias impostas no sistema.

Em contraste ao supracitado, foi observado comportamento decrescente para curva de ET do HM, para corrente *underflow* na Figura 22b, em suma, enquanto um aumento de vazão acarretou maior direcionamento dos microplásticos as paredes do hidrociclone

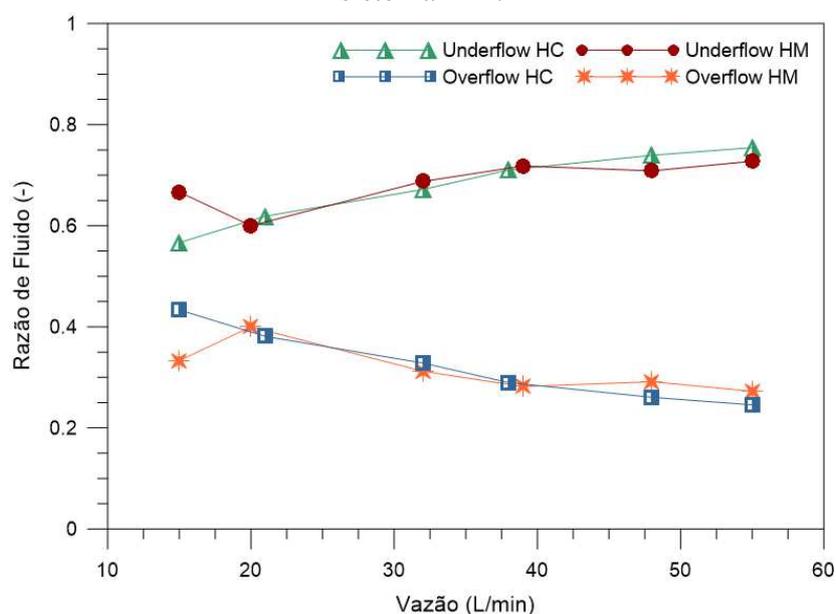
convencional, a quebra do gradiente de pressão existente do centro as paredes do equipamento pela alteração do *vortex*, pode ter gerado zona de menor pressão próxima no centro e colaborado para o aumento de MP no fluxo ascendente. Outro fenômeno observado durante execução dos experimentos foi o acúmulo dos MP para configuração modificada do hidrociclone, havendo um processo de sucção de partículas através dos cortes axiais do HM.

4.4.2. Razão de Fluido

O efeito divisor das correntes no interior do equipamento, apresenta-se, por vezes como fator benéfico ou não na eficiência de separação, sendo parametrizado então como uma eficiência mínima obtida. A razão de fluido compõe a eficiência total nos dados apresentados na seção anterior, podendo-se através da R_L ser capaz de se avaliar o potencial poder de separação do hidrociclone.

Sendo o R_L o parâmetro que relaciona a taxa mássica de água descarregada juntamente às partículas sólidas na corrente *overflow* (Equação 5) e *underflow* (Equação 6) e a taxa de massa de água que alimenta o hidrociclone, a Figura 23 apresenta as respostas para razão de fluido no HC e HM, considerando os dados de vazão de alimentação para os sistemas em operação e coletas abertas.

Figura 23 - Razão de fluido em função da vazão de alimentação no sistema HC e sistema HM.



De acordo com a Figura 23, menores taxas mássicas de água foram obtidas para corrente *overflow* nos sistemas, sendo a corrente responsável pela menor descarga de fluido durante operação dos sistemas.

Observando agora o comportamento da R_L para o *underflow* no sistema HC (Figura 23) juntamente as eficiências expressas na Figura 22b para este sistema, nota-se que maiores eficiências de separação foram obtidas para maiores razões de fluido percebidas na corrente *underflow* com aumento da vazão de alimentação.

Com foco nas correntes do hidrociclone que permitiram uma maior concentração de MP (*overflow* para o HM e *underflow* para o HC), dados de eficiência total nos sistemas e razão de fluido percebidas são apresentados por meio de gráficos de barra (Figuras 24 e 25), sendo possível correlacionar essas variáveis na análise dos sistemas.

O aumento no volume de fluido descarregado na saída inferior, isto é, razão de fluido, foi claramente um fator contribuidor para alta remoção dos microplásticos no sistema HC, relação esta que não foi observada nas mais altas eficiências obtidas no sistema HM.

Figura 24 - Razões de fluido percebidas no HC e HM para as diferentes condições de vazão de alimentação da suspensão, durante processo de remoção dos MP.

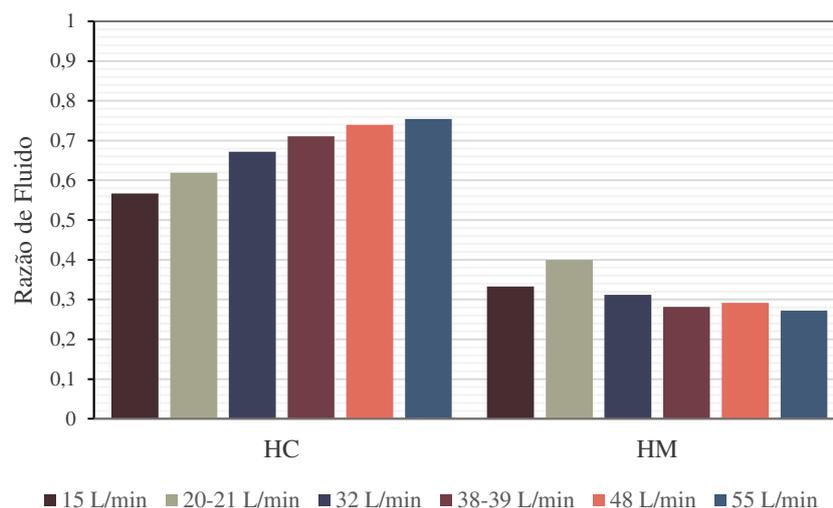
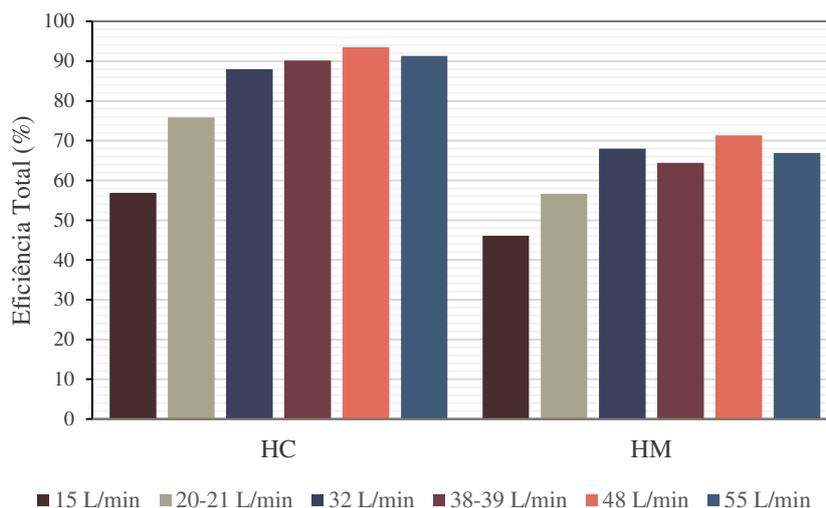


Figura 25 - Eficiências Totais obtidas no HC e HM para as diferentes condições de vazão de alimentação da suspensão, no processo de remoção dos MP.



Para as séries de experimentos realizados no HC, pode-se notar nas Figuras 24 e 25 que o aumento da vazão de alimentação induziu a um maior direcionamento de água contendo microplásticos para as paredes do hidrociclone, conseqüentemente uma maior fração dos sólidos descarregados na saída inferior, exceto na condição de maior vazão (55 L/min), que mesmo apresentando maior razão de fluido na corrente concentrada não proporcionou uma maior eficiência no sistema.

Em contrapartida, para sistema HM foi possível a remoção de MP pelo *overflow* com menores razões de fluido percebidas quando comparado ao sistema convencional, desta forma apesar da eficiência total obtida na operação do HM ter se mostrado abaixo do apresentado em HC, o processo de separação pelo hidrociclone modificado pode se mostrar como alternativa viável na condição de vazões intermediárias. Para menores taxas mássicas de água descarregadas junto às partículas, como observado no HM, um menor gasto energético pode ser conseguido no processo de filtração desse conjunto para retirada somente do particulado. Logo, como comparativo:

- 75% do PE removido em HC versus 58% do PE removido pelo HM para uma vazão Q_2 de 20 L/min e R_L (para as correntes concentradas) igual a 0,38 e 0,62, respectivamente;

- 88% do PE removido em HC versus aproximadamente 68% do PE removido pelo HM para uma vazão Q_3 de 32 L/min e R_L (para as correntes concentradas) igual a 0,31 e 0,67, respectivamente.

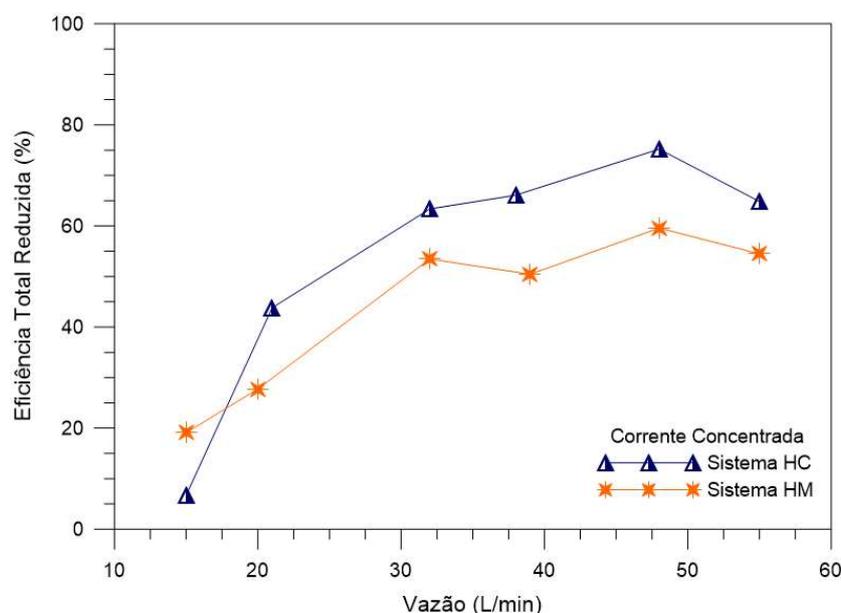
Para as séries de experimentos, e eficiências totais obtidas.

4.4.3. Eficiência Total Reduzida

Em se tratando somente da contribuição pela aceleração centrífuga no processo de separação por hidrociclone, o cálculo da eficiência reduzida parametriza tal. A ER apresenta em seu cálculo o desconto da parcela de fluido contribuinte ao processo de separação.

A Figura 26 apresenta os dados de eficiência total reduzida (Equação 7) para as correntes concentradas em MP nos dois sistemas hidrociclone.

Figura 26 - Eficiência total reduzida em função da vazão para as correntes concentradas de ambos os sistemas.



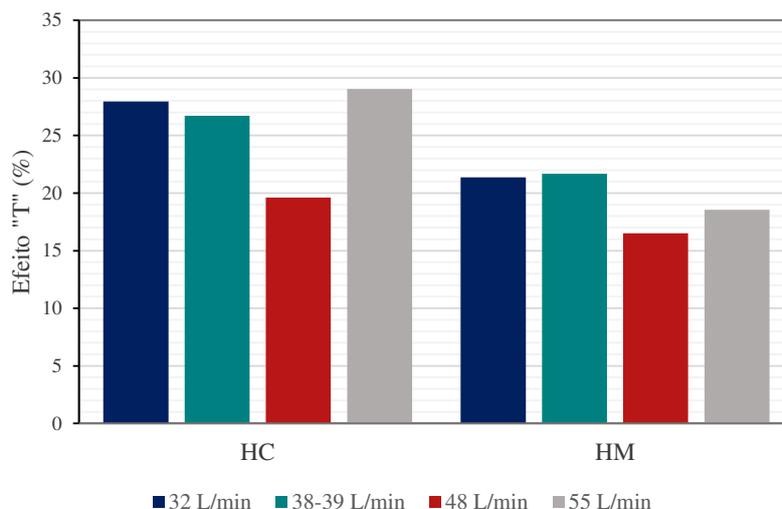
O comportamento crescente para as eficiências totais no sistema HC, como pôde ser observado na Figura 22, também é apresentado para eficiência reduzida apresentada na Figura 26. Por esta última é possível notar que quase nenhum efeito centrífugo é responsável pela separação dos microplásticos a baixa vazão de alimentação, podendo estar relacionada a baixa velocidade tangencial imposta ao sistema, parâmetro também responsável pela intensidade do campo centrífugo no interior do equipamento.

Na Figura 26 é possível observar, para os trechos de 39 e 55 L/min de vazão de alimentação no HM um comportamento similar ao observado para eficiência total, tendo sido na condição de maior vazão ($Q_{LIDA} = 55$ L/min), observada uma certa redução de eficiência também para o sistema convencional.

Apesar do HM ter apresentado maior eficiência de coleta de partículas para a vazão de 15 L/min por meio da corrente *underflow*, como já abordado, uma eficiência total reduzida em torno de 20% pela corrente *overflow* foi conseguida para essa menor condição de vazão.

Os resultados confirmam um forte efeito centrífugo para níveis intermediários e altas de capacidade de processamento nos sistemas propostos, se mostrando como maior parcela envolvida na eficiência total de separação. Considerando esses níveis de capacidade de processamento, a percentagem de contribuição do efeito “T” isoladamente e comparativamente aos sistemas HC e HM (Figura 27) são exploradas, como diferença correspondente entre as eficiências estudadas.

Figura 27 - Porcentagem referente ao efeito “T” na separação PE para condições intermediárias e altas de capacidade de processamento.



Pode-se observar na Figura 27 que, em geral, a promoção do efeito “T” como responsável na separação de PE foi acentuada para configuração de hidrociclone convencional, em contrapartida à uma separação por maior parcela de efeito centrífugo para o hidrociclone modificado. Para maior eficiência total e total reduzida nos sistemas na vazão de 55 L/min, nota-se um menor efeito “T”, sendo a contribuição do efeito centrífugo acentuada para tal capacidade de processamento.

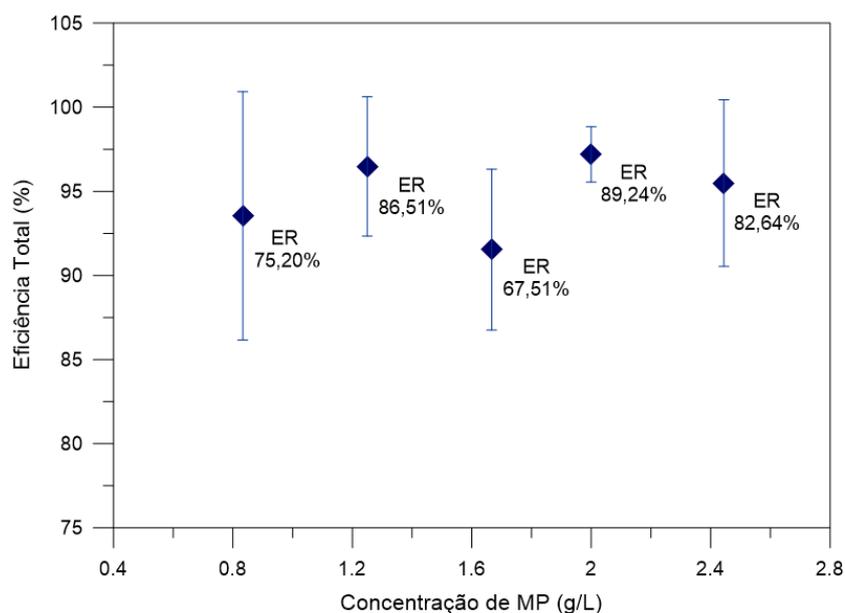
Um maior efeito divisor no sistema convencional quando promovida uma maior vazão de alimentação da suspensão, corrobora com a queda da eficiência de separação no equipamento, não permitindo que pacotes do PE continuem sendo direcionados às paredes do equipamento e descarregados na saída *underflow*.

Para todas as séries de experimentos, o sistema modificado promoveu menores razões de fluido na corrente concentrada e menores efeitos divisores de corrente, sendo: para operações que permitiram eficiências máximas de 71,36%, considerando todos efeitos envolvidos e 60%, envolvendo somente efeito centrífugo, na remoção de PE por HM.

4.5. Efeito da Concentração de MP no Sistema de Hidrociclone Convencional

O estudo do desempenho do sistema hidrociclone frente a aplicações envolvendo diferentes concentrações de microplásticos PE foi realizado. Os dados de eficiência do hidrociclone convencional foram levantados para 4 novas massas do microplástico em solução à uma vazão de 48 L/min, vazão esta que promoveu maior remoção do PE a concentração constante de 0,83g/L. A Figura 28 apresenta os resultados de eficiência de separação no HC para as diferentes concentrações de polietileno na alimentação.

Figura 28 - Eficiências no sistema HC em função da percentagem de MP alimentados ao sistema à uma vazão de 48 L/min.



Mesmo o sistema HC operando à uma vazão de alimentação constante, foi possível observar uma recuperação ora maior ora menor de partículas nas amostras de saída *underflow*, de acordo com o aumento da concentração de alimentação dessas partículas no sistema. O resultado apresentado vai de encontro com o abordado em

literatura por Svarovsky (2000), sendo preferível suspensões diluídas à obtenção de melhores eficiências, deste modo as respostas obtidas na Figura 30 instigam uma investigação minuciosa do ocorrido nesse processo de separação, sendo possível listar algumas particularidades envolvidas como forma de elucidar o observado na remoção do polietileno pelo sistema HC:

- As suspensões com concentrações 0,83; 1,25; 1,67; 2 e 2,44 g/L constituíram-se de polietileno, para o qual partículas de menor diâmetro mantiveram-se dispersas em água sem a necessidade de fatores externos em contrapartida à de maiores diâmetros (0,6mm), sendo a agitação constante fator determinante para sua dispersão;

- Forte atração eletrostática entre as partículas que quando colocadas em meio aquoso apresentaram esse comportamento acentuado.

Nesse contexto, de acordo com o descrito e observado quantitativamente (Figura 28), as eficiências de separação no HC à vazão constante podem estar relacionadas a um possível “empacotamento” de partículas PE que acarretaram um instável comportamento no que diz respeito ao direcionamento destas às paredes e saída concentrada.

Para as séries de experimentos realizadas com médias na Figura 28, efeitos divisores de correntes entre 8 e 19% da eficiência total obtida estiveram presentes no sistema HC, durante processo de separação para as várias percentagens de PE alimentados em suspensão no sistema.

Para os casos estudo, uma maior remoção de MP parametrizadas pelas eficiências total e reduzidas (ER) foram obtidas para suspensão com 0,125% e 0,2% em massa de polietileno, concentrações diluídas assim como as demais utilizadas e, não suficientes à obtenção do comportamento evidenciado por Svarovsky (2000) com aumento do percentual de sólidos.

4.6. Efeito e Interação das Variáveis na Separação de MP

De acordo com os resultados para remoção de microplásticos por hidrociclones (seções 4.3 e 4.4), foi possível a realização de estudo dos efeitos principais e de interação entre as variáveis (fatores) sobre as respostas no processo de separação, resumidos em:

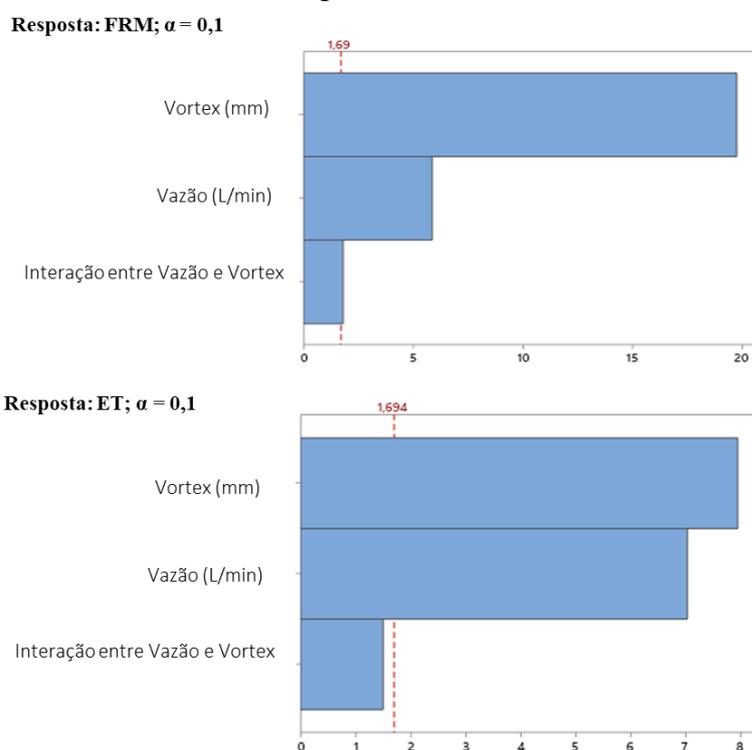
- Fatores: (I) Vazão, avaliada em seis níveis (15, 25, 32, 38, 48 e 55 L/min); (II) Configurações do hidrociclone (HC e HM), avaliada pelo tipo do *vortex finder* (de alturas 63,0 e 273,0 mm);

- Respostas: (I) Fração recuperada de microplásticos; (II) Eficiência Total.

A Figura 29 apresenta os diagramas de pareto para os efeitos e interação da vazão de alimentação e configuração do hidrociclone sobre as respostas, com nível de confiança de 90%. As barras proporcionais apresentam a magnitude de cada efeito de acordo com sua significância estatística., parametrizadas pela linha tracejada em vermelho.

Para os resultados apresentados, verifica-se que ambos os fatores apresentam influência estatisticamente significativa ($p < 0,1$) sobre a fração de massa recuperada e eficiência total da separação, tendo sido a configuração do hidrociclone um forte fator frente à recuperação dos microplásticos.

Figura 29 -Diagrama de pareto para a fração de MP e eficiência de separação no processo.



Como influência às respostas analisadas, a Figura 29 evidencia que a interação entre a vazão de alimentação do sistema e configuração do mesmo teve pouca ou nenhuma significância estatística.

Foi realizada a análise da variância (ANOVA) com nível de confiança de 90% para $p < 0,1$, tendo o ajuste do modelo expresso pelo coeficiente de determinação (R^2). Para a fração de massa recuperada obteve-se um R^2 de 0,9243 indicando que 92% dessa

variável dependente é explicada pelos fatores (variáveis independentes), frente a um R^2 igual a 0,7610 expresso para a ET, apontando que as variáveis independentes explicam 76% da variação ocorrida na variável dependente.

CONCLUSÕES

O sistema hidrociclone teve seu desempenho avaliado em suas formas convencional e modificada na remoção de polietileno de baixa/média densidade, simulando águas contaminadas por estes resíduos plásticos.

Condições de operação foram avaliadas, visto a influência destes parâmetros na recuperação de microplásticos, tendo sido independente da condição de alimentação imposta, altas capacidades de processamento conseguidas nos sistemas HC e HM, com mínimo de 15 L/min e máximo mensurável de 65 L/min (ao considerarmos os sistemas operando com coletas fechadas).

Comportamentos distintos foram observados entre os dois sistemas hidrociclone propostos, de modo que um comprimento pequeno para o *vortex finder* no hidrociclone convencional, correspondente à 12% do corpo do hidrociclone (L_T), levou à saída inferior como corrente concentrada em microplásticos, em contrapartida ao alongamento do *vortex* com aproximados 50% do comprimento L_T que provocou uma inversão de corrente. Independente do sistema, e para as condições impostas, o formato irregular das partículas e a baixa diferença de densidade entre o particulado e fluido foram fatores desafiadores no processo de separação proposto.

Ao avaliarmos o desempenho do sistema convencional para a suspensão menos concentrada em PE, foi possível a remoção de um quantitativo mínimo de 88% em fração de massa do microplástico alimentado em suspensão, e eficiências acima de 90% para capacidades de processamento intermediárias. Apesar de menores eficiências de separação obtidas para o sistema HM, foram percebidas menores pressões de alimentação para capacidades de processamento similares às do sistema convencional.

Acréscimos na razão de fluido foram percebidos com o aumento da vazão de alimentação para o HC, diferindo-se para o modificado, de modo que para este último uma remoção de 60% foi conseguida com uma razão de fluido de pelo menos 2x menor do que a obtida no HC na remoção de 75% do MP. A razão de fluido foi parâmetro diretamente proporcional ao aumento da vazão de alimentação no sistema convencional e quase constante para o HM, considerando vazões intermediárias e altas de alimentação.

Tendo sido obtidas maiores eficiências de separação para o sistema convencional, seja por efeito centrífugo ou efeito divisor, o efeito da concentração de microplástico

alimentada foi avaliada e percorrida somente para o sistema convencional na condição listada como condição ótima (em consideração ao removido de PE a 0,83 g/L). O aumento de quase 3x na massa de polietileno em água sintética provocou uma remoção a mais de 7% percentuais com relação ao obtido para a menor concentração (0,83 g/L), enquanto que para uma concentração de 1,66 g/L, o HC mostrou-se menos eficiente em aproximados mesmos 7% do obtido inicialmente.

O comportamento observado, juntamente aos demais já discutidos, expõem o desafio no tratamento de partículas leves e de forma irregular, e proposição de tecnologias com bom custo-benefício na remoção destas. Levando-se em consideração as condições impostas de operação, a melhor configuração proposta para remoção de um mínimo de 90% do microplástico da água, pôde ser conseguida com o hidrociclone convencional à vazão de alimentação de 38 L/min e pressão de 1,2 bar. Acima desta condição eficiências em torno de 93% ainda foram conseguidas no referido sistema, mas demandando uma maior vazão e pressão de operação.

O projeto e aplicação do hidrociclone modificado foi realizado, não sendo possível a separação de microplásticos polietileno de maior eficiência face a conseguida pela configuração convencional do equipamento.

A análise estatística realizada para os sistemas apresentou a configuração do hidrociclone (*vortex*) como fator de alta significância estatística para predição do modelo, sendo uma variável plausível de investigação em trabalhos futuros.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os desafios encontrados na remoção de plásticos em escalas nano e micrométricas do meio ambiente, e presença de várias das categorias desses plásticos, são propostas as seguintes ideias como continuidade da presente pesquisa:

- Propor e testar, experimentalmente e/ou numericamente:
 - Alturas do *vortex finder* na separação de PE por hidrociclones;
 - Operação em conjunto de dois ou mais hidrociclones.
- Aplicar a tecnologia por hidrociclones na separação de outros tipos de microplásticos, a exemplo de fibras têxteis, oriundos da lavagem de roupas sintéticas;
- Avaliar e propor a aplicabilidade das águas tratadas oriundas do processo de hidrociclonagem em processos secundários, visando menor custo energéticos nestes processos;
- Estudar os sistemas propostos por meio de simuladores frente à novas configurações de *vortex finder*, afim de obter-se um ótimo na remoção do MP.

PUBLICAÇÕES

A autora encontra-se com artigo científico extraído do presente trabalho em andamento, e compromete-se a publicar pós defesa, visto as adaptações e limitações que impediram a publicação em tempo hábil.

A autora, atendendo ao novo regulamento da PPGEQ – UFCG, publicou junto ao orientador e colegas no ano de 2021 artigo científico em revista científica na área de Engenharias II

Revista: Research, Society and Development, v. 10, n.16, e121101623331

Artigo: Evaluation of a hydrocyclone system and ceramic membrane for oily water treatment purposes.

DOI: 10.33448/rsd-v10i16.23331

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPLAST. (2020). A indústria de transformação e reciclagem de plástico no Brasil. Edição Especial Digital – Perfil 2020. Disponível em: http://www.simpesc.org.br/wp-content/uploads/2021/08/Perfil2020_abiplast.pdf
- Aguiar, N. R. H. (2021). Microplastics: characteristics, pollution, and, technologies for their removal form water – a- review. *Brazilian Journal of Development*, ISSN: 2525-8761, 78170
DOI:10.34117/bjdv7n8-168
- Alves, D. G. (2019). Hidrociclones aplicados à separação sólido-líquido de suspensões contendo: areia, esferas ocas de vidro e fluido não-newtoniano. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal de Uberlândia. 102p.
- Andrade, V. T. de. (2007) Construção e avaliação de modelos de hidrociclone para tratamento de água residuária. Dissertação, Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas. 96 p.
- Andrady, A. L. (2003). *Plastics and the environment*. Polymer Science & Technology General. West Sussex, England: John Wiley and Sons.
- Andrady, A. L., Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Phil. Trans. R. Soc. B* (2009) 364, 1977–1984.
DOI:10.1098/rstb.2008.0304
- Banzatto, D. A.; Kronka, S. N. (2006). *Experimentação agrícola*. 4ª ed. Jaboticabal: Funep.
- Barbosa, R. M. (2000). Avaliação do impacto de lodos de estações de tratamento de água à biota aquática através de estudos ecotoxicológicos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade Federal de São Paulo.
- Barbosa, E. S. (2011). Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: aplicação à indústria de petróleo. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Universidade Federal de Campina Grande. 221p.
- Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R. C, Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transaction of the Royal Society*.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Caixeta, D. S., Caixeta, F. C., Menezes Filho, F. C. M. de. (2018). Nano e microplásticos nos ecossistemas: impactos ambientais e efeitos sobre os organismos. *Enciclopédia Biosfer – Centro Científico Conhecer*.

DOI: 10.18677/EnciBio_2018A92

- Carr, S. A., Liu, J., Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 147-182.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>
- Cole, M., Lindeque P., Fileman, E., Halsband, C., Moger, J., Galloway, T. S. (2013). Microplastic Ingestion by Zooplankton. *Environmental Science & Technology*, 47, 12, 6646–6655.
<https://doi.org/10.1021/es400663f>
- Costa, J. P. da., Santos, P. S. M., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T. (2016). (Nano)plastics in the environment – Sources, fates and effects. *Science of the Total Environment*, 566-567, 15-26.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.041>
- Criado, M. Á. (2018). Os microplásticos chegaram ao intestino humano. *Revista El PAÍS*. Disponível em:
https://brasil.elpais.com/brasil/2018/10/22/ciencia/1540213637_935289.html
- Cullivan, J. C., Williams, R. A., Cross, C. R. (2003). The hydrocyclone separator through computational fluid dynamics. *Trans IChemE*, Vol 81, Part A.
www.ingentaselect.com=titles=02638762.htm
- Cunha, C., Silva, L., Paulo, J., Faria, M., Nogueira, N., Cordeiro, N. (2020). Microalgal-based biopolymer for nano- and microplastic removal: a possible biosolution for wastewater treatment. *Environ. Pollut.* 263, 114385.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114385>
- Cruz, O. C. da, Zanini J. R., Barreto, A. C., Ferraudo, A. S. (2011). Desempenho de um hidrociclone de geometria “Rietema” como pré-filtro para sistemas de irrigação. *Científica, Jaboticabal*, v.39, n.1/2, p.1–6.
- Delgadillo, J. A.; Rajamani, R. K. (2007). Exploration of Hydrocyclone Designs using Computational Fluid Dynamics, *Int. J. Miner. Process*, Vol 84, p. 252-261
- Dlamini, M. F.; Powell, M. S.; Meyer, C. J. (2005). A CFD simulation of a single phase hydrocyclone flow field. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, v.105, p.711- 718.
- Façanha, J. M. F. (2012). Incorporação de um cilindro filtrante na separação sólido – líquido em hidrociclones. *Dissertação, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia*.
- 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*, 153p.

- Fu, S.; Fang, Y.; Yuan, H.; Tan W.; Dong, Y. (2017). Effect of the medium's density on the hydrocyclonic separation of waste plastics with different densities. *Waste Management – Elsevier*
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.019>
- Geyer, R., Jambeck, J. R.; Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3, issue 7.
DOI: 10.1126/sciadv.1700782
- Ghosh, S, K; Pal, S; Ray, S. (2013). Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environmental Science Pollution Research*. Vol. 20. p. 4339 – 4355.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-013-1706-x>.
- Gouveia, R. J. dos S. (2018). Eficiência de remoção de microplásticos em quatro ETAR portuguesas. Dissertação, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Nova e Lisboa. 99p.
Disponível em:
https://run.unl.pt/bitstream/10362/50893/1/Gouveia_2018.pdf
- Guia ambiental da indústria de transformação e reciclagem de materiais plásticos. (2011). [recurso eletrônico] / Elaboração Técnica: Gilmar do Amaral et al., Colaboradores: Botto e Souza, A. H. C. et al. – São Paulo: CETESB, FIESP, SINDIPLAST. 91p.
Série P + L - ISSN 1982-6648
- Hanif, M. A., Ibrahim, N., Dahalan, F. A., Ali, U. F. M., Hasan, M., Jalil, A. A. (2022). Microplastics and nanoplastics: Recent literature studies and patents on their removal from aqueous environment. *Science of the Total Environment*. 810, 152115.
- Hashmi, K.A., Hamza, H.A., Wilson, J.C., (2004). CANMET hydrocyclone: an emerging alternative for the treatment. *Mineral Engineering*, 17, 643-649.
- Jiang, L.;Liu, P.; Yang, X.; Zhang, Y.; Li, X.;Zhang, Y.; Wang, H. (2020). Effect of Overflow Pipe on the Internal Flow Fields and Separation Performance of W-Shaped Hydrocyclones. *MDPI Journal - Minerals* 2020, 10, 329; doi:10.3390/min10040329
- Kyriakidis, Y. N. (2018). Otimização Geométrica de Hidrociclones a partir de um Histórico em Hidrociclonagem na FEQUI/UFU. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, 147 p.
- Li, W. C., Tse, H. F., Fok, L. (2016). Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of The Total Environment*, 566-567, 333-349.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>
- Lin, J-Y., Wu, R-M. (2019). Three output membrane hydrocyclone: classification and filtration. *MDPI, Molecules* 2019, 24(6), 1116.
<https://doi.org/10.3390/molecules24061116>

- Liu, X., Yuan, W., Di, M., Li, Z., Wang, J. (2019). Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China. *Chemical Engineering Journal*, 362, 176-182.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.033>
- Liu, L.; Sun, Y; Kleinmeyer, Z.; Habil, G.; Yang, Q.; Zhao, L. Rosso, D. (2022). Microplastics separation using stainless steel mini-hydrocyclones fabricated with additive manufacturing.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4056859>
- Liu, S. Y.; Leung, M. M.-L.; Fang, J. K.-H.; Chua, S.L. (2021a). Engineering a microbial ‘trap and release’ mechanism for microplastics removal. *Chem. Eng. J.* 404, 127079.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127079>.
- Lopes, B. O. (2018). Análise numérica do processo de separação de partículas minerais em hidrociclone via cfd. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande. 85p.
- Lorentzon, A. (2011). Separation of microfibers from laundry waste water by hydrocyclone. Tese, The Swedish School of Textiles - University of Borås. 72p.
- Marins, L. P. M. (2007). Caracterização Experimental do Escoamento no Interior de um Hidrociclone sem Núcleo Gasoso. Dissertação - Programas de Pós-Graduação de Engenharia Da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 122 p.
- Medronho, R. A., Schuetze, J., Deckwer, W.-D. (2005). Numerical Simulation of Hydrocyclones Ffor Cell Separation. *Latin American Applied Research*, 35:1-8.
- Meikle, J. L. (1995). *American Plastic: A cultural history*. EUA: Rutgers University Press, 63-74.
- Mercês, M. T. R. das., Silva, L. M. N., Souza, J. B. de., Silva, E. C. da. (2021). Microplásticos: seus impactos a saúde ambiental. *Anais da 24ª Semana de Mobilização Científica- SEMOC*. 8p.
Disponível em:
<http://ri.ucsal.br:8080/jspui/bitstream/prefix/4703/1/Microp1%C3%A1sticos%3A%20seus%20impactos%20%C3%A0%20sa%C3%BAde%20humana.pdf>
- Ngo, P. L., Pramanik, B. K., Shah, K., Roychand, R. (2019). Pathway, classification and removal efficiency of microplastics in wasterwater treatment plants. *Environmental Pollution*, 255, p.2, 113326.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113326>
- Mognon, J. L. (2015). Mini-hidrociclones aplicados ao Sistema de controle de sólidos na perfuração de poços de petróleo. 2015. 91f. Dissertação – Universidade Federal de Uberlândia.
- Mor, R; Sivan, A. (2008). Biofilm formation and partial biodegradation of polystyrene by the actinomycete *Rhodococcus ruber*. *Biodegradation*. vol 19. p. (851–858). Israel.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10532-008-9188-0>.

- Plastics Europe and EPRO (2021). *Plastics – the Facts, An analysis of European plastics production, demand and waste data. Relatório 2021.*
- Rocha-Santos. T. A. P., Duarte, A. C. (2017) *Characterization and analysis of microplastics.* Elsevier – vol 75.
- Rushton. A.S.; Ward, A.S.; Holdich, R.G. (2000). *Solid-liquid filtration and separation technology.* 2nd ed. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- Salvador, F. F.; Silva, N. K. G.; Barroso, M. A. S; Vieira, L. G. M. (2014). *Estudo experimental do tipo de separação de partículas em um hidrociclone concentrador.* In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis.
- Salvador, F. F. Barroso, M. A. S., Vieira, L. G. M. (2019). *Filtering cylindrical–conical hydrocyclone.* *Particuology*, 47, 54-62.
<https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.11.003>
- Schapel, S. C., Chase, G. G. (1998). *Modeling of hydrocyclone flows with the permeable walls.* *Advances in Filtration and Separation Technology*, 11, 33-36.
- Slack, M. D.; Prasad, R. O.; Boysan, F. (2000). *Advances in cyclone modeling using unstructure grids.* *Trans IChemE*, v. 78, p.78-89.
- Socool, O. J. (2003). *Construção e Avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação.* 109p. Tese, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
Disponível em:
<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-07042003-160009/pt-br.php>
- Souza, J. S. (2009). *Estudo Numérico da Termo fluidodinâmica da Separação de Óleos Pesados de uma Corrente de Águas Oleosas Via Hidrociclone,* Dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal de Campina Grande, PB.
- Svarovsky, L. (1981). *Solid-Liquid Separation.* 2. ed. Londres: Butterworths, (Butterworths Monographs in Chemistry and Chemical Engineerings). 10.
- Svarovsky, L. (2000). *Solid-Liquid Separation, Chemical Engineering Series,* 4° ed., Butterworths, London.
- Silva, D. O. (2012). *Otimização da separação sólido líquido em hidrociclones mediante a modificações geométricas.* Tese - Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. 189 p.
- Silva, N. K. G. (2014). *Estudo de Otimização da Configuração do Hidrociclone Filtrante.* Dissertação, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 102p.

- Tagg A, S.; Harrison J. P.; Ju-nam Y.; Sapp M.; Bradley E. L.; Sinclair C. J.; Ojeda J. J. (2016). Fenton's reagent for the rapid and efficient isolation of microplastics from wastewater. Royal Society of Chemistry.
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., Setälä O. (2017). Solutions to microplastic pollution - Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research*, 123, 401-407.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>
- Tonin, P. C. (2012). Otimização Computacional de Hidrociclone na Irrigação Pressurizada. Tese – Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Campina Grande, 93 p.
- Vieira, L. G. M. (2006). Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrante. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 297p.
- Yi, H.-W.; Kwon, J.-Y.; Lee, Y.-W.; Kang, M.-C. (2021). Optimization of the Outlet Flow Ratio of Mini-Hydrocyclone Separators Using the Full Factorial Design Method to Determine the Separation Efficiency. *Separations* 2021, 8, 210.
<https://doi.org/10.3390/separations8110210>
- Yu, J-F.; Fu, J.; Cheng, H.; Cui, Z. (2017). Recycling of rare earth particle by mini-hydrocyclones. *Waste Management* 61 (2017) 362–371
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.014>
- Wang, C-C., Wu, R-M. (2017). Experimental and simulation of a novel hydrocyclone-tubular membrane as overflow pipe. *Separation and Purification Technology*.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.034>
- Watts, A. J. R., Levis, C., Goodhead, R. M., Beckett, S. J., Moger, J., Tyler, C. R., Galloway, T. S. (2014). Uptake and Retention of Microplastics by the Shore Crab *Carcinus Maenas*. *Environmental Science & Technology*, 48, 15, 8823–8830.
<https://doi.org/10.1021/es501090e>
- Zhao, L., Jiang, M., Xu, L., Cao, H. (2010). Experimental research on separation performance of micro-pore filtering hydrocyclones. 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering.
DOI: 10.1109/ICBBE.2010.5517538

APÊNDICE

APÊNDICE A

Dados de ajuste das variáveis -Sistema Digital

ANOVA – Fluxo/ Vazão

R =

0.99903

b:

Equacao =

2.2206

0.95478

Regressão ANOVA modelo Linear em triplicata

Fontes	SQR	gl	MQR	F
Regressão	4785.961164	1	4785.96	8881.17
Resíduo	8.622219	16	0.538889	0.000000
F. ajuste	3.967816	4	0.991954	2.557460
Erro Puro	4.654403	12	0.387867	0.000000
Total	4794.583383	17	0.000000	0.000000

ANOVA – Pressão

R =

0.99929

b:

Equacao =

-0.12564

0.92835

Regressão ANOVA modelo Linear em triplicata

Fontes	SQR	gl	MQR	F
Regressão	1.545097	1	1.55	2843.92
Resíduo	0.008693	16	0.000543	0.000000
F. ajuste	0.007597	4	0.001899	20.800145
Erro Puro	0.001096	12	0.000091	0.000000
Total	1.553790	17	0.000000	0.000000

APÊNDICE B*Resultados - densidade do polietileno*

Aplicação da técnica				
	Volume inicial da proveta (ml)			6
	Volume final (ml)	Volume deslocado (ml)	Massa (g)	Densidade (g/ml)
<i>Proveta 1</i>	7,6	1,6	1,5007	0,93794
<i>Proveta 2</i>	7,8	1,8	1,5097	0,83872
<i>Proveta 3</i>	7,6	1,6	1,5013	0,93831
				0,90499
				~ 910 g/L

APÊNDICE C

Resultados das séries de experimentos - Hidrociclone Convencional $Q_{A,R} = 15 \text{ L/min}$ $Q_{LIDA} = 15 \text{ L/min}$

Correntes	M_{MP} (g)	M_{AGUA} (g)	V_{MP} (L)	V_{AGUA} (L)
Alimentação	0,62300	777,37700	0,00068	0,77878
<i>Overflow</i>	0,03040	153,96960	0,00003	0,15425
<i>Underflow</i>	0,25730	375,74270	0,37642	0,00028

1° triplicata

Correntes	M_{MP} (g)	M_{AGUA} (g)	V_{MP} (L)	V_{AGUA} (L)
Alimentação	0,32487	422,67513	0,00036	0,42344
<i>Overflow</i>	0,04493	191,95507	0,00005	0,19230
<i>Underflow</i>	0,42353	477,57647	0,00047	0,47844

2° triplicata

Correntes	M_{MP} (g)	M_{AGUA} (g)	V_{MP} (L)	V_{AGUA} (L)
Alimentação	0,7158	699,28420	0,00079	0,70055
<i>Overflow</i>	0,035	153,96500	0,00004	0,15424
<i>Underflow</i>	0,3151	299,68500	0,00035	0,30023

3° triplicata $Q_{A,R} = 25 \text{ L/min}$ $Q_{LIDA} = 21 \text{ L/min}$

Correntes	M_{MP} (g)	M_{AGUA} (g)	V_{MP} (L)	V_{AGUA} (L)
Alimentação	0,34530	486,65470	0,00038	0,48753
<i>Overflow</i>	0,03220	293,96780	0,00004	0,29450
<i>Underflow</i>	0,59900	651,40100	0,00066	0,65258

1° triplicata

Correntes	M_{MP} (g)	M_{AGUA} (g)	V_{MP} (L)	V_{AGUA} (L)
Alimentação	0,39940	559,60060	0,00044	0,56061
<i>Overflow</i>	0,04360	244,95640	0,00005	0,24540
<i>Underflow</i>	0,62780	711,37220	0,00069	0,71265

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,57457	779,42543	0,00063	0,78083
<i>Overflow</i>	0,09413	350,90587	0,00010	0,35154
<i>Underflow</i>	1,00157	1063,99843	0,00110	1,06592

3° triplicata

Q_{A,R} = 35 L/min

Q_{LIDA} = 32 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,28220	378,71780	0,00031	0,37940
<i>Overflow</i>	0,03080	277,96920	0,00003	0,27847
<i>Underflow</i>	0,64790	687,00000	0,00071	0,68824

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,35677	499,64323	0,00039	0,50054
<i>Overflow</i>	0,03973	431,96027	0,00004	0,43274
<i>Underflow</i>	1,15003	1189,84997	0,00126	1,19200

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,65500	883,34500	0,00072	0,88494
<i>Overflow</i>	0,08517	482,91483	0,00009	0,48379
<i>Underflow</i>	1,19923	1234,80077	0,00132	1,23703

3° triplicata

Q_{A,R} = 45 L/min

Q_{LIDA} = 38 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,27930	374,72070	0,00031	0,37540
<i>Overflow</i>	0,03850	294,96150	0,00004	0,29549
<i>Underflow</i>	0,78300	768,00000	0,00086	0,76938

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,48107	607,51893	0,00053	0,60861
<i>Overflow</i>	0,04857	362,95143	0,00005	0,36361
<i>Underflow</i>	0,88260	979,11740	0,00097	0,98088

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,61430	830,38570	0,00068	0,83188
<i>Overflow</i>	0,06910	629,93090	0,00008	0,63107
<i>Underflow</i>	1,55430	1613,44570	0,00171	1,61636

3° triplicata

Q_{A,R} = 55 L/min

Q_{LIDA} = 48 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,35890	487,64110	0,00039	0,48852
<i>Overflow</i>	0,02980	358,97020	0,00003	0,35962
<i>Underflow</i>	1,13090	1166,86910	0,00124	1,16897

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,38233	514,61767	0,00042	0,51555
<i>Overflow</i>	0,04193	458,95807	0,00005	0,45979
<i>Underflow</i>	1,25807	1472,74193	0,00138	1,47540

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,62097	871,37903	0,00068	0,87295
<i>Overflow</i>	0,05803	703,94197	0,00006	0,70521
<i>Underflow</i>	1,65983	1753,34017	0,00182	1,75650

3° triplicata

Q_{A,R} = 65 L/min

Q_{LIDA} = 55 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,39380	557,60620	0,00043	0,55861
<i>Overflow</i>	0,03220	477,96780	0,00004	0,47883
<i>Underflow</i>	1,36860	1593,63140	0,00150	1,59651

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,4642	618,53580	0,00051	0,61965
<i>Overflow</i>	0,05023	566,94977	0,00006	0,56797
<i>Underflow</i>	1,64763	1820,35237	0,00181	1,82363

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,4215	588,07850	0,00046	0,58914
<i>Overflow</i>	0,0422	522,45780	0,00005	0,52340
<i>Underflow</i>	1,4886	1707,01140	0,00164	1,71009

3° triplicata

Resultados das séries de experimentos - Hidrociclone Modificado

Q_{A,R} = 15 L/min

Q_{LIDA} = 15 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,19559	318,80441	0,00021	0,31938
<i>Overflow</i>	0,21663	225,78337	0,00024	0,22619
<i>Underflow</i>	0,23767	457,76233	0,00026	0,45859

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,07580	576,92420	0,00008	0,57796
<i>Overflow</i>	0,04143	251,95857	0,00005	0,25241
<i>Underflow</i>	0,06427	532,93573	0,00007	0,53390

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,07580	773,92420	0,00008	0,77532
<i>Overflow</i>	0,04143	317,95857	0,00005	0,31853
<i>Underflow</i>	0,06427	838,93573	0,00007	0,84045

3° triplicata

Q_{A,R} = 25 L/min

Q_{LIDA} = 20 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,36627	500,63373	0,00040	0,50154
<i>Overflow</i>	0,27467	277,72533	0,00030	0,27823
<i>Underflow</i>	0,28447	673,71553	0,00031	0,67493

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,47290	614,52710	0,00052	0,61564
<i>Overflow</i>	0,39117	338,60883	0,00043	0,33922
<i>Underflow</i>	0,40983	852,59017	0,00045	0,85413

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,21000	508,79000	0,00023	0,50971
<i>Overflow</i>	0,21193	367,78807	0,00023	0,36845
<i>Underflow</i>	0,20170	927,79830	0,00022	0,92947

3° triplicataQ_{A,R} = 35 L/minQ_{LIDA} = 32 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,27367	370,72633	0,00030	0,37139
<i>Overflow</i>	0,57200	395,42800	0,00063	0,39614
<i>Underflow</i>	0,43353	1112,56647	0,00048	1,11457

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,39977	521,60023	0,00044	0,52254
<i>Overflow</i>	0,61580	375,38420	0,00068	0,37606
<i>Underflow</i>	0,39513	945,60487	0,00043	0,94731

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,26083	582,73917	0,00029	0,58379
<i>Overflow</i>	0,55803	512,44197	0,00061	0,51337
<i>Underflow</i>	0,33703	1198,66297	0,00037	1,20082

3° triplicataQ_{A,R} = 45 L/minQ_{LIDA} = 39 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,33373	515,66627	0,00037	0,51660
<i>Overflow</i>	0,62487	423,37513	0,00069	0,42414
<i>Underflow</i>	0,40150	1219,59850	0,00044	1,22180

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,4457	601,5543	0,0005	0,6026
<i>Overflow</i>	0,7903	498,2097	0,0009	0,4991
<i>Underflow</i>	0,5395	1306,4605	0,0006	1,3088

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,41097	738,58903	0,00045	0,73992
<i>Overflow</i>	0,71563	528,28437	0,00079	0,52924
<i>Underflow</i>	0,40260	1353,59740	0,00044	1,35604

3° triplicataQ_{A,R} = 55 L/minQ_{LIDA} = 48 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,38810	576,61190	0,00043	0,57765
<i>Overflow</i>	0,78467	503,21533	0,00086	0,50412
<i>Underflow</i>	0,53587	1594,46413	0,00059	1,59734

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,3956	549,6044	0,0004	0,5506
<i>Overflow</i>	1,0821	628,9179	0,0012	0,6301
<i>Underflow</i>	0,5035	1451,4965	0,0006	1,4541

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,24303	394,75697	0,00027	0,39547
<i>Overflow</i>	1,26380	777,73620	0,00139	0,77914
<i>Underflow</i>	0,49053	1874,50947	0,00054	1,87789

3° triplicataQ_{A,R} = 65 L/minQ_{LIDA} = 55 L/min

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,44967	674,55033	0,00049	0,67577
<i>Overflow</i>	0,96560	574,03440	0,00106	0,57507
<i>Underflow</i>	0,50380	1770,49620	0,00055	1,77369

1° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,4383	620,5617	0,0005	0,6217
<i>Overflow</i>	1,2575	762,7425	0,0014	0,7641
<i>Underflow</i>	0,5734	1844,4266	0,0006	1,8478

2° triplicata

Correntes	M _{MP} (g)	M _{AGUA} (g)	V _{MP} (L)	V _{AGUA} (L)
Alimentação	0,47510	715,52490	0,00052	0,71682
<i>Overflow</i>	1,20163	721,79837	0,00132	0,72310
<i>Underflow</i>	0,46937	1828,53063	0,00052	1,83183

3° triplicata