

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

MARIA FERNANDA RAMOS CAZZANTI

**PROPOSTA DE TRATAMENTO CONVENCIONAL PARA EFLUENTE DE
LAVAGEM DE MOAGEM ÚMIDA EM UMA INDÚSTRIA RECICLADORA DE
PLÁSTICOS**

**LONDRINA
2023**

MARIA FERNANDA RAMOS CAZZANTI

**PROPOSTA DE TRATAMENTO CONVENCIONAL PARA EFLUENTE DE
LAVAGEM DE MOAGEM ÚMIDA EM UMA INDÚSTRIA RECICLADORA DE
PLÁSTICOS**

**PROPOSAL FOR CONVENTIONAL TREATMENT FOR WASHING EFFLUENT
FROM WET GRINDING IN A PLASTIC RECYCLING INDUSTRY**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Pricila Marin
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Joseane D. P. Theodoro

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARIA FERNANDA RAMOS CAZZANTI

**PROPOSTA DE TRATAMENTO CONVENCIONAL PARA EFLUENTE DE
LAVAGEM DE MOAGEM ÚMIDA EM UMA INDÚSTRIA RECICLADORA DE
PLÁSTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 08 de Dezembro de 2023.

Pricila Marin
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Londrina (UTFPR-LD)

Joseane Debora Peruco Theodoro
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Londrina (UTFPR-LD)

Sidmara Bedin
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Londrina (UTFPR-LD)

Marcio Bernardinelli
Técnico em Eletrônica
Guna plásticos

LONDRINA

2023

AGRADECIMENTOS

À minha família, por me proporcionar educação e suporte financeiro durante meus anos de estudo. Ao meu pai, pelo incentivo e toda dedicação nos estudos e trabalhos desde criança. À minha mãe, pelo exemplo de mulher determinada e independente que me inspira e sempre me inspirei.

Ao meu namorado, Otávio Augustus Cribari Lot, por todo companheirismo, paciência e compreensão nos momentos ausentes.

À Professora Dra. Pricila Marin, pela orientação, incentivo, ensinamentos, paciência e confiança na minha capacidade.

À Professora Dra. Joseane Debora Peruco Theodoro, pelo interesse no meu trabalho, direcionamentos e fundamentais ensinamentos que contribuíram para o entendimento da pesquisa.

Ao Professor Thiago Andrade, pela atenção, acompanhamento e, também, direcionamento das práticas experimentais.

Aos meus amigos, que compartilharam toda experiência da faculdade comigo e me ajudaram nos momentos de dificuldade, nos trabalhos, projetos, estudos e provas. Vocês foram essenciais.

A todos professores que participaram da minha trajetória, agradeço por cada ensinamento compartilhado.

Finalmente, agradeço a todos colaboradores da UTFPR Campus Londrina, por disponibilizarem laboratórios e utensílios que possibilitaram minha pesquisa.

A todos que, de alguma forma, me auxiliaram e me ajudaram no meu desenvolvimento, tanto pessoal quanto profissional.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Visando possibilitar o reuso industrial e/ou o descarte apropriado do efluente da etapa de moagem úmida de uma indústria de reciclagem de plásticos, este trabalho propõe a implementação de um tratamento convencional ao processo, com a adição de coagulantes. Para tanto, foram realizados testes laboratoriais com dois tipos de coagulantes, Tanfloc® e sulfato de alumínio, variando-se as concentrações destes em solução e o tempo de sedimentação. Também foram analisados os parâmetros físico-químicos de pH, sólidos totais, sólidos dissolvidos, sólidos suspensos totais, DQO e DBO. A partir dos resultados obtidos, foram identificadas as seguintes condições como as mais apropriadas para o tratamento: coagulante sulfato de alumínio em concentração de 500 mg/L e tempo de sedimentação de 20 minutos. Com estes parâmetros, após os processos de coagulação, floculação e sedimentação, foi possível a adequação do efluente para descarte na rede de esgoto, em relação a quase todos os parâmetros analisados, com exceção da DBO. No entanto, o efluente tratado não poderá ser empregado em atividades secundárias da empresa, uma vez que, para esta finalidade, não atingiu a qualidade necessária. Diante do exposto, entende-se que, após a realização de novos testes em relação à DBO, o tratamento proposto pode ser uma alternativa viável para a empresa.

Palavras-chave: efluente; reciclagem de plástico; coagulante.

ABSTRACT

Intending to facilitate the industrial reuse and/or proper disposal of effluent generated during the wet grinding stage in a plastics recycling industry, this study suggests the implementation of a conventional treatment process, incorporating coagulants. To achieve this objective, laboratory experiments were conducted utilizing two types of coagulants, Tanfloc® and aluminum sulfate, with variations in their concentrations in the solution and sedimentation time. Additionally, an analysis of physical and chemical parameters such as pH, total solids, dissolved solids, total suspended solids, COD, and BOD was performed. Based on the obtained results, the most suitable treatment conditions were identified as employing aluminum sulfate as a coagulant at a concentration of 500 mg/L and a sedimentation time of 20 minutes. Under these specified parameters, subsequent to the coagulation, flocculation, and sedimentation processes, the effluent was successfully adjusted for disposal into the sewage network, meeting acceptable standards for almost all the analyzed parameters, except for BOD. Nevertheless, the treated effluent does not meet the quality requirements for utilization in the company's secondary activities.

Keywords: effluent; plastic recycling; coagulant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição final adequada e inadequada de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil (t/ano e %) - comparativo de 2021 e 2022	14
Figura 2 - Gravimetria dos RSU no Brasil	15
Figura 3 - Volume de resíduos consumido na reciclagem em 2022	17
Figura 4 - Produção de resina pós consumo produzidas em 2022 em (%) de acordo com classificação.....	17
Figura 5 - Representação de moagem de moinho de facas	19
Figura 6 - representação do fluxo da matéria-prima até o produto	22
Figura 7 - Moinho de facas composto por (a) esteira de alimentação; (b) conjunto de facas; (c) secadora e; (d) silo.....	23
Figura 8 - Moinho 2 de facas da empresa com o seguintes componentes: (a) esteira de alimentação; (b) conjunto de facas; (c) secadora e; (d) tubulação para saída material moído; (e) saída do material e armazenagem em <i>big bags</i>	23
Figura 9 - Representação do ciclo fechado da água de reuso com (a) inicio percurso da água de reuso; (b)caminho percorrido; (c) chegada parte superior dos moinhos; (d) representação escoamento água no equipamento	24
Figura 10 - Fluxo de recirculação da água do sistema de moagem úmida	25
Figura 11 - Caixas de decantação (a) 1, (b) 2 e (c) 3, em série, usadas para o tratamento da água de lavagem.....	25
Figura 12 - Representação do processo de tratamento de efluente	35
Figura 13 - Ponto de retirada das amostras para tratamento	40
Figura 14 - Representação do teste de coagulação realizado no <i>jar test</i>	42
Figura 15 - Amostras após o <i>Jar test</i> , na etapa de sedimentação	43
Figura 16 - Material plástico retino na peneira	44
Figura 17 - Amostras de efluente dispostas no <i>Jar test</i> antes da realização do teste.....	45
Figura 18 - Turbidímetro utilizado na análise de turbidez do efluente.	46
Figura 19 - Medições das caixas de decantação	49
Figura 20 - Medição da altura	49
Figura 21 - Medição do comprimento das caixas de decantação	50
Figura 22 - Turbidez das amostras em função da concentração da solução de sulfato de alumínio, para os tempos de sedimentação avaliados	54

Figura 23 - Turbidez das amostras em função da concentração da solução de Tanfloc®, para os tempos de sedimentação avaliados	54
Figura 24 - Material retido na peneira antes de o efluente ser disposto no <i>Jar Test</i>.....	58
Figura 25 - Efluente após o peneiramento, já preparado e disposto no <i>Jar Test</i>	59
Figura 26 - Resultado terceiro teste após o tempo de sedimentação para cada concentração descrita	59
Figura 27 - Resultado das análises de sólidos do terceiro teste	60
Figura 28 - Local disponibilizado pela empresa para realizar o tratamento do efluente.....	64
Figura 29 - Recipientes disponíveis para realização da mistura e armazenamento	64

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Taxa de recuperação de recicláveis secos.....	16
Tabela 2 - Dimensões das caixas de decantação 1, 2 e 3.	26
Tabela 3 - Condições adequadas da água de reuso, de acordo com sua classe.	27
Tabela 4 - Padrões nacionais e municipais para lançamento de efluentes em corpos hídricos em Ibiporã/PR, de parâmetros analisados	32
Tabela 5 - Diferentes coagulantes comerciais e faixas de pH ideais para atuação	36
Tabela 6 - Coletas de efluentes realizadas durante o estudo.....	39
Tabela 7 - Quantidade de efluente e solução mãe adicionados para alcançar concentrações determinadas para os dois tipos de coagulantes	42
Tabela 8 - Quantidade de coagulante terceiro teste.....	44
Tabela 11 - Resultado da caracterização inicial do efluente bruto	51
Tabela 12 - Turbidez com variação de parâmetros de tipo de coagulante, concentração e tempo de sedimentação	53
Tabela 13 - Resultado da análise do efluente após tratamento	56
Tabela 14 - Resultados da turbidez para a amostra bruta e para as amostras tratadas com sulfato de alumínio em diferentes concentrações	60
Tabela 15 - Resultados das análise dos parâmetros avaliados no teste de dosagem do coagulante	61
Quadro 1 - Principais métodos de tratamentos para água residuária	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Gestão de resíduos sólidos	14
2.2 Reciclagem de plásticos	16
2.2.1 Tipos de reciclagem e suas etapas	18
<u>2.2.1.1 Reciclagem mecânica</u>	<u>18</u>
<u>2.2.1.2 Reciclagem química</u>	<u>20</u>
<u>2.2.1.3 Reciclagem energética</u>	<u>21</u>
2.3 Caracterização da área de estudos	21
2.3.1 Processo produtivo na indústria de reciclagem	21
2.4 Reuso de água na indústria	26
2.5 Efluente das recicladoras de plástico	28
2.5.1 Matéria orgânica.....	28
2.5.2 Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	29
2.5.3 Demanda química de oxigênio (DQO).....	30
2.5.4 Potencial hidrogeniônico (pH)	30
2.5.5 Turbidez	31
2.6 Exigências legais	31
2.7 Contaminação dos corpos hídricos	32
2.8 Tratamento de efluentes industriais de recicladoras	33
2.8.1 Coagulação	35
2.8.2 Coagulantes	36
<u>2.8.2.1 Coagulantes inorgânicos</u>	<u>37</u>
<u>2.8.2.2 Coagulantes orgânicos</u>	<u>37</u>
2.8.3 Floculação	38
2.8.4 Sedimentação e flotação	38
3 METODOLOGIA: PLANEJAMENTO DA PESQUISA	39
3.1 Coleta de efluente bruto	39
3.2 Caracterização do efluente bruto	40
3.3 Tratamento do Efluente	41
3.4 Avaliação da concentração de coagulante	43
3.5 Análise dos parâmetros do efluente	45

3.5.1 Turbidez	46
3.5.2 Potencial hidrogeniônico (pH)	47
3.5.3 Sólidos totais (ST)	47
3.5.4 Sólidos suspensos totais (SST).....	47
3.5.5 Sólidos dissolvidos totais (SDT)	48
3.5.6 Demanda Química de Oxigênio (DQO)	48
3.5.7 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	48
3.6 Proposta de implementação do tratamento em escala industrial.....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 Caracterização do efluente bruto.....	51
4.2 Tratamento do efluente.....	52
4.3 Avaliação da concentração de coagulante	58
4.4 Proposta de implementação do tratamento em escala industrial.....	63
5 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

A reciclagem é um setor que, além de minimizar a geração de resíduos em aterros sanitários, auxilia na redução da emissão de gases de efeito estufa, uma vez que a produção de materiais reciclados geralmente emite menos gases poluentes, contribui para a prática da conscientização ambiental e, ainda, gera empregos diretos e indiretos para a sociedade (DOUGLAS, 2022).

No contexto global, a reciclagem se torna uma ferramenta fundamental para a conservação dos recursos naturais, energia limpa e acessível, além do consumo e produção sustentável. Assim, contribui para o alcance dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), que visam o combate aos desafios globais, entre eles a conservação da vida, o uso sustentável dos oceanos, o consumo, a produção responsável e a gestão sustentável da água para todos (ONU, 2023).

Dessa forma, expandir e incentivar a reciclagem é essencial não apenas para a gestão de resíduos sólidos, mas também para a evolução das metas ambientais estabelecidas no Brasil e no mundo. Nesse sentido, nos últimos anos tem sido observada a crescente preocupação com alguns setores que são, historicamente, grandes poluidores, sendo um deles o setor industrial.

Em grande parte, a preocupação relacionada às indústrias é oriunda da quantidade de resíduos sólidos e de efluentes gerados. No entanto, até mesmo os processos que visam contornar esse problema, como as indústrias de reciclagem, podem vir a se tornar uma fonte de preocupação, uma vez que, em seus processos, necessitam de grandes quantidades de água.

Um exemplo é a indústria de reciclagem de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), na qual a água é usada no processo de moagem dos sólidos que chegam para o processamento, visando eliminar algumas impurezas, como resíduos de produtos químicos, restos de alimentos e gordura. O efluente gerado por esta etapa pode conter sólidos suspensos e matéria orgânica, o que impede seu uso para outras atividades e, também, seu descarte diretamente em corpos hídricos (FARIA; PACHECO, 2011).

De acordo com o Relatório de Qualidade do Meio Ambiente (RQMA) do Brasil em 2020, publicado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, o descarte inapropriado de efluentes pode ocasionar

contaminação do solo e de recursos hídricos, desequilíbrio do ecossistema aquático e, até mesmo, impactos na saúde humana (RQMA, 2022). Dessa forma, o tratamento de efluentes industriais é uma parte de extrema importância da gestão ambiental de uma empresa.

Em particular nas indústrias de reciclagem, também chamadas de recicladoras, o tratamento do resíduo do processo de lavagem é imprescindível, uma vez que este efluente pode apresentar níveis elevados de alguns parâmetros, como sólidos totais, demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo analisar o resíduo gerado na etapa de moagem de plásticos de uma empresa recicladora, localizada na cidade de Ibiporã/Paraná, e propor um tratamento que possibilite o descarte desse efluente ou o seu reuso em atividades secundárias da indústria.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

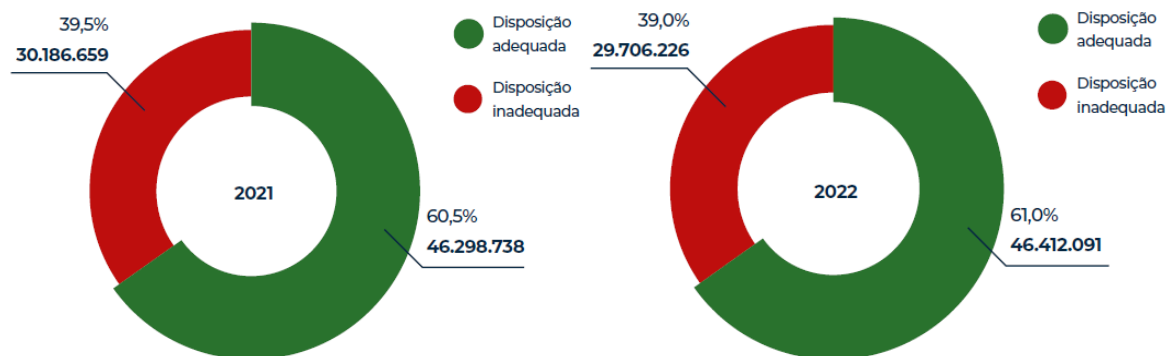
Para aprofundamento e fundamentação deste trabalho, nesta seção serão contextualizados aspectos teóricos e conceitos fundamentais dos temas abordados na pesquisa.

2.1 Gestão de resíduos sólidos

De acordo com o relatório “O futuro do setor de gestão de resíduos” elaborado pelo *International Solid Waste Association (ISWA)* de 2022, a geração de resíduos sólidos vem aumentando nos últimos anos e a tendência é que, dos 2 bilhões de toneladas gerados em 2016, haja um salto para 3,4 bilhões de toneladas em 2050. Tal dado gera preocupação, pois a gestão inadequada dos resíduos pode contribuir para o aumento da poluição do meio ambiente e gerar consequências negativas também à saúde humana. Dessa forma, a demanda pelo aumento da capacidade de coleta e tratamento, além de aumento de incentivos financeiros, é essencial para a gestão apropriada (ISWA, 2022).

No Brasil, 61% dos resíduos sólidos urbanos são encaminhados para aterros sanitários, enquanto 39,1% são descartados inapropriadamente, como em lixões e aterros controlados, mesmo estes já sendo proibidos desde 2014. Tais dados podem ser verificados por meio do infográfico apresentado na Figura 1 (ABRELPE, 2022).

Figura 1- Disposição final adequada e inadequada de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil (t/ano e %) - comparativo de 2021 e 2022

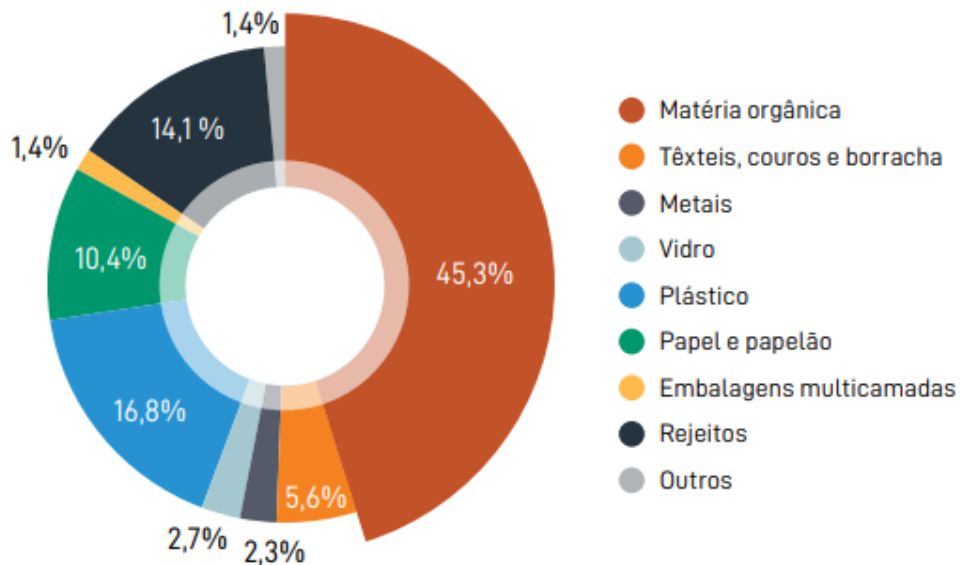


Fonte: ABRELPE (2022)

A composição gravimétrica do Resíduo Sólido Urbano (RSU), de acordo com o panorama dos resíduos sólidos no Brasil em 2020, é composta por 45,3% de

resíduos orgânicos e 16,8% plásticos, entre outros materiais, como apresentado na Figura 2 (ABRELPE, 2022).

Figura 2 - Gravimetria dos RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE (2020)

Mesmo com o aumento da disposição adequada dos resíduos do ano de 2021 para 2022, o país ainda não atingiu o crescimento suficiente em relação à gestão de resíduos sólidos de modo a atender a meta de zerar até 2024 a disposição inadequada de lixões e aterros controlados, estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

De acordo com o relatório da PNRS, a taxa de recuperação de recicláveis secos é inferior a 3%. A partir da Lei nº 12.305/2010, que introduziu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), foram estabelecidas metas para a evolução da gestão de resíduos sólidos, como o aumento das taxas de reciclagem de 20% dos resíduos gerados até 2040, implementar sistemas de logística reversa para embalagens em geral até 2018 e eliminar os lixões até 2014. A Tabela 1 demonstra o cenário atual do país e sua esperada projeção para alcançar a meta.

Tabela 1 - Taxa de recuperação de recicláveis secos

REGIÃO/ANO	2020	2024	2028	2032	2036	2040
Norte	1,2%	3,2%	5,2%	7,2%	9,2%	11,2%
Nordeste	1,6%	3,6%	5,6%	7,6%	9,6%	11,5%
Centro-Oeste	1,9%	4,5%	7%	9,6%	12,1%	14,7%
Sudeste	1,9%	6,6%	11,4%	16,2%	21%	25,8%
Sul	4,7%	9,5%	14,3%	19,1%	23,9%	28,7%
Brasil	2,2%	5,7%	9,2%	12,8%	16,4%	20%

Fonte: PNRS (2020)

Considerando o intervalo de 20 anos apresentados na Tabela 1, observa-se um aumento considerável na taxa de recuperação de recicláveis, chegando a quase 10% no cenário nacional. Dentre estes materiais, o plástico ganha destaque, classificando-se em segundo maior volume de resíduos sólidos urbano coletados em 2020 (PNRS,2020). Dada a importância que a reciclagem de plásticos possui, conhecer como ocorre seu processamento é imprescindível para contribuir com a diminuição dos volumes nos aterros sanitários, incentivo da reciclagem e alcance das metas nacionais.

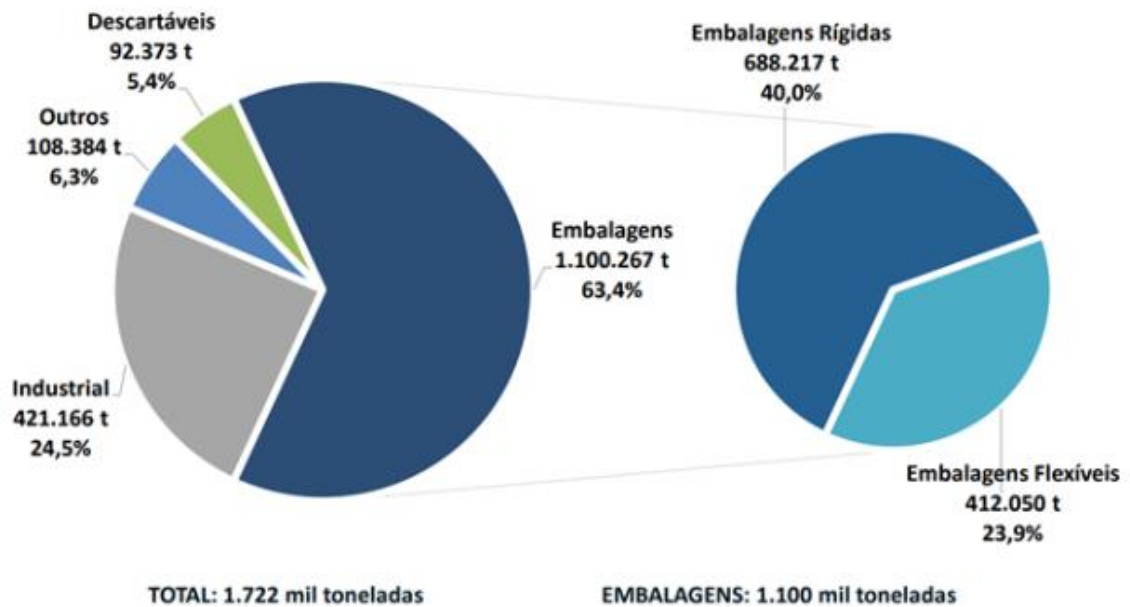
2.2 Reciclagem de plásticos

Os plásticos são materiais inertes e apresentam taxa de decomposição praticamente insignificante quando expostos aos fatores ambientais como luz, umidade, calor e microrganismos. Dessa forma, a reciclagem promove o aumento de ciclo do plástico (FORLIN; FARIA, 2002).

A maior parte dos plásticos reciclados são originados do pós consumo. No ano de 2022, de 1,7 milhões de toneladas de resíduo plástico consumido nas indústrias de reciclagem, 1,3 milhões de toneladas eram provenientes de descarte de domicílios, estabelecimentos comerciais, escritórios e shoppings centers, enquanto 421 mil toneladas eram de pós-industriais, o que representa, aproximadamente, 23,5% do total, de acordo com pesquisa realizada pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2023).

Dentre os tipos de plásticos descartados, a maior parte são rígidos, visto que os plásticos de filmes, na sua maior parte, encontram-se sujos e contaminados, prejudicando a reciclagem. O gráfico apresentado na Figura 3 representa a porcentagem e o volume dos tipos de plásticos reciclados no ano de 2022.

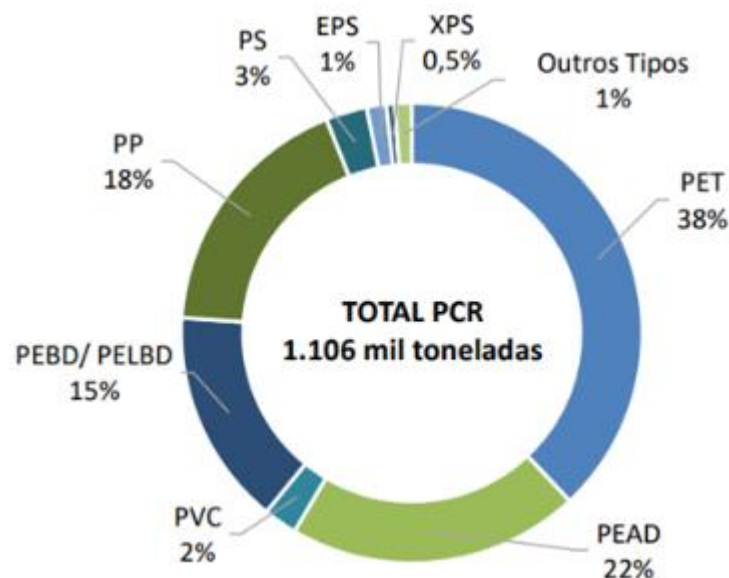
Figura 3- Volume de resíduos consumido na reciclagem em 2022



Fonte: ABIPLAST (2022)

As embalagens pós consumo foram utilizadas para a produção de outros materiais, como Polipropileno (PP), Polietileno de alta densidade (PEAD), Poliestireno (PS), Politereftalato de etileno (PET), Poliestireno extrusado (XPS), Poliestireno expansível (EPS), Policloreto de vinila (PVC), Poliestileno de baixa densidade (PEBD), Polietileno linear de baixa densidade (PELBD), que estão destacados no gráfico da Figura 4.

Figura 4- Produção de resina pós consumo produzidas em 2022 em (%) de acordo com classificação



Fonte: ABIPLAST (2023)

Após o processamento, os materiais reciclados são destinados para diversos setores, como higiene pessoal, cosméticos e limpeza doméstica (13,7%), setor de bebidas (11,5%), utilidades domésticas (10%) e produtos para construção e infraestrutura (9,4%), entre outros (ABIPLAST, 2023).

A partir do contexto geral, dada a importância que a reciclagem possui para a redução do volume de sólidos em aterros e para o aumento do ciclo útil do material, entende-se como interessante o conhecimento sobre quais são os tipos de reciclagem dos plásticos e suas etapas de processamento.

2.2.1 Tipos de reciclagem e suas etapas

De acordo com Spinace e Paoli (2005), a reciclagem dos polímeros pode ser dividida em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária.

A primária pode ser realizada de forma mecânica, em uma etapa pós indústria, e se refere à reciclagem do polímero virgem, nunca antes reprocessado.

A secundária trata da reciclagem de produtos que, combinados, podem formar outro produto para uma destinação com menor exigência de matéria-prima, como a reciclagem de polipropileno (PP) para produção de sacos de lixo. Assim como a primária, esta também pode ser realizada de forma mecânica, no entanto, em uma etapa pós consumo.

A terciária, por sua vez, refere-se à reciclagem usando maior tecnologia, como para a produção de combustível ou insumos químicos utilizando resíduos poliméricos. Este tipo pode ser caracterizado como uma reciclagem química, uma vez que provoca mudanças na estrutura química do material.

Por fim, a quaternária pode ser classificada como reciclagem energética, pois se refere à recuperação de energia pela incineração controlada.

Visando facilitar o entendimento sobre reciclagem mecânica, química e energética, estes são descritos na sequência.

2.2.1.1 Reciclagem mecânica

A reciclagem mecânica ocorre pela transformação física do material e inclui várias etapas até que se obtenha o produto final (SPINACE; PAOLI, 2004).

A etapa inicial consiste na separação dos resíduos poliméricos de acordo com suas classificações, além da remoção das impurezas e contaminantes. Essa etapa é essencial para a garantia da qualidade do produto acabado, visto que a contaminação pode prejudicar as propriedades físicas que o produto final irá desempenhar (SPINACE; PAOLI, 2004).

No Brasil, a maior parte das empresas realiza a separação dos polímeros manualmente. A identificação do tipo de material pode ocorrer pela visualização dos símbolos da reciclagem presentes nos mesmos polímeros ou por meio de testes, como odor, vapor de queima, teste de densidade e temperatura de fusão. Quando automatizada, a separação é realizada, normalmente, com tanques de flotação ou hidrociclones pela diferença de densidade dos polímeros (SPINACE; PAOLI, 2004).

Posterior à etapa de separação, ocorre a moagem do polímero em moinhos de facas rotativas, onde o plástico é fragmentado em partes menores chamadas *flakes* (FARIA, 2009). Nessa etapa, é importante que o material adquira tamanhos uniformes, para que na etapa de reprocessamento por injeção ou extrusão, ocorra a fusão do material de forma uniforme.

Há vários tipos de moinhos, como de bolas, martelos e facas, sendo o último o mais utilizado. Na Figura 5 está representado o processo de moagem por moinho de facas.

Figura 5- Representação de moagem de moinho de facas



Fonte: Zanin e Mancini (2009)

Essa etapa do processo é a mais custosa, pois é a que mais consome energia, visto a alta potência das máquinas e o tempo de produção.

Após a redução e uniformidade dos tamanhos, os materiais são lavados a fim de remover possíveis resíduos. Para a lavagem, é comum a utilização de tanques contendo água e solução de detergente aquecido. Após, a água, normalmente, é tratada e reutilizada no processo. Finalizada esta etapa, os materiais são secos com o auxílio de processos mecânicos ou térmicos, possibilitando que sejam, posteriormente, utilizados para o reprocessamento (SPINACE; PAOLI, 2004).

O reprocessamento consiste na fabricação de um novo produto a partir do material reciclado, fechando, assim, o ciclo da matéria-prima inicial e inserindo-a em um novo ciclo.

O polímero reciclado normalmente sofre alterações das propriedades mecânicas durante seu processamento. Tal fato pode ser explicado pela degradação do material devido ao cisalhamento, etapa termo-oxidativa ou hidrólise, que pode causar alteração da massa molar ou cisão da cadeia. De acordo com Spinace e Paoli (2004), há estudos que testam e acompanham a quantidade de ciclos que o material resiste sem grandes alterações nas propriedades mecânicas e essa resistência varia muito de acordo com o tipo do polímero. No caso do polietileno tereftalato (PET), por exemplo, em três ciclos já ocorre uma redução drástica da massa molar, enquanto para o polipropileno (PP), dez vezes reciclado ainda mantém suas características mecânicas inalteradas (SPINACE; PAOLI, 2004).

2.2.1.2 Reciclagem química

Os métodos de reciclagem química incluem a despolimerização do material e tem como objetivo a obtenção dos monômeros puros, a fim de obter características semelhantes às dos polímeros virgens. Este tipo de reciclagem ocorre pela transformação estrutural dos polímeros por meio da utilização de um solvente (solvólise) ou por métodos térmicos ou catalíticos (SPINACE; PAOLI, 2004).

Dependendo do solvente utilizado, a solvólise pode ser chamada de hidrólise, alcoolize ou amilose. Um exemplo de hidrólise é a recuperação dos monômeros etilenoglicol e ácido tereftálico pela reação em alta temperatura com excesso de água do PET (SPINACÉ; PAOLI, 2004).

Já os tratamentos térmicos, como a pirólise, podem ocorrer em alta ou baixa temperaturas e são processos realizados em equipamentos como alto fornos, reator de leito fluidizado, autoclaves, reatores tubulares, dentre outros. Esse tratamento

fornece produtos menos puros que os provenientes da solvólise, devido ao fato de os polímeros possuírem baixa condutividade térmica e a degradação das macromoléculas necessitarem de alta energia. Além da pirólise, há também a gaseificação e a hidrogenação.

2.2.1.3 Reciclagem energética

A reciclagem energética, por sua vez, refere-se à reutilização energética da queima de materiais por meio da incineração para produção de energia. Este processo de transformação representa redução no seu volume de embalagens, às quais não possuem descarte e processo de reciclagem apropriado.

2.3 Caracterização da área de estudos

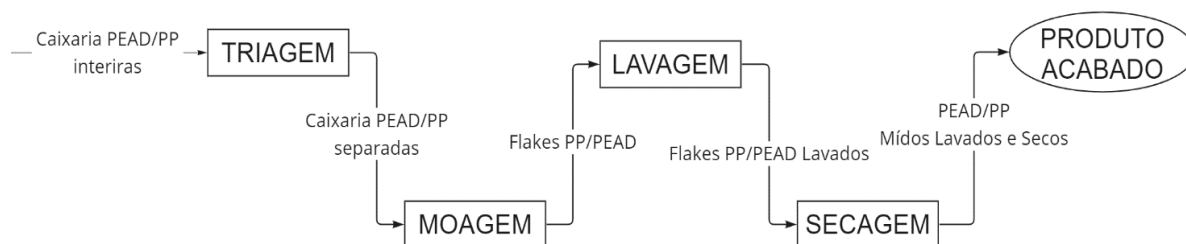
A empresa na qual foi realizado este estudo está sediada na cidade de Ibiporã/Paraná, e atua no ramo de reciclagem de embalagens plásticas. Suas principais matérias-primas são refugos de empresas de injeção plásticas e caixas quebradas de polietileno de alta densidade (PEAD) e polipropileno (PP), que seriam descartadas. Tais embalagens são provenientes de produtores rurais, cooperativas agrícolas, consumidores finais de setores agrícola, avicultura e piscicultura utilizadas para o transporte de frutas e verduras, frangos, suínos, entre outros.

Dessa forma, é possível afirmar que a empresa realiza a reciclagem mecânica (primária e secundária) desses materiais, obtendo como produtos os polímeros PEAD ou PP moídos e lavados, separados pelas cores azul, amarelo, verde, vermelho, laranja, cinza e preto. Por fim, este é comercializado para empresas de injeção plástica que o utilizam como matéria-prima para produção de novas caixas plásticas.

2.3.1 Processo produtivo na indústria de reciclagem

O processo produtivo na indústria de reciclagem, desde a triagem das caixas plásticas de PEAD e PP até o produto acabado, está representado pelo fluxograma apresentado na Figura 6.

Figura 6- representação do fluxo da matéria-prima até o produto



Fonte: Autoria própria (2023)

O processo inicia com o recebimento do material a ser reciclado e o seu preparo para produção. Esta etapa é chamada de triagem e, nela ocorre a separação manual das caixarias e refugos conforme o tipo do material (PEAD ou PP) e a coloração. Ainda durante a separação, é realizada a inspeção e a retirada de itens indesejáveis que porventura estejam fixados nos materiais, como arames e outros tipos de plásticos.

A triagem é uma etapa primordial para garantir a qualidade do produto, pois impede a chamada contaminação por impurezas, que pode ser gerada pela mistura de matérias-primas de diferentes materiais, mistura de cores ou presença de metais, o que reduz a resistência das caixas e diminui o valor agregado do produto.

Após a triagem, o material já separado e ausente de contaminação está pronto para ser triturado. Na etapa de moagem ocorre a trituração do material em partículas menores e o equipamento responsável por esse processamento é o moinho de facas. As facas rotativas são responsáveis por cortar o material em pequenos pedaços, com as dimensões limitadas por uma tela através da qual o material deve passar.

Na cadeia produtiva da empresa em questão há dois moinhos de facas. O primeiro, apresentado na Figura 5, é composto por uma esteira de alimentação (Figura 7.a) onde o operador alimentará com as caixas para moer e será deslocada até a entrada do moinho. Na parte interna do moinho se encontra um jogo de 6 facas rotativas e 4 facas fixas (Figura 7.b) que possuem a capacidade de moer plástico na taxa de 1200 kg/h. Após o moinho há uma secadora (Figura 7.c) e finalmente um silo (Figura 7.d) onde ocorre o armazenamento e a transferência para os *big bags* do produto final.

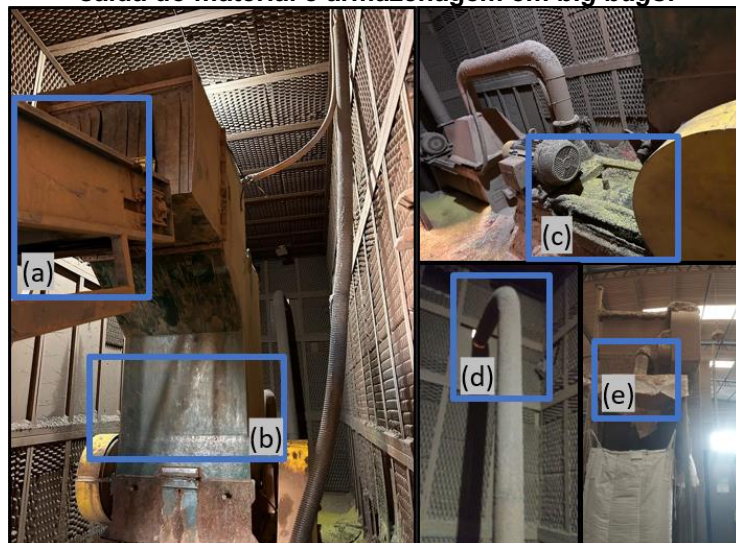
Figura 7 - Moinho de facas composto por (a) esteira de alimentação; (b) conjunto de facas; (c) secadora e; (d) silo.



Fonte: Autoria própria (2023)

O segundo moinho (Figura 8) se encontra enclausurado. O enclausuramento é utilizado para abafar o ruído de operação e a dispersão da poeira do plástico. Assim como o moinho 1, este possui os seguintes componentes: esteira de alimentação (Figura 8.a), conjunto de três facas rotativas e duas fixas com capacidade de moagem de 1000 kg/h localizadas na parte interna da estrutura (Figura 8.b), secadora (Figura 8.c) e tubulação (Figura 8.d) na qual o material acabado é bombeado para o exterior e, por fim, armazenados em *big bags* (Figura 8.e) para futura comercialização.

Figura 8 - Moinho 2 de facas da empresa com o seguintes componentes: (a) esteira de alimentação; (b) conjunto de facas; (c) secadora e; (d) tubulação para saída material moído; (e) saída do material e armazenagem em *big bags*.



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a moagem, o material passa pela lavagem seguido da secagem. No entanto, essas duas etapas são realizadas no próprio moinho de facas, juntamente com o processo de trituração, em um processo chamado de moagem úmida, que difere da moagem a seco, exatamente pela utilização simultânea de água nesta etapa.

Na empresa em questão, a água utilizada na lavagem não possui nenhum tratamento químico ou qualquer adição de solução de limpeza. Conforme a Figura 9, esta é proveniente da 3ª caixa de decantação (Figura 9.a) e é transportada por meio de mangueiras (Figura 9.b) até a parte superior dos moinhos (Figura 9.c), escoando sobre as facas (Figura 9.d) e caindo na parte inferior do equipamento. A utilização de água para a lavagem durante a trituração é importante para a limpeza, pois retira as sujidades como barro e restos de resíduos orgânicos, garantindo a qualidade do produto e aumentando o seu valor agregado.

Figura 9 -Representação do ciclo fechado da água de reuso com (a) início percurso da água de reuso; (b)caminho percorrido; (c) chegada parte superior dos moinhos; (d) representação escoamento água no equipamento



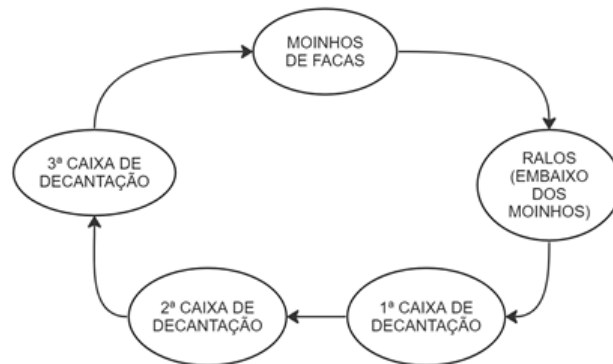
Fonte: Autoria própria (2023)

Ao final da lavagem, a água é coletada em ralos localizados embaixo dos moinhos e direcionada, por meio de bombas, para o primeiro tanque de decantação. Ao sair do primeiro tanque, a água passa por outros dois.

Estes três tanques em série visam promover o tratamento da água de lavagem por meio de um processo de separação mecânica, no qual ocorre a decantação dos

resíduos e, ao final do ciclo, proporcionam novamente água para a etapa de moagem úmida, atuando como um ciclo fechado. Além disso, a caixa de decantação permite que somente a água com pequenos plásticos seja recirculada, preservando o bom funcionamento da bomba usada na última caixa. O fluxo da água no processo está representado pelo fluxograma da Figura 10.

Figura 10- Fluxo de recirculação da água do sistema de moagem úmida



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 11 podem ser observadas as 3 caixas de decantação presentes na empresa, usadas para tratamento da água de lavagem. Suas dimensões são apresentadas na Tabela 2.

Figura 11- Caixas de decantação (a) 1, (b) 2 e (c) 3, em série, usadas para o tratamento da água de lavagem



Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 2 - Dimensões das caixas de decantação 1, 2 e 3.

Caixa	Altura (m)	Comprimento (m)	Largura (m)	Volume (m ³)	Volume (L)
1	1,53	1,14	1,32	2,30	2302,34
2	1,56	1,14	1,27	2,26	2258,57
3	1,54	1,12	1,30	2,24	2242,24
Volume Total (m ³)				6,80	6803,15

Fonte: Autoria própria (2023)

As pequenas variações observadas nas dimensões das três caixas de decantação se devem ao fato de que foram construídas manualmente. O conhecimento dessas dimensões é útil para estimar o volume total do efluente a ser tratado, de modo a planejar a implementação de seu tratamento, considerando a frequência com que deverá ser realizado e a quantidade de coagulante necessária para esta finalidade.

A água do ciclo fechado é repostada a cada duas semanas, pois o acúmulo do lodo proveniente do processo de decantação nas caixas apresentadas na Figura 9 pode comprometer tanto a eficiência do processo, como a atividade da bomba localizada na terceira e última caixa, responsável pela recirculação da água no processo.

O lodo de tratamento da água do processo, de acordo com a norma NBR 10004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é classificado como resíduo perigoso por conter resíduos plásticos considerados tóxicos. Dessa forma, o resíduo, inicialmente em estado pastoso, passa pelo processo de secagem natural em tanques do tipo IBCs (*Intermediate Bulk Containers*) e, posteriormente, é descartado em caçambas controladas, encaminhadas para aterros sanitários.

O efluente, por sua vez, é enquadrado na classe II, de não perigosos. No entanto, por ser um resíduo de plásticos polimerizados, não pode ser descartado na rede de esgoto. A cada descarte, este é submetido à análise em laboratório, verificando se os parâmetros estão dentro do permitido pela legislação e se seu descarte está permitido dentro da outorga do uso da rede de coleta de esgoto.

2.4 Reuso de água na indústria

Em processos industriais, o reuso da água é uma estratégia que visa a economia de custos operacionais, o aumento da eficiência produtiva e a redução do consumo de água (HESPANHOL *et al.*, 2007).

O reaproveitamento da água na indústria pode ocorrer de forma direta ou indireta. Direta quando o efluente, após o tratamento, é reempregado diretamente no processo industrial e indireta quando este é descartado em corpos hídricos, para que possa ser diluído, e só depois reutilizado industrialmente (ANA, 2005).

A água empregada em atividades de reuso pode ser classificada de acordo com os critérios para sua qualidade nas atividades. A classe 1 deve ser incolor, não ser turva ou abrasiva e inclui o uso para fins ornamentais, descargas de bacias sanitárias, além da lavagem de pisos, roupas e veículos. Na classe 2, a água não deve apresentar mau-cheiro e não pode ocasionar alteração na resistência dos materiais, uma vez que se destinada para uso em construção civil, lavagem de agregados, preparação de concreto e controle de poeira. Finalmente, a água de classe 3 não pode propiciar infecção ou contaminação, não pode ser abrasiva e não pode apresentar mau cheiro, uma vez que seu uso inclui sistemas de irrigação de áreas verdes e rega de jardins (ANA, 2005).

Visando a reutilização para estas finalidades, a fim de garantir a segurança do processo, a saúde das pessoas envolvidas e o meio ambiente, as águas de reuso devem atender aos limites máximos ou mínimos estabelecidos pela Agência Nacional de Águas, apresentados na Tabela 3, de acordo com a classe envolvida.

Tabela 3 - Condições adequadas da água de reuso, de acordo com sua classe.

PARÂMETROS	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Coliformes fecais	Não detectáveis	≤ 1000 mL	≤ 200/100 mL
pH	Entre 6,0 e 9,0	Entre 6,0 e 9,0	Entre 6,0 e 9,0
Cor (UH)	≤ 10	-	≤ 30
Turbidez (UT)	≤ 2	-	≤ 5
Odor e aparência	Não desagradáveis	Não desagradáveis	-
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 1	≤ 1	-
DBO (mg/L)	≤ 10	≤ 30	≤ 20
Compostos Orgânicos Voláteis (mg/L)	Ausentes	Ausentes	-
Nitrato (mg/L)	< 10	-	-
Fósforo total (mg/L)	≤ 0,1	-	-
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	≤ 5	≤ 5	-
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L)	≤ 500	-	-

Fonte: ANA (2005)

Na indústria abordada neste trabalho, atualmente, a reutilização da água que é empregada na moagem úmida só é possível devido ao tratamento resultante da sua

passagem pelos três decantadores, em um sistema fechado e é usada novamente dentro do mesmo processo e para a mesma finalidade.

No entanto, após a reutilização por alguns ciclos, esta água acaba perdendo a qualidade, o que impede que seja empregada outras vezes, tornando-se um efluente a ser descartado. Por possuir alta carga orgânica, este efluente pode ser submetido a tratamentos avançados e, posteriormente, despejado em corpos hídricos ou, alternativamente, pode ser tratado por processos mais simples e reutilizado para finalidades menos nobres dentro da própria indústria.

Essa última alternativa, muitas vezes se torna interessante financeiramente para a indústria, uma vez que geraria uma economia de gastos com água em etapas que não necessitam de alta qualidade deste recurso.

2.5 Efluente das recicladoras de plástico

Um desafio encontrado nas indústrias de reciclagem de plástico é o tratamento do efluente da lavagem do material submetido à moagem úmida. Isso é devido à sua alta contaminação orgânica, o que impede tanto o descarte como o emprego em outras finalidades sem que haja um tratamento prévio (BORDONALLI; MENDES, 2009).

Diante disso, para que o efluente gerado possa ser tratado, é fundamental que este seja analisado em relação a alguns parâmetros principais. Essa análise busca conhecer suas características, verificar sua classificação, identificar possíveis impactos ambientais e riscos à saúde pública, além de propor métodos de tratamento adequado, caso seja identificada esta necessidade.

Nas recicladoras, os parâmetros importantes a serem controlados são, de modo geral, matéria orgânica, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), potencial hidrogeniônico (pH) e turbidez.

2.5.1 Matéria orgânica

A matéria orgânica é composta por carbono, oxigênio e hidrogênio, ainda podendo conter nitrogênio, enxofre e ferro. De modo geral, os principais compostos orgânicos encontrados nos resíduos são proteínas, carboidratos e lipídios. A medição da matéria orgânica, normalmente, é feita por meio de análises de DQO e DBO

(NUNES, 2012), estando esta também presente na forma de sólidos em suspensão, coloidais ou sólidos dissolvidos, além de líquidos e gases (CAVALCANTI, 2016).

2.5.2 Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)

As reações bioquímicas podem ser avaliadas em laboratório por meio da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (CAVALCANTI, 2016). De forma simplificada, esta representa a quantidade de oxigênio necessária para oxidar biologicamente a matéria orgânica (NUNES, 2012).

Em todo efluente industrial ocorre o processo de oxidação de matéria orgânica, seja por mecanismos de reações químicas ou bioquímica. Esse processo resulta no consumo de oxigênio dissolvido na massa de água, diminuindo o índice de oxigênio no corpo hídrico. O processo de oxidação ocorre com o consumo de nutrientes na presença de microrganismos e são transformados em dióxido de carbono (CO_2), água e outros compostos inorgânicos oxidados. Esse parâmetro permite a quantificação de oxigênio utilizado sem a necessidade de conhecer a natureza e a concentração de todos os diferentes componentes orgânicos presentes no efluente.

A eliminação e oxidação da matéria orgânica contida no efluente ocorre em um intervalo de tempo que varia de 18 a 36 horas para a remoção parcial, ao passo que para a oxidação completa é necessário um período de 20 dias.

Em termos gerais, a técnica mais comum para medir a DBO envolve a adição de pequenas quantidades de um resíduo industrial, composto principalmente de material orgânico a um volume específico de água saturada com oxigênio. Essa mistura é então colocada em um recipiente fechado e mantida em uma incubadora a 20 °C por um período de 5 dias, durante os quais é acompanhada a quantidade de oxigênio restante na solução. Nesse processo, os microrganismos aeróbios presentes na água se proliferam e consomem a matéria orgânica, ao mesmo tempo em que utilizam parte do oxigênio dissolvido na água.

À medida que os componentes orgânicos presentes nos efluentes são gradualmente removidos, os micro-organismos ainda presentes na solução continuam a consumir oxigênio para a autodigestão ou metabolismo interno de seu próprio conteúdo celular.

Medindo a quantidade de oxigênio dissolvido que permanece na solução após os 5 dias, é possível calcular, por diferença, a quantidade de oxigênio que os microrganismos consumiram durante esse período. Esse valor reflete a DBO da amostra e é um indicador importante da carga de matéria orgânica biodegradável presente nos efluentes. Essa análise ajuda a avaliar o impacto da poluição na qualidade da água e a eficácia dos tratamentos de efluentes (CAVALCANTI, 2016).

Valores elevados de DBO, de acordo com Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2023), indicam poluição por matéria orgânica, normalmente ocasionada por lançamento inapropriado de efluentes domésticos e industriais, como abatedouros ou granjas.

2.5.3 Demanda química de oxigênio (DQO)

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a totalidade do conteúdo orgânico de um efluente, não se limitando apenas aos componentes biodegradáveis. Esse processo de oxidação é realizado por meio de substâncias como dicromato ou permanganato de potássio em uma solução ácida. A DQO mede o teor de carbono orgânico total, com exceção de certos compostos aromáticos, como o benzeno, que não são completamente oxidáveis por essa reação (CAVALCANTI, 2016).

A importância da DQO reside na sua capacidade de fornecer uma avaliação abrangente da carga de matéria orgânica em um efluente, independentemente de ser biodegradável ou refratária. Esta desempenha um papel crítico na monitorização da qualidade da água e no controle da poluição, permitindo a compreensão do impacto dos efluentes na qualidade dos corpos d'água e na eficácia dos processos de tratamento. A relação DQO/DBO varia dependendo da natureza dos efluentes e dos processos de tratamento, proporcionando informações valiosas para a gestão ambiental e do saneamento. Esta tende a ser maior que a DBO, pois relaciona, além da matéria orgânica biodegradável, a refratária (CAVALCANTI, 2016).

2.5.4 Potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico (pH) de uma solução é determinado pelo logaritmo da concentração de íons de hidrogênio e tem a finalidade de indicar se o meio é ácido

ou básico. Tendo em vista que uma alta concentração de íons de hidrogênio pode ser prejudicial à qualidade da água, o pH se torna um indicador do potencial poluente. Além disso, é um parâmetro crítico de controle, visto que influencia na corrosividade, cor, sabor e eficiência dos processos de tratamento (CAVALCANTI, 2016).

2.5.5 Turbidez

A turbidez se refere à modificação na capacidade de penetração da luz, dessa forma essa permite medir a concentração de partículas suspensas na amostra analisada, pois essas causam a difusão e absorção da luz. Essas partículas podem incluir plâncton, bactérias, argila, silte em suspensão, bem como materiais finos provenientes de fontes de poluição (ÁGUAS & ÁGUAS, 2007).

Água com alta turbidez pode formar flóculos de matéria orgânica mais pesados, decantando mais rapidamente. Na desinfecção, por sua vez, pode ser prejudicial por, de certa forma, atuar como uma proteção aos microrganismos, o que é indesejado (FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE, 2013).

2.6 Exigências legais

De modo a garantir a preservação dos recursos naturais, evitando que ocorra contaminação dos recursos hídricos, do solo e/ou que prejudique a saúde humana e de animais no entorno, a emissão de efluentes industriais em corpos receptores de água, como rios, córregos, ou até mesmo a rede de coleta de esgoto local, deve atender a critérios e exigências tanto no âmbito federal, como municipal.

No âmbito federal, a Resolução nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece os limites adequados de diferentes parâmetros para o lançamento de efluente em todo território brasileiro.

No âmbito municipal, a empresa responsável pela coleta e tratamento de efluentes domésticos e não domésticos de Ibiporã/PR, cidade na qual a empresa em questão está inserida, é a SAMAE (Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto). Por meio do Decreto 380 de 2017, são estabelecidos os limites dos parâmetros para o lançamento dos efluentes não domésticos na rede pública da cidade.

A Tabela 4 apresenta os principais parâmetros identificados no efluente analisado e as condições padrões para seu lançamento.

Tabela 4 - Padrões nacionais e municipais para lançamento de efluentes em corpos hídricos em Ibiporã/PR, de parâmetros analisados

Parâmetros	Resolução CONAMA nº 430/2011	Decreto SAMAE nº 380/2017
pH	5 a 9	6 a 9
DBO (mgO ₂ /L)	Não estabelecido	400
DQO (mgO ₂ /L)	Não estabelecido	800
S.T (mg/L)	Não estabelecido	1200
SST (mg/L)	Não estabelecido	300
SDT (mg/L)	Não estabelecido	750

Fonte: Modificado da CONAMA (2011) e SAMAE (2007)

2.7 Contaminação dos corpos hídricos

A contaminação das águas pode se dar por diferentes maneiras e variar de acordo com o tipo de recurso hídrico envolvido. No caso de mananciais, por exemplo, o Relatório de Qualidade do Meio Ambiente (RQMA) do ano de 2020 indica que a principal fonte poluidora é o lançamento de efluentes industriais ou domésticos, o que pode provocar contaminação não só deste recurso hídrico, mas também do solo, do ambiente marinho e até prejudicar a saúde humana (RQMA, 2020).

Em outros casos comuns em algumas regiões brasileiras, a água contaminada é resultado da ineficiência de separação dos resíduos, que acabam sendo despejados em fontes de abastecimento público, resultando na propagação de doenças à população.

Outro fator que agrava este problema é a interação das substâncias poluentes com os padrões de precipitação, muitas vezes resultando na contaminação das águas por meio da drenagem pluvial, em áreas urbanas, ou pela erosão do solo e transporte de sedimentos contendo agentes poluentes, em áreas rurais.

Em relação às águas subterrâneas, os principais elementos contaminantes compreendem nitratos, resíduos derivados do petróleo, metais pesados, vírus e bactérias prejudiciais. A falta de infraestrutura de saneamento básico, construções inadequadas de poços e fossas sépticas, a disposição inapropriada de resíduos sólidos em lixões, vazamentos de tanques de combustíveis e o uso excessivo de agrotóxicos e fertilizantes representam fontes potenciais desse tipo de recurso hídrico (RQMA, 2020).

Aliado à preocupação causada pela contaminação dos recursos hídricos, tem-se ainda, a constatação de que a sua demanda é crescente em todos os setores da

sociedade, especialmente nos processos industriais. Visando minimizar os efeitos negativos que podem ser causados pela grande demanda de recursos hídricos em seus processos, as indústrias vêm intensificando esforços para o tratamento das águas residuárias visando não apenas evitar a contaminação dos corpos hídricos, mas também como uma alternativa para redução do descarte e reaproveitamento da água.

2.8 Tratamento de efluentes industriais de recicladoras

O tratamento de efluentes industriais, de um modo geral, pode ser realizado com o intuito de garantir que estes sejam lançados nos corpos hídricos respeitando as características adequadas ao descarte, estabelecidas pelas legislações vigentes de modo a não causar danos à fauna e à flora do corpo receptor, ou para que possam ser reaproveitados em etapas secundárias do processo, contribuindo, assim, para que o volume de água utilizado no processo possa ser reduzido.

Um desafio encontrado nas indústrias de reciclagem de plástico é o tratamento do efluente do processo de lavagem, uma vez que a alta contaminação orgânica do mesmo impede seu descarte sem tratamento (BORDONALLI; MENDES, 2009).

Outro ponto importante é que o tratamento dos efluentes gerados a partir da lavagem dos plásticos na indústria de reciclagem não é padronizado, sendo que o tipo e a sequência de etapas a serem empregadas dependem dos parâmetros e características gerais do efluente. De acordo com Straioto (2019), exatamente por serem oriundos de vários ciclos de lavagem, os parâmetros do efluente variam de acordo com a quantidade de ciclos a que este foi submetido, além do estado inicial de cada plástico lavado. Segundo Bordonalli (2007), tratamentos físico-químicos demonstraram resultados muito superiores aos de processos biológicos, como o uso de lodo ativado.

Em geral, os principais processos para tratamento de água residual estão dispostos no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais métodos de tratamentos para água residuária

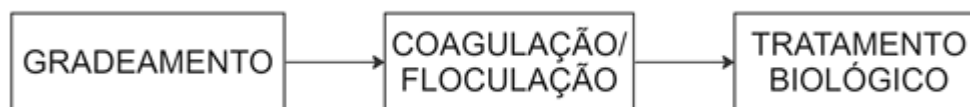
OPERAÇÃO	APLICAÇÃO	DISPOSITIVO
Limpeza grosseira	Remoção de sólidos grosseiros, como madeira, detritos em águas não tratadas	Grades
Limpeza fina	Remoção de pequenas partículas	Tela fina
Limpeza micro	Remoção de sólidos finos, matéria flutuante e algas	Microtela
Fluxo de equalização	Armazenamento temporário de fluxo para equalizar vazões e cargas de massa de DBO e sólidos suspensos	Tanque de equalização
Mistura	Mistura de produtos químicos com águas residuais para homogeneização e manutenção de sólidos em suspensão	Misturador rápido
Floculação	Promover a agregação de partículas pequenas em partículas maiores a fim de facilitar sua remoção por sedimentação	Floculador
Sedimentação Acelerada	Remoção de areia. Remoção de sólidos grossos e densos	Caixa de areia. Separador de Vórtice
Sedimentação	Remoção de sólidos sedimentáveis	Clarificador primário. Clarificador de alta taxa
Flotação	Remoção de sólidos e biossólidos. Remoção de sólidos suspensos	Clarificador de alta taxa
Aeração	Adição de oxigênio no processo biológico	Flotação por ar induzido. Aerador mecânico
Filtragem de profundidade	Remoção de sólidos suspensos residuais	Filtros de profundidade
Filtragem de superfície	Remoção de sólidos suspensos residuais.	Filtros de disco de mída de tecido
Filtragem por membrana	Remoção de sólidos suspensos e coloidais e matéria orgânica e inorgânica dissolvida	Microfiltração. Ultrafiltração. Nanofiltração. Osmose reversa
Decapagem de ar	Remoção de amônia, sulfeto de hidrogênio e outros gases de águas residuárias e sobrenadante do digestor	Torre empacotada

Fonte: Traduzido e adaptado de Metcalf e Eddy (2003)

Como já citado anteriormente, as principais características do efluente de reciclagem analisado são a alta carga orgânica e a alta concentração de sólidos suspensos e dissolvidos. Parâmetros como metais, óleos e impurezas tóxicas não são significativos, pois a matéria-prima usada na empresa se encontra livre desses contaminantes.

Nas recicladoras, para garantir a remoção dos contaminantes, os efluentes podem ser submetidos a algumas etapas de tratamento, como o gradeamento, coagulação, floculação e até tratamentos biológicos (BORDIN, 2012). A Figura 12 representa uma síntese do processo de tratamento de efluente de recicladora.

Figura 12- Representação do processo de tratamento de efluente



Fonte: Autoria própria (2023)

O gradeamento é um pré-tratamento usado para remoção superficial dos sólidos grosseiros e flutuantes. Na recicladora, o tratamento preliminar seria a utilização de peneiras nos ralos dos moinhos de facas, impedindo com que os grandes pedaços de plásticos sejam arrastados para o tanque de decantação.

A coagulação e floculação são processos convencionais físico-químicos de clarificação que tem como objetivo aglutinar partículas em suspensão (1 a 100 μm) contidas em águas residuárias mediante adição de coagulantes ou floculantes, de modo a promover a redução de sólidos em suspensão e coloidais, e redução de carga orgânica (CAVALCANTI, 2016).

O tratamento biológico, por sua vez, é responsável pela remoção dos sólidos inorgânicos e podem ser exemplificados pelo tratamento com iodo ativado, lagoas de estabilização, reatores anaeróbicos e filtros biológicos (BORDIN, 2012).

2.8.1 Coagulação

A coagulação envolve, principalmente, a desestabilização de partículas coloidais e suspensas. Essa desestabilização é alcançada por meio da interação de ações físicas e reações químicas, que ocorrem em questão de segundos, entre o coagulante, a água e as impurezas presentes (LIBÂNIO, 2010). Em seguida, ocorre a hidrólise, na qual os íons metálicos do coagulante em solução aquosa se ligam fortemente com átomos de hidrogênio, podendo coordenar até seis moléculas de água. Esse processo libera átomos de hidrogênio, diminuindo, então, o pH da suspensão e resultando em um precipitado de hidróxido metálico.

Posteriormente, na etapa de mistura rápida, ocorre o transporte dessas espécies para entrar em contato com as impurezas presentes. A magnitude da concentração do coagulante e o pH de coagulação determina se as impurezas serão desestabilizadas ou incorporadas aos precipitados. À medida que as partículas desestabilizadas se aproximam e colidem, formam-se aglomerados chamados de

flocos, que podem ser removidos por meio dos processos de sedimentação, flotação e filtração (LIBÂNIO, 2010).

2.8.2 Coagulantes

Os coagulantes são elementos que, ao serem introduzidos na água ou em efluentes industriais, auxiliam na coagulação e floculação por meio da geração de íons positivos em solução, que são essenciais para interferir na estabilidade da interação entre as partículas e o meio (CAVALCANTI, 2016).

Os coagulantes normalmente são sais metálicos que em solução aquosa são hidrolisados e formam íons positivos. Esses, por sua vez, formam ligações com átomos de oxigênios da hidroxila da água, liberando o íon H^+ , aumentando a concentração de hidrogênio e, conseqüentemente, diminuindo o pH da suspensão. Além disso, depois da hidrólise ocorre a mistura rápida do coagulante, etapa na qual ocorre a desestabilização da camada dupla e envolvimento dos precipitados em função do pH e concentração de coagulante.

Na tabela 5 são apresentados alguns coagulantes primários e sua faixa de pH ideal para coagulação.

Tabela 5 - Diferentes coagulantes comerciais e faixas de pH ideais para atuação

Coagulantes	Faixa de pH
Sulfato de alumínio	5-8
Poli cloreto de alumínio	6-7
Sulfato ferroso	8,5-11
Sulfato férrico	5-11
Cloreto férrico	5-11

Fonte: LIBÂNIO (2010)

Os coagulantes desempenham um papel fundamental no tratamento de águas residuais, influenciando diretamente a eficácia da remoção de partículas e impurezas durante o processo de coagulação-floculação. Estes agentes podem ser classificados em coagulantes orgânicos e inorgânicos, cada um com características distintas e aplicações específicas no tratamento de água.

2.8.2.1 Coagulantes inorgânicos

Conforme Cavalvanti (2016), os coagulantes inorgânicos normalmente são compostos por cátions polivalentes que neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas.

Dentre os coagulantes inorgânicos, o sulfato de alumínio é o mais utilizado industrialmente. Registros apontam que sua utilização no tratamento da água ocorre desde os tempos dos egípcios, no entanto, foi somente a partir de 1881 que seu uso se tornou comum no tratamento de água potável. Por ser capaz de resultar em efluentes praticamente isentos de sólidos em suspensão ou em estado coloidal, este coagulante é amplamente empregado em todo mundo, tendo ampla gama de aplicações no tratamento de efluentes (CAVALCANTI, 2016).

A quantidade necessária de coagulante que deve ser adicionada ao efluente para o seu tratamento é determinada por meio de ensaios em *Jar Test*, monitorando-se a velocidade de agitação, o tempo de decantação, o pH da solução, a quantidade de produto adicionado e a temperatura do meio (MACÊDO, 2007).

2.8.2.2 Coagulantes orgânicos

Ao contrário dos coagulantes inorgânicos, como sais metálicos, os coagulantes orgânicos são compostos por polímeros sintéticos ou naturais. Sua eficácia reside na capacidade de formar flocos estáveis, facilitando a aglomeração e sedimentação de partículas finas e coloides presentes na água.

O Tanfloc® é um polímero orgânico catiônico, líquido, de baixo peso molecular e derivado de fontes vegetais, que desempenha um papel importante como coagulante, floculante e auxiliador de coagulação no processo de tratamento de águas. É produzido a partir do extrato aquoso da casca da árvore acácia negra (*Acácia decurrens*), uma espécie exótica originária da Austrália e que no Brasil é cultivada na região do Rio Grande do Sul.

Este produto demonstra excelentes propriedades de coagulação e é altamente eficaz na eliminação de turbidez da água bruta. Ainda destaca-se por não causar alterações no pH da água tratada, pois não consome a alcalinidade do meio ambiente. Além disso, mantém sua eficácia dentro de uma faixa de pH que varia de 4,5 a 8,0, o que elimina a necessidade de correções de pH durante o processo. O

Tanfloc® atua em sistemas de partículas coloidais, neutralizando as cargas elétricas das partículas e promovendo a formação de pontes entre elas. Esse mecanismo é responsável pela aglutinação das partículas em flocos, que, por sua vez, sedimentam (IWAKI, 2019).

2.8.3 Floculação

A floculação é introduzida pela neutralização das forças eletrostáticas repulsivas que impedem a aglomeração de partículas e a precipitação (LIBÂNIO, 2010).

Os mecanismos essenciais para a floculação são a agregação e ruptura dos flocos. O tamanho dos flocos se limita de acordo com as tensões de cisalhamento e as forças de aglutinação, que mantém as partículas desestabilizadas aderidas à estrutura dos flocos. Tal tendência é influenciada pelas características das águas que estão sendo tratadas (LIBÂNIO, 2010).

Os principais fatores que interferem a floculação são o gradiente de velocidade e o tempo de detenção. Estes influenciam na densidade e no tamanho dos flocos formados, o que, conseqüentemente, reduz a turbidez e cor aparente da fase líquida (LIBÂNIO, 2010).

2.8.4 Sedimentação e flotação

A sedimentação é um processo natural de separação de fases entre sólidos e líquidos, baseado na influência da gravidade. Já a flotação ocorre pelo efeito da gravidade diferencial como força motriz (CAVALCANTI, 2016). De acordo com Metcalf e Eddy (2003), o processo de flotação ocorre combinado com o processo de clarificação e o uso de coagulantes pode melhorar o desempenho do processo.

3 METODOLOGIA: PLANEJAMENTO DA PESQUISA

As análises apresentadas neste trabalho foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Efluentes do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - *Campus* Londrina, a partir de coletas realizadas no efluente proveniente de uma indústria recicladora de plásticos sediada na cidade Ibiporã/PR.

De modo a alcançar os objetivos, foi criado um planejamento para o desenvolvimento da pesquisa, o qual compreende seis principais etapas.

1. Coleta do efluente bruto;
2. Caracterização do efluente bruto;
3. Tratamento do efluente;
4. Avaliação da concentração de coagulante;
5. Análise dos parâmetros do efluente;
6. Proposta de implementação do tratamento em escala industrial.

3.1 Coleta de efluente bruto

Durante os meses de setembro e outubro de 2023, foram realizadas três coletas do efluente da indústria. Este é oriundo da lavagem dos materiais plásticos durante o processo de moagem úmida e foi submetido a diversos ciclos de lavagem antes de ser coletado para análise.

Na Tabela 6 estão dispostas as informações de data, horário, quantidade coletada e idade do efluente, a qual se refere ao período desde a última troca de água.

Tabela 6 – Coletas de efluentes realizadas durante o estudo

COLETA DE EFLUENTE			
DIA	HORÁRIO	QUANTIDADE	IDADE DO EFLUENTE
11/09/2023	08 h	3 L	3 dias
22/09/2023	08 h	20 L	14 dias
05/10/2023	08 h	25 L	27 dias

Fonte: Autoria própria (2023)

Com os moinhos de facas desligados, a coleta foi realizada na terceira caixa de decantação, visto que esta possui uma bomba fixa no tanque, facilitando a retirada das amostras, conforme apresenta a Figura 13(a).

Como pode ser verificado na Figura 13(b), as coletas de efluente foram realizadas utilizando-se frascos de material plástico de polietileno de alta densidade, além de um galão de 20 L para a última amostra.

Figura 13- Ponto de retirada das amostras para tratamento



Fonte: Aatoria própria (2023)

Todas as coletas do efluente foram realizadas às 8 h, de forma a garantir que antecedessem o início da jornada de trabalho e, assim, o moinho estivesse desligado. Além disso, a coleta neste horário representou uma simulação do que seria, de fato, realizado na empresa durante o descarte do efluente na rede de esgoto, caso este estivesse com os parâmetros de acordo com o permitido pela legislação.

3.2 Caracterização do efluente bruto

A primeira análise foi realizada visando a caracterização do efluente bruto e identificação dos parâmetros relevantes a serem tratados, de modo a possibilitar seu descarte na rede de esgoto ou seu reuso industrial.

Dessa forma, às 8 h do dia 11 de setembro de 2023, foram coletados 3 litros de efluente e, no mesmo dia da coleta, os seguintes parâmetros foram analisados: pH, sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST) e DQO. As metodologias adotadas para as análises estão no tópico 3.5 deste documento.

3.3 Tratamento do Efluente

O tratamento proposto para o efluente foi baseado nos métodos que, segundo Cavalcanti (2016), são os mais convencionais: coagulação e floculação, com a adição de um agente coagulante.

Foram testados dois tipos de coagulantes: um orgânico (Tanfloc®) e um inorgânico (sulfato de alumínio), ambos escolhidos por serem muito utilizados industrialmente e, conseqüentemente, possuírem grande popularidade.

Com o auxílio de um equipamento *Jar Test* (marca Nova Ética - modelo 218-6LDB), de seis provas com regulador de rotação das hastes de mistura, variou-se os parâmetros de concentração do coagulante e tempo de sedimentação. Os ensaios de coagulação / floculação / sedimentação foram realizados em duas corridas de análise, uma vez que o equipamento comporta 6 frascos por vez. Em cada um dos frascos foram dispostos 200 mL do efluente e o volume de coagulante previamente estabelecido.

Para tanto, inicialmente, foram dispostos 100 mL do efluente em um recipiente cilíndrico, ao qual foi adicionado 1 mL de solução de coagulante na concentração de 10 g/L (aqui identificada como solução mãe), previamente preparada e agitada manualmente com auxílio de um bastão de vidro. A adição da solução mãe foi feita com cautela, com auxílio de uma proveta de 10 mL, incrementando-se volumes de 1 mL por vez, até que fosse verificado o início da formação dos flóculos, momento no qual foi possível a determinação da concentração inicial de coagulante.

Para ambos os coagulantes, a quantidade de solução mãe adicionada foi igual a 3 mL, resultando em uma concentração inicial de coagulante no efluente equivalente a 300 mg/L para ambos coagulantes. A partir deste dado, foi proposta a análise de seis diferentes concentrações do coagulante, de forma a iniciar a partir da concentração 250 mg/L até 500 mg/L, em intervalos de 50 mg/L cada, para cada tipo de coagulante.

Para facilitar o entendimento, na Tabela 7 são apresentadas as quantidades de efluentes e coagulantes a serem utilizadas nos testes, visando atingir as concentrações pré-determinadas de coagulante na mistura, considerando um volume total da solução de 200 mL em cada recipiente. É importante ressaltar que, antes da disposição do efluente para o teste de coagulante, este foi passado por uma peneira convencional, simulando um processo de gradeamento em escala laboratorial, tratamento sugerido a partir da caracterização do efluente.

Tabela 7 - Quantidade de efluente e solução mãe adicionados para alcançar concentrações determinadas para os dois tipos de coagulantes

Concentração Mistura [mg/L]	250	300	350	400	450	500
Volume Efluente [mL]	195	194	193	192	191	190
Volume Sol mãe (10 g/L) [mL]	5	6	7	8	9	10

Fonte: Aatoria própria (2023)

Por fim, os frascos contendo efluente foram posicionados sob as hastes de agitação do *Jar Test*, e ligado o aparelho como demonstrado na Figura 14. Após, as soluções de coagulante foram despejadas e então o cronômetro foi acionado. Nos primeiros três minutos, realizou-se uma mistura rápida, submetendo as amostras à agitação de 100 rpm. Posteriormente, a agitação foi reduzida para 15 rpm, com duração de 10 minutos. Logo após, desligou-se o equipamento e contabilizou-se o tempo de sedimentação com uso do cronômetro.

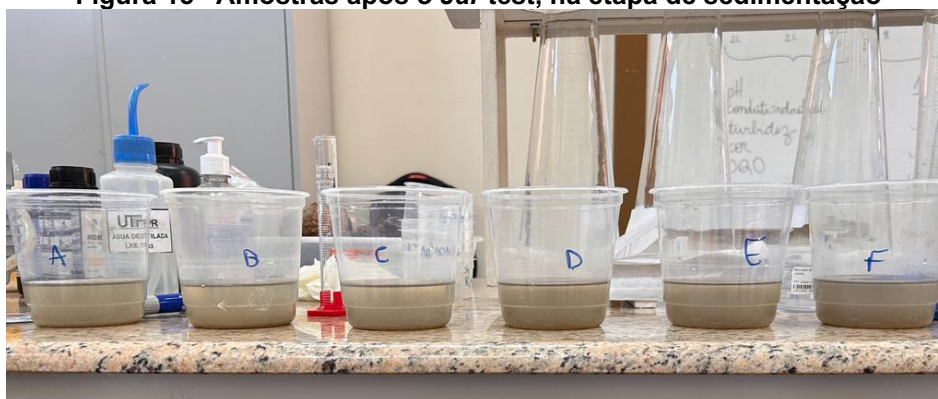
Figura 14– Representação do teste de coagulação realizado no *jar test*



Fonte: Aatoria própria (2023)

Após a agitação rápida e lenta, os recipientes foram transferidos para bancada para facilitar a observação da sedimentação como mostrado na Figura 15. A primeira análise de turbidez foi realizada em 10 minutos de sedimentação e assim sucessivamente, nos mesmos intervalos, até completar 30 minutos totais. Para a análise de turbidez, o líquido sobrenadante foi retirado com o auxílio de pipetas de Pasteur, tomando cuidado para não misturar os flóculos e o sedimentado com o clarificado.

Figura 15– Amostras após o Jar test, na etapa de sedimentação



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a realização do experimento, as amostras do efluente tratado foram coletadas em pequenos recipientes de 100 mL e armazenadas em um refrigerador, em temperatura de aproximadamente 6 °C, até a realização das análises dos parâmetros de pH, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais e DQO. Tais análises foram realizadas no dia posterior ao teste, tanto com o efluente bruto, como com as amostras tratadas e as metodologias adotadas para estas análises estão no tópico de 3.5 deste documento.

3.4 Avaliação da concentração de coagulante

A avaliação da concentração de coagulante foi realizada apenas para aquele que apresentou o melhor resultado no teste anterior. Ainda, empregou-se o tempo de sedimentação que também foi previamente obtido. Deste modo, variou-se a concentração de coagulante entre 400 mg/L, 500 mg/L e 600 mg/L, visto que o teste anterior foi observado pequenas alterações na escala de 50 mg/L.

Tendo em vista que as análises posteriores a este teste necessitam de um volume elevado de efluente tratado, este foi realizado com volume de 2000 mL de efluente no *Jar Test*. Antes de adicionar o volume especificado, o efluente foi peneirado para remoção de impurezas, que ficaram retidas na peneira (Figura 16).

Figura 16- Material plástico retino na peneira



Fonte: Autoria própria (2023)

Assim como no teste anterior, utilizou-se uma solução de coagulante (solução mãe) com concentração de 10 g/L. Esta foi disposta em béqueres com auxílio de uma proveta, em diferentes volumes, de acordo com a concentração desejada da mistura. O volume de efluente também variou em decorrência da concentração desejada. A Tabela 8 apresenta os volumes de efluente e solução mãe utilizados para cada amostra.

Tabela 8 - Quantidade de coagulante terceiro teste

Concentração Mistura [mg/L]	400	500	600
Volume Efluente [mL]	1920	1900	1880
Volume Sol mãe (10 g/L) [mL]	80	100	120

Fonte: Autoria própria (2023)

Definidos os volumes, o efluente a ser tratado foi disposto nos recipientes do *Jar Test* e, simultaneamente, adicionou-se o devido volume de solução mãe em todos os compartimentos. Neste momento, o cronômetro foi acionado. As amostras foram submetidas à agitação rápida de 100 rpm por três minutos, e após, mistura lenta de 15 rpm por 10 minutos. Na Figura 17, são apresentadas as amostras de efluente antes do processamento.

Figura 17– Amostras de efluente dispostas no Jar test antes da realização do teste



Fonte: Autoria própria (2023)

Após o teste laboratorial, cada amostra do efluente tratado foi despejada em dois recipientes de 1 L, identificada e armazenada no refrigerador condicionado, à 6° C, até o prosseguimento das outras análises.

Os parâmetros analisados foram baseados nos que a SAMAE utilizou no último relatório de análise do efluente. São eles: pH, DBO, DQO, sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais. As metodologias adotadas para as análises estão no tópico de 3.5 deste documento e os limites tomados como referência são os estabelecidos no Decreto n° 380/2017 da SAMAE (SAMAE, 2017).

3.5 Análise dos parâmetros do efluente

As análises dos parâmetros do efluente foram realizadas por métodos já consolidados, apontados pela American Public Health Association (APHA *et al.*, 2017) e baseadas no livro “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*

(SMEWW, 2017)”. Para cada parâmetro analisado, os métodos e procedimentos empregados estão descritos na sequência.

3.5.1 Turbidez

A turbidez do efluente foi avaliada de acordo com o Método Nefelométrico 2130 B (APHA *et al.*, 2017), utilizando-se um turbidímetro (Marca Del Lab / Modelo DLT-WV), disponibilizado pela Universidade Federal Tecnológica do Paraná, *Campus Londrina*.

Figura 18 Turbidímetro utilizado na análise de turbidez do efluente.



Fonte: Autoria própria (2023)

Para o teste, primeiramente, completou-se a cubeta do equipamento com água destilada, utilizada como referência (branco da amostra). Na sequência, adicionou-se o efluente nas cubetas e se procedeu a leitura. Após cerca de 30 segundos, o resultado, em NTU, foi indicado diretamente no visor do equipamento. Entre a leitura de um efluente e outro a cubeta foi higienizada com a adição de água destilada, removendo-se possíveis resquícios do efluente anterior, de modo a não interferir no resultado.

3.5.2 Potencial hidrogeniônico (pH)

O Método Eletrométrico 4500 H+B (APHA *et al.*, 2017) foi utilizado para medição do potencial hidrogeniônico (pH) da amostra do efluente. Para tanto, utilizou-se um pHmetro (Marca Ion / Modelo Phb 500), previamente calibrado e limpo. Após adicionada em um béquer a solução que se deseja conhecer o pH, colocou-se o eletrodo do equipamento em contato com a amostra e se aguardou a estabilização do equipamento. O resultado é indicado diretamente no visor. A cada troca da solução para análise, realizou-se a limpeza do eletrodo com água destilada.

3.5.3 Sólidos totais (ST)

Para determinação dos sólidos totais (ST), empregou-se o Método Gravimétrico 2540 B (APHA *et al.*, 2017), utilizando-se volumes variados das amostras, conforme a disponibilidade do efluente. Na análise de ST no teste inicial, para caracterização do efluente, foi usada uma alíquota de 100 mL, em triplicata. Já na análise após o tratamento, foram empregados 25 mL, em duplicata para os melhores resultados da turbidez e do efluente bruto, e para a análise da concentração de coagulante, foram utilizados 50 mL, em duplicata.

3.5.4 Sólidos suspensos totais (SST)

A metodologia adotada para análise de sólidos suspensos totais (SST) foi a Gravimétrica 2540D (APHA *et al.*, 2017). A análise de SST para caracterização do efluente foi realizada com amostras em duplicata, uma usando um volume de 100 mL e outra com 50 mL. Durante os testes referentes ao tratamento do efluente, a análise de SST para o efluente bruto foi realizada em duplicata, com alíquotas de 25 mL. Já para o efluente tratado, devido à sua baixa disponibilidade, o teste foi realizado com uma alíquota, com alíquotas de 25 mL. Na avaliação da concentração de coagulante, a verificação de SST foi feita em duplicata, com volume de 50 mL cada amostra.

3.5.5 Sólidos dissolvidos totais (SDT)

O Método Gravimétrico 2540 C (APHA *et al.*, 2017) foi aplicado para análise de sólidos dissolvidos totais (SDT). Esse teste foi realizado nos efluentes bruto e tratado, para verificação do tratamento proposto, e no teste da concentração de coagulante. Para o efluente bruto, empregou-se um volume de 25 mL de amostra, em duplicata. Para o efluente tratado, devido a sua escassez, utilizou-se o mesmo volume, porém, somente uma vez. Já o teste da concentração de coagulante, foi realizado em duplicata, com amostras de 50 mL.

3.5.6 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise da demanda química de oxigênio (DQO) do efluente foi realizada empregando-se o Método Colorimétrico, refluxo fechado (5220 D) (APHA *et al.*, 2017). Para o efluente bruto, na primeira leitura de DQO, foram separados as seguintes amostras para análise: bruto sem diluição, diluído 1:10, diluído 1:5, diluído 1:20 e uma amostra em branco, todas em duplicata. Cada amostra foi colocada no interior de um tubo e identificada. Na análise de DQO pré e pós tratamento, as duas amostras selecionadas e o efluente bruto foram testados em triplicata. Já na análise da concentração de coagulante, as três amostras do efluente tratado e uma do bruto foram submetidas a triplicata para determinação da DQO.

3.5.7 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A Demanda bioquímica de oxigênio foi realizada utilizando o Método Respirométrico 5210 D (APHA *et al.*, 2017) e utilizando o aparelho manométrico Hack, diluição e incubação por 5 dias a 20 °C.

3.6 Proposta de implementação do tratamento em escala industrial

Para a proposta de melhoria avaliada neste trabalho, é interessante estimar o volume de efluente gerado. Com esta finalidade, foram coletadas as dimensões das caixas de decantação presentes na empresa. As medições foram realizadas conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19- Medições das caixas de decantação



Fonte: Autoria própria (2023)

A altura foi medida desde a base subterrânea da caixa até o fim da parede entre os tanques, não medindo a borda da caixa, conforme demonstra a Figura 20.

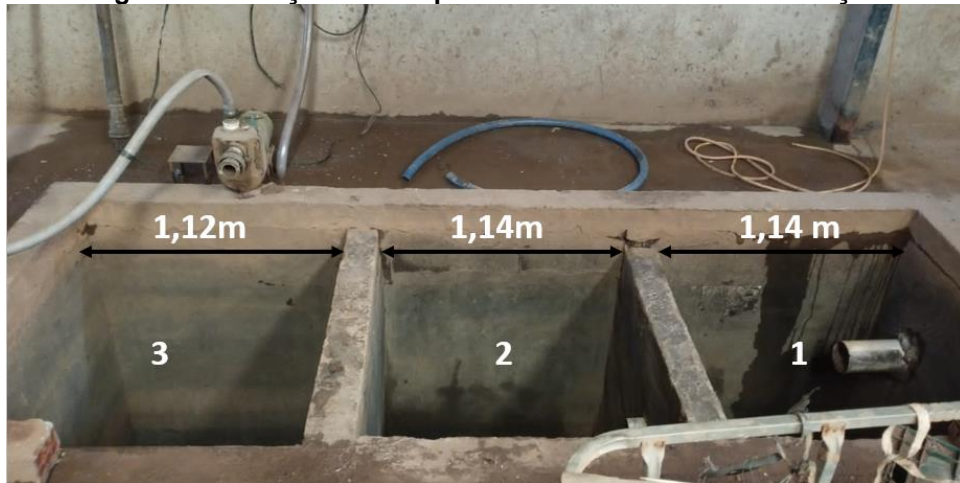
Figura 20- Medição da altura



Fonte: Autoria própria (2023)

As numerações dos tanques utilizadas para sua identificação estão descritos na Figura 21.

Figura 21- Medição do comprimento das caixas de decantação



Fonte: Autoria própria (2023)

Finalmente, visando aplicar o tratamento proposto em uma escala industrial, realizou-se um levantamento dos materiais já disponíveis na indústria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos em cada uma das etapas deste trabalho estão apresentados sequencialmente, seguindo a mesma ordem apresentada na metodologia.

4.1 Caracterização do efluente bruto

A fim de verificar as características do efluente estudado, foram analisados alguns parâmetros básicos do efluente bruto, como pH, sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST) e demanda química de oxigênio (DQO). Os resultados da caracterização inicial estão dispostos na Tabela 9.

Para facilitar o entendimento, vale lembrar que a denominação de efluente bruto utilizada neste trabalho se refere ao resíduo líquido oriundo da lavagem dos materiais plásticos durante o processo de moagem úmida e que foi submetido a sucessivos ciclos de lavagem.

Tabela 9 - Resultado da caracterização inicial do efluente bruto

Parâmetros do efluente bruto	Análise	DECRETO N° 380/2017
pH	7,4	Entre 6 a 9
ST [mg/L]	450,0	Até 1200,0
SST [mg/L]	730,0	Até 300,0
DQO [mg/L]	494,5	Até 800,0

Fonte: Autoria própria (2023)

A partir da análise inicial, foi possível observar que os valores obtidos para os parâmetros pH, ST e DQO estão de acordo com o estipulado pelo Decreto nº 380/2017 da SAMAE. No entanto, o teor de SST extrapola consideravelmente o permitido, alcançando um valor superior em, aproximadamente, 243,5%, evidenciando, portanto, a necessidade de submeter este efluente a algum tipo de tratamento para o controle dos SST. Como mostrado na Tabela 6, o efluente utilizado para a caracterização se encontrava com idade de 3 dias, usualmente o efluente é usado até a idade de 14 dias na empresa em estudo, dessa forma os parâmetros ainda estavam bons para seu reuso e seu descarte. Já considerando o reuso para outras finalidades o efluente se apresentou inapropriado.

Embora a concentração de sólidos suspensos totais esteja bem acima do permitido, o elevado valor deste parâmetro é relativamente comum nos efluentes de indústrias recicladoras, conforme apresentado em pesquisas de Bordonalli (2007) e Casali (2011). Este pode estar relacionado ao pó plástico gerado no processo de moagem, que fica disperso e suspenso na água devido a sua baixa densidade. Segundo Cavalcanti (2016), para contornar este problema, o tratamento recomendado pode ser a exposição do efluente a uma etapa de peneiramento, o que poderia impedir que sólidos grosseiros atravessem a peneira, diminuindo assim, o valor de SST no efluente final.

Comparando o resultado obtido com outros estudos que analisam efluentes de empresas do mesmo ramo de atividades, os resultados deste trabalho foram inferiores para alguns parâmetros, como SST e DQO. De acordo com a caracterização realizada por Casali (2011), a concentração de sólidos suspensos foi igual a 205 mg/L e a DQO igual a 2689 mgO₂/L. Já no estudo de Bordonalli (2007), a concentração de sólidos totais foi igual a 16083 mg/L, de sólidos suspensos 7770 mg/L e a DQO média foi igual a 4102 mg/L. Entende-se como positivo o fato de o efluente bruto aqui analisado apresentar valores menores destes parâmetros em comparação a outras indústrias do ramo, uma vez que, devido a isso, o tratamento para o descarte ou reuso deste efluente pode exigir processos que não sejam de elevada complexidade.

Com relação ao elevado teor de SST encontrado, visando a adequação do efluente durante o processo produtivo, pode-se sugerir a implementação de peneiras com gramaturas menores nos ralos por onde escoar o efluente, abaixo dos moinhos, impedindo que os sólidos sejam carregados para as caixas de decantação. O peneiramento com redes mais finas antes do descarte ou reuso da água garantiria a redução deste parâmetro.

4.2 Tratamento do efluente

A primeira etapa para a proposta do tratamento do efluente foi a análise do desempenho dos dois coagulantes, um orgânico (Tanfloc®) e um inorgânico (sulfato de alumínio), que seriam, posteriormente, empregados no processo de coagulação/floculação.

Por se tratarem de materiais comerciais, não foi necessário qualquer tipo de tratamento prévio, o que é um ponto extremamente desejado para a empresa

referenciada neste trabalho, visto que, assim, não há a necessidade de investimentos financeiros em tecnologia e nem de tempo para realização dos preparos.

De modo a fazer a seleção do melhor tratamento sem a necessidade de processar todas as amostras, foi escolhida a turbidez como parâmetro comparativo. A escolha do parâmetro de turbidez como comparativo para escolha do melhor. De modo a fazer a seleção do melhor tratamento sem a necessidade de processar todas as amostras, foi escolhida a turbidez como parâmetro comparativo. A escolha deste parâmetro do mesmo ser rápido de ser medido e permitir estimar a concentração de sólidos totais, suspensos e dissolvidos da solução.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados de turbidez dos ensaios, de acordo com o tempo de sedimentação, tipo de coagulante e concentração da solução coagulante. Cabe explicitar que os resultados obtidos a partir da segunda análise de tempo de sedimentação do Tanfloc®, visto que esse apresentou turbidez acima do teste realizado pelo sulfato de alumínio, já permitiram descartar a realização do teste de turbidez para este coagulante no tempo de sedimentação de 30 minutos. Sendo assim, para este material, o teste foi realizado apenas nos tempos de 10 e 20 minutos de sedimentação.

Tabela 10 - Turbidez com variação de parâmetros de tipo de coagulante, concentração e tempo de sedimentação

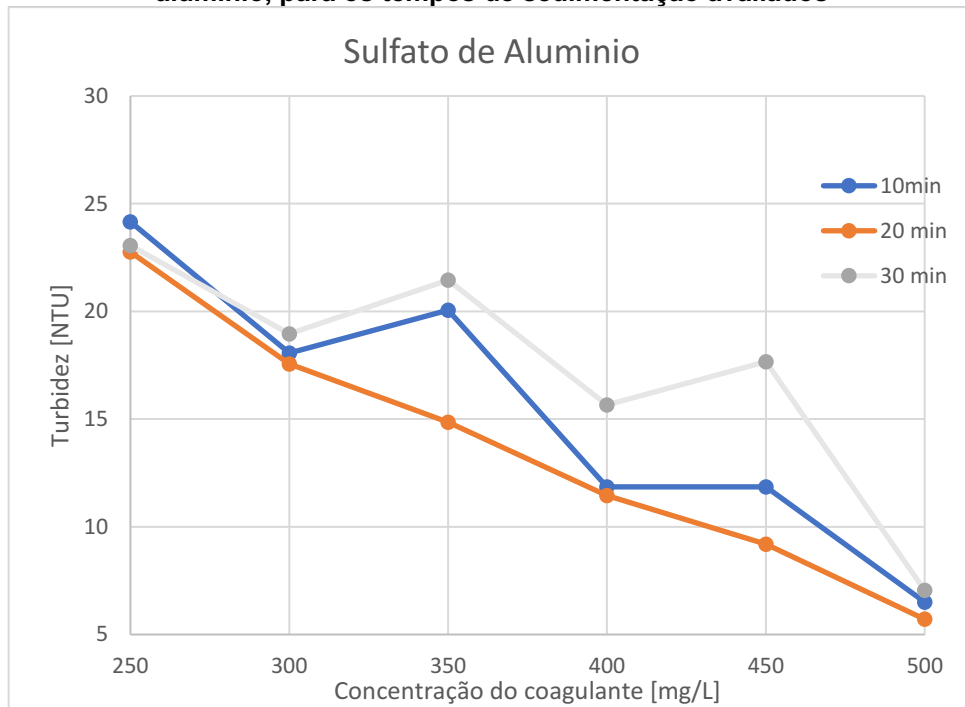
Coagulante	Identificação da amostra	Concentração da solução de coagulante (mg/L)	Turbidez em função do tempo de decantação [NTU]		
			10 min	20 min	30 min
SULFATO DE ALUMÍNIO	A	250	24,16	22,76	23,06
	B	300	18,06	17,56	18,96
	C	350	20,06	14,86	21,46
	D	400	11,86	11,46	15,66
	E	450	11,86	9,19	17,66
	F	500	6,51	5,71	7,05
TANFLOC®	G	250	29,06	28,96	-
	H	300	27,16	27,86	-
	I	350	18,76	19,46	-
	J	400	16,36	15,76	-
	K	450	13,96	15,16	-
	L	500	11,66	12,66	-

Fonte: Autoria própria (2023)

A fim de analisar o comportamento dos coagulantes e sua performance, os resultados de turbidez apresentados na Tabela 10 foram plotados em gráficos

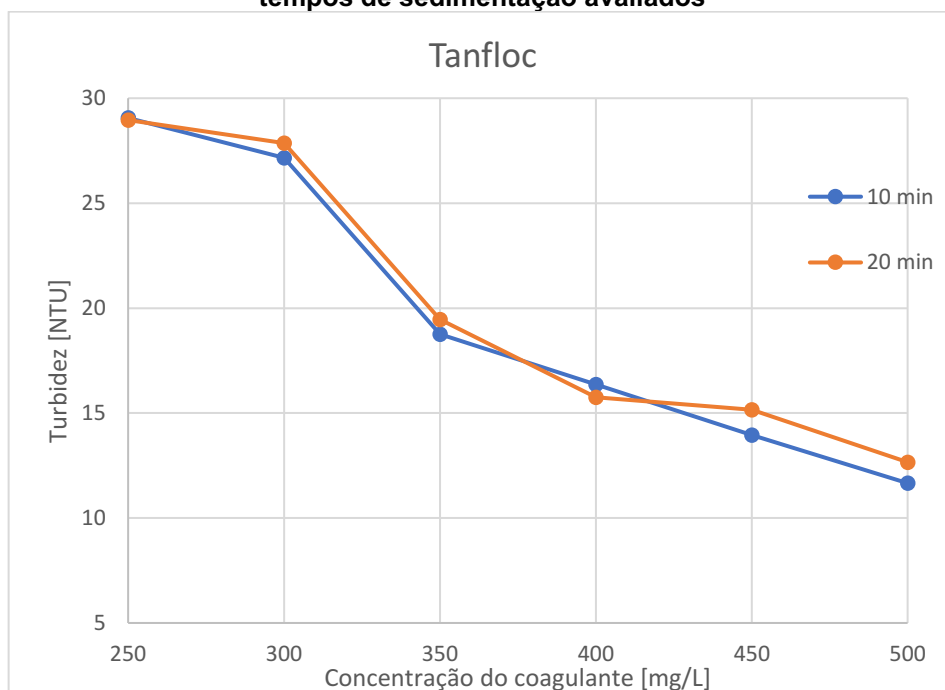
comparativos, que relacionam a turbidez em função da concentração da solução de coagulante, para os tempos de sedimentação avaliados, tanto para o sulfato de alumínio (Figura 22), como para o Tanfloc® (Figura 23).

Figura 22–Turbidez das amostras em função da concentração da solução de sulfato de alumínio, para os tempos de sedimentação avaliados



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 23- Turbidez das amostras em função da concentração da solução de Tanfloc®, para os tempos de sedimentação avaliados



Fonte: Autoria própria (2023)

A partir dos resultados da Tabela 10 e dos gráficos apresentados nas Figuras 22 e 23, é possível observar que, como esperado, houve um decréscimo da turbidez conforme a concentração de coagulante foi aumentada.

Para o Tanfloc®, o comportamento da turbidez em relação às concentrações avaliadas se manteve praticamente o mesmo, não apresentando grandes alterações no tempo de sedimentação. No entanto, um comportamento interessante foi observado para o sulfato de alumínio, que apresentou uma curva de menor turbidez no tempo intermediário de sedimentação (20 minutos). Além disso, para os tempos de 10 minutos e 30 minutos, foram observados alguns picos de turbidez nas concentrações de 350 mg/L e 450 mg/L. Tal comportamento pode ser justificado pela natureza orgânica do coagulante, depois de coagular ele pode sedimentar junto com a matéria orgânica deixando a água com maior turbidez.

Observa-se, ainda, que o coagulante que apresentou resultados mais favoráveis ao tratamento foi o sulfato de alumínio, já que, para todas as concentrações avaliadas, a turbidez alcançada por este material foi menor do que a obtida para o Tanfloc®.

Além disso, ao analisar a turbidez atingida por ambos os materiais na concentração de 500 mg/L, observa-se que o sulfato de alumínio diminuiu a turbidez da amostra para 6,51 NTU em 10 minutos de sedimentação, enquanto o Tanfloc® alcançou 12,66 NTU em 20 minutos. Logo, o sulfato de alumínio foi capaz de reduzir a turbidez para, aproximadamente, metade da alcançada pelo Tanfloc®, em metade do tempo de sedimentação.

Embora os testes de sulfato de alumínio tenham apresentado melhores resultado em relação à turbidez, as amostras usando Tanfloc® também foram analisadas para verificar com precisão os parâmetros necessários para controle. Dessa forma, as amostras escolhidas para análise dos parâmetros pH, ST, SST, SDT e DQO, foram a de maior concentração (500 mg/L) de ambos os coagulantes.

Os resultados obtidos das análises, para ambos os coagulantes, estão apresentados na Tabela 11. São apresentados também os parâmetros do efluente bruto e os estabelecidos pelo Decreto 380/2017 da SAMAE, além da Resolução 430/2011 do CONAMA. Na Tabela, os termos destacados com a cor alaranjada representam os parâmetros que se apresentaram fora da especificação.

Tabela 11 - Resultado da análise do efluente após tratamento

Parâmetros	Sulfato de Alumínio [500 mg/L]	Tanfloc® [500 mg/L]	Efluente Bruto	Decreto 380/2017 -SAMAE	Resolução 430/2011 - CONAMA
pH	7,03	7,25	7,36	6 - 9	5 - 9
DQO [mg/L]	142,06	149,96	676,64	800,00	Não estabelecido
Sólidos Totais (ST) [mg/L]	800	620	1100	1200	Não estabelecido
Sólidos Suspensos Totais (SST) [mg/L]	80	680	520	300	Não estabelecido
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) [mg/L]	720	640	560	750	Não estabelecido
Remoção DQO [%]	79,0%	77,8%	-	-	-
Remoção ST [%]	27,3%	43,6%	-	-	-
Remoção SST [%]	84,6%	0,0%	-	-	-
Remoção SDT [%]	0,0%	0,0%	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

O comportamento do pH da amostra ao final dos tratamentos foi condizente com o esperado. Para o sulfato de alumínio, esperava-se uma ligeira diminuição deste parâmetro, como aconteceu, já que o seu mecanismo de ação é pela liberação de H⁺ em solução, o que acaba diminuindo o pH do meio. No caso do Tanfloc®, de acordo com o fabricante, sua utilização não deve apresentar alteração do pH do efluente e, de fato, a alteração foi ainda menor do que para o sulfato de alumínio, sendo este desvio podendo ser justificado pela não homogeneidade da alíquota de efluente coletada ou, simplesmente, pelos desvios do equipamento, já que as amostras foram realizadas em momentos diferentes.

O parâmetro de DQO de todas as amostras se apresentou dentro do permitido para o descarte. Para o efluente bruto, este resultado não era esperado, uma vez que este já tinha uma idade de 14 dias, tendo sido, portanto, reempregado no processo repetidas vezes. Ainda assim, com o uso dos coagulantes, foi possível constatar uma redução ainda maior e bastante considerável, de mais que 77% em ambos os testes.

Em relação aos sólidos totais do efluente bruto, o resultado de ST foi superior ao obtido no primeiro teste (de caracterização do efluente), porém, ainda dentro do limite especificado em legislação. É possível que tenha sido maior pelo fato de que, no teste anterior, o efluente tinha uma idade de apenas 3 dias, enquanto neste, a idade foi de 14 dias. Ao final do tratamento com sulfato de alumínio, obteve-se um efluente com maior concentração de sólidos totais do que o obtido no tratamento com o uso do coagulante orgânico. De fato, o sulfato de alumínio pode apresentar alguns comportamentos não desejados em relação ao teor de sólidos. Além de poder afetar

a formação de flocos, formando-os mais densos tem ainda, outro fator crítico, que é a sua concentração. Caso esteja em excesso, o próprio coagulante pode agir como partículas coloidais e acabar, inclusive, contribuindo para o aumento de sólidos totais.

O parâmetro sólidos suspensos foi o único fora do limite permitido, tanto para o efluente bruto quanto para o tratado com coagulante orgânico a 500 mg/L. Além disso, um fato interessante é que a concentração de SST do efluente tratado foi maior, inclusive, do que no efluente bruto. Acredita-se que uma possível explicação para este comportamento seja o fato de que o uso de coagulante orgânico pode ocasionar a sua sedimentação juntamente a matéria orgânica inerente ao efluente, o que aumentaria, desta forma, o parâmetro de sólidos suspensos da amostra.

Para os sólidos dissolvidos totais também foi observado um aumento de concentração nas amostras de efluente tratado em comparação com o bruto, resultado este que não era esperado, visto que o tratamento tem como objetivo a sua redução, paralelamente à redução de matéria orgânica, medida pela DQO. Para este parâmetro, acredita-se que a única justificativa possa ser algum erro experimental durante as leituras e, portanto, seria interessante que uma nova análise fosse realizada, de forma a confirmar o resultado obtido. Entretanto, mesmo apresentando resultados de SDT divergentes do comportamento esperado, as amostras tratadas estão dentro do que é aceito pela legislação para o descarte do efluente.

Em relação à outra proposta deste trabalho, sobre a possibilidade de reutilização do efluente tratado em alguma aplicação industrial secundária, diante dos resultados obtidos, entende-se que, apenas passando pelos tratamentos convencionais aqui apresentados, o reuso desse efluente não é uma possibilidade, uma vez que nenhum dos parâmetros analisados pós-tratamento se encontram dentro dos limites descritos na Tabela 3. Sendo assim, para o momento, o mais adequado e viável para a empresa é que, após ser submetido a novas etapas que diminuam a concentração de sólidos suspensos totais, o efluente seja descartado em corpo hídrico.

Diante do exposto, devido aos bons resultados obtidos nos testes usando o coagulante sulfato de alumínio, dentre as duas opções iniciais, este foi selecionado para a realização de novos testes.

4.3 Avaliação da concentração de coagulante

Com o objetivo de refinar os resultados obtidos nos testes anteriores, avaliou-se a concentração ideal de coagulante a ser empregada no tratamento.

Para tanto, os seguintes parâmetros foram fixados, considerando os melhores resultados obtidos nos testes anteriores: coagulante sulfato de alumínio e tempo de sedimentação de 20 minutos.

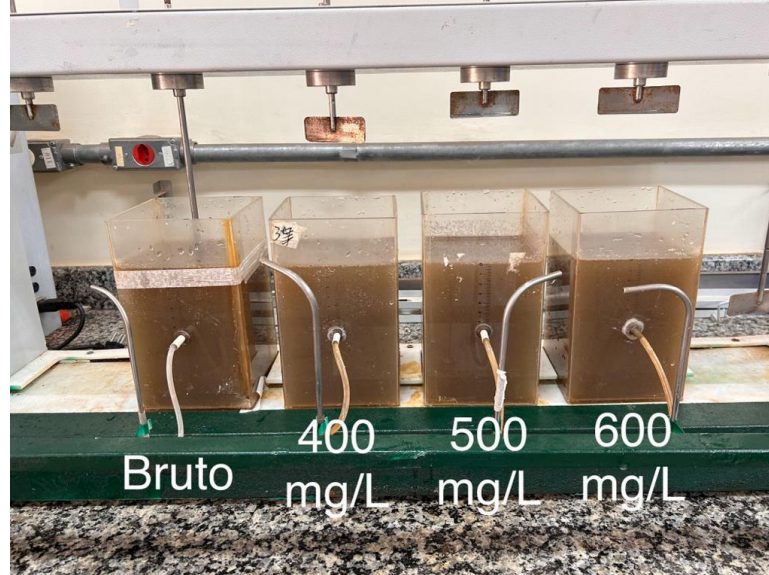
A partir disso, foram realizados testes variando-se as concentrações do coagulante em 400 mg/L, 500 mg/L e 600 mg/L. Visando obter resultados ainda melhores, antes da disposição do efluente no equipamento *Jar Test*, este foi submetido a um procedimento de peneiramento. A quantidade de material retido na peneira é apresentada na Figura 24 e o efluente, após o peneiramento, já preparado e disposto no *Jar Test*, pode ser observado na Figura 25.

Figura 24- Material retido na peneira antes de o efluente ser disposto no *Jar Test*



Fonte: Autoria própria (2023)

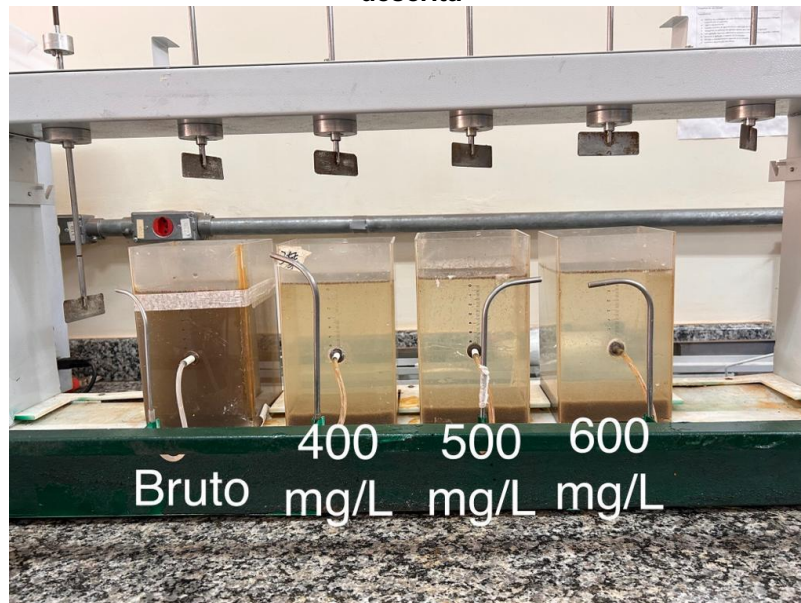
Figura 25 – Efluente após o peneiramento, já preparado e disposto no *Jar Test*



Fonte: Autoria própria (2023)

Decorridos os 20 minutos propostos para o tempo de sedimentação, pôde-se observar, nitidamente, a diminuição da turbidez da amostra e os sólidos sedimentados no fundo de cada um dos recipientes do *Jar test* (Figura 26).

Figura 26 - Resultado terceiro teste após o tempo de sedimentação para cada concentração descrita



Fonte: Autoria própria (2023)

Buscando-se quantificar os resultados já constatados visualmente, a turbidez das amostras tratadas foi analisada e comparada com a da amostra bruta. Os resultados estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 12 - Resultados da turbidez para a amostra bruta e para as amostras tratadas com sulfato de alumínio em diferentes concentrações

Amostra	Turbidez [NTU]
Bruta	279,00
Tratada com sulfato de alumínio a 400 mg/L	9,85
Tratada com sulfato de alumínio a 500 mg/L	18,30
Tratada com sulfato de alumínio a 600 mg/L	10,30

Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados apresentados na Tabela 14 corroboram o que foi observado visualmente. É nítida a diminuição do parâmetro Turbidez em todas as amostras. Ainda, dentre as concentrações de sulfato de alumínio avaliadas, a solução de menor concentração (400 mg/L) apresentou a maior redução de turbidez.

Após a análise de turbidez, foram avaliados os seguintes parâmetros, em duplicata: pH, DQO, ST, SST, SDT e DBO. Para facilitar o entendimento, o resultado dos testes de sólidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais são apresentados na Figura 25, na qual cada linha representa os resultados de uma das concentrações avaliadas. A numeração 1 se refere ao teste de tratamento com concentração de 400 mg/L de coagulante, a número 2 de 500 mg/L e a terceira linha, de 600 mg/L. Além disso, a cada duas colunas são apresentados, nesta ordem, os testes de sólidos totais (ST), sólidos dissolvidos totais (SDT) e sólidos suspensos totais (SST).

Figura 27- Resultado das análises de sólidos do terceiro teste



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a quantificação dos parâmetros, os resultados foram tabulados e podem ser visualizados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados das análises dos parâmetros avaliados no teste de dosagem do coagulante

Parâmetros	[400 mg/L]	[500 mg/L]	[600 mg/L]	Efluente Bruto	[Decreto n° 380 SAMAE]
Turbidez [NTU]	9,85	18,30	10,30	279,00	-
pH	6,22	6,05	5,86	7,50	6 a 9
DQO [mg/L]	643,29	670,50	583,60	1023,37	800,00
Sólidos Totais (ST) [mg/L]	1140,00	1030,00	1020,00	1340,00	1200,00
Sólidos Suspensos Totais (SST) [mg/L]	240,00	240,00	250,00	410,00	300,00
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) [mg/L]	700,00	680,00	690,00	640,0	750,00
DBO [O ₂ /L]	655	615	670	810	400
Remoção DQO [%]	37,1%	34,5%	43,0%	-	-
Remoção ST [%]	14,9%	23,1%	23,9%	-	-
Remoção SST [%]	41,5%	41,5%	39,0%	-	-
Remoção SDT [%]	0,0%	0,0%	0,0%	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Inicialmente, é importante ressaltar que, durante toda a elaboração do trabalho, a água residuária, efluente gerado pela empresa não foi descartado, somente repostosua perda do processo. Dessa forma, é possível notar grande diferença entre os parâmetros do efluente bruto do primeiro teste de bancada com o terceiro ensaio.

Comparando alguns trabalhos utilizados como referência, a coleta do efluente desse ensaio foi a mais próxima aos tratados nas bibliografias. No estudo de Casali (2011) os parâmetros de turbidez, DQO, DBO, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos foram equivalentes a 630 NTU, 2689 mgO₂/L, 958 mgO₂/L, 205 mg/L e 1467 mg/L, respectivamente. Enquanto o efluente bruto analisado por Bordonalli (2007) obteve resultados de DQO, DBO, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos equivalentes a 4978 mgO₂ /L, 2229 mgO₂ /L, 7770 mg/L e 8603 mg/L, respectivamente. Nestes trabalhos, os efluentes são de indústrias de reciclagem de plásticos com matérias primas similares, entretanto, o processo de produção e processamento da água de lavagem são diferentes. Dessa forma comparando os parâmetros dos artigos é possível verificar que o efluente bruto tratado neste presente trabalho possui características mais brandas para todos os parâmetros, isso pode ser justificado pelo

tamanho da estrutura de lavagem, número de lavagens já realizadas com o efluente e condição do material lavado também.

A partir dos resultados obtidos no teste da concentração de coagulante, é possível observar que, no efluente bruto, os parâmetros de DQO, ST, SST e DBO, apresentavam-se fora dos limites aceitáveis para seu descarte na rede de esgoto municipal. Após o tratamento, para todas as concentrações de coagulante avaliadas, estes parâmetros passaram a estar adequados para o lançamento. Em contrapartida, para a concentração de 600 mg/L, o pH pós tratamento apresentou uma alteração e passou a estar fora do limite aceito, embora ainda esteja próximo.

Para o parâmetro de DBO, houve uma redução média de 14,1%, porém ainda não foi suficiente, em nenhum dos testes, para atingir o limite permitido pelo Decreto nº 380/2017. Esse parâmetro apresentou resultados fora do esperado para as amostras de concentração de 400 mg/L e 600 mg/L. Acreditava-se que a DBO resultasse em concentrações abaixo da DQO, visto que a DQO quantifica o total de matéria orgânica, tanto dos componentes biodegradáveis quanto dos não biodegradáveis, enquanto a DBO somente a matéria biodegradável. Assim, o que se espera é que a DBO seja menor ou igual à DQO. A partir dos resultados, é possível afirmar que praticamente toda matéria orgânica presente nas amostras dos efluentes tratados se refere à matéria orgânica biodegradável e todas se apresentam acima do limite permitido para o descarte. Ademais, afim de ajustar o parâmetro de DBO, sugere-se a realização de tratamentos biológicos, como lagoas de estabilização, reatores anaeróbicos, filtros biológicos ou tratamento com logo ativado.

Outra observação importante é em relação à não redução do parâmetro sólidos dissolvidos totais. Ao contrário do esperado e constatado em experimentos similares, como o de Casali (2011), com redução de 44%, e o de Bordonalli e Mendes (2009), com redução de aproximadamente 8%, nenhuma das amostras avaliadas neste trabalho apresentaram redução.

Uma consideração relevante no contexto do processo de tratamento e reutilização da água consiste na observação da idade do efluente, que, neste teste, foi mensurada em 30 dias, visto que a última coleta corresponde a essa idade e os resultados obtidos foram favoráveis. Com base nisso, visto que a troca da água de lavagem no processo de moagem úmida na empresa em que foi realizada os estudos ocorre em um período de 14 dias, os resultados obtidos indicam que é factível estender os intervalos de renovação da água para até 30 dias, utilizando como

referências os parâmetros exceto a DBO. Esse parâmetro por fim deverá ser reanalisado e testado alternativas que viabilizem seu descarte, visto que os tratamentos propostos não foram suficientes para o limite estabelecido

4.4 Proposta de implementação do tratamento em escala industrial

A proposta principal deste trabalho foi a aplicação de um tratamento convencional de coagulação, floculação e sedimentação utilizando o coagulante sulfato de alumínio, com concentração de 500 mg/L e tempo de sedimentação de 20 minutos. Para esta proposta, todos os testes foram realizados em escala laboratorial, no entanto, acredita-se que, antes de implementá-lo no sistema produtivo, é crucial a realização de testes em escala industrial. Esses testes devem verificar os parâmetros analisados neste estudo e garantir a replicabilidade dos resultados obtidos.

A partir dos resultados obtidos nos testes laboratoriais, constatou-se a necessidade de implementação de peneiras nos ralos dos moinhos, de modo a reter o máximo de partículas de sólidos antes da entrada do efluente na caixa de decantação. Como é possível verificar na Figura 13 partículas grandes de plástico são arrastadas no processo de moagem e levadas até as caixas de decantação.

A fim de aumentar a escala dos misturadores para a mistura rápida e lenta do coagulante e visando não aumentar os custos industriais, foi realizado um estudo com os materiais disponíveis na empresa, além de avaliadas a necessidade do volume e da frequência desse tratamento, tendo em vista que o resíduo líquido aqui tratado como efluente é reempregado na moagem úmida por diversas vezes antes de ser descartado do processo.

Analisando o local disponibilizado para o tratamento do efluente, mostrado na Figura 28, os recursos disponíveis na indústria, o volume total de efluente a ser tratado, que é igual a 6800 L, o mesmo que o volume total do tanque de decantação, infere-se que será necessário realizar o tratamento em bateladas, considerando que o recipiente comporta 900 L por batelada, serão necessárias, aproximadamente, 8 bateladas de tratamento. Dessa forma de modo a obter a concentração apropriada de 500 mg/L cada batelada dispõe de 4,5 Kg de sulfato de alumínio, sendo o preço do quilo do coagulante aproximadamente R\$6,00, cada batelada custa R\$27,00 sendo o tratamento total de aproximadamente R\$216,00.

Figura 28– Local disponibilizado pela empresa para realizar o tratamento do efluente



Fonte: Aatoria própria (2023)

Os equipamentos disponíveis na indústria para adaptação de misturadores foram dois containers IBC (*Intermediate Bulk Container*) de 1000 L (Figura 29). Ainda, para desempenhar a função de misturador, será necessária a construção de um mecanismo que promova a mistura do efluente, possibilitando o processo de coagulação e floculação, conforme testado no aparelho *Jar Test*.

Figura 29– Recipientes disponíveis para realização da mistura e armazenamento.



Fonte: Aatoria própria (2023)

O tratamento seria iniciado pelo processo de gradeamento, antes mesmo do efluente entrar na caixa de decantação, fazendo com que todas as partículas de plásticos grosseiras fiquem retidas das peneiras ou grades localizadas nos ralos dos moinhos. A etapa de coagulação e floculação ocorreria nos dois containers, sendo esse responsável pelo tratamento de 900 L de efluente a cada batelada por container, utilizando aproximadamente 4,5 kg de sulfato de alumínio em cada e a agitação promovida pelo agitador que foi implementado ao tanque. Na Figura 29 é possível observar o protótipo do misturador que seria utilizado nos tanques de mistura, ainda na imagem é possível observar que no tanque 2 ainda é necessário realizar a sua abertura para que seja possível implementar o sistema de mistura.

De modo a tratar todo o efluente da empresa, considerando o resultado obtido no último teste, sendo a reposição mensal do volume de 6800 L das caixas de decantação, calcula-se que seriam necessárias 8 bateladas de tratamento no total.

A partir dos estudos e constatação da possibilidade do aumento do tempo de renovação da água de lavagem, a proposta acarretaria em uma economia de volume de 6800 L mensais de água, dado que ao invés de ocorrer a troca a cada 14 dias a troca ocorreria a cada 30 dias.

A maneira mais adequada do tratamento consiste na realização das 8 bateladas no em um único dia, possibilitando a remoção do lodo acumulado no fundo dos tanques de decantação. Esse processo de remoção do lodo é necessário para que o trabalho da bomba de recirculação da água não seja comprometido.

Além disso, destaca-se que as caixas de decantação estão interligadas por tubulações. Assim, quando a bomba realiza a sucção, o nível de água se estabiliza novamente. Isso implica que é necessário esvaziar todas as caixas simultaneamente para a limpeza, impedindo a possibilidade de limpar apenas uma caixa por vez.

Tendo em vista que os testes não foram realizados com água de reuso tratadas com coagulante, a introdução do efluente tratado novamente no processo produtivo teria a garantia de eficiência dos parâmetros ideais para novamente o reuso ou o descarte final. Dessa forma, a água tratada seria descartada diretamente da rede de esgoto.

Por fim, após o teste de validação do tratamento em escala industrial e sua aprovação pela empresa, entende-se como de extrema importância o monitoramento do tratamento, de modo a acompanhar os resultados obtidos e os parâmetros analisados dentro das exigências legais.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos a partir dos testes realizados no efluente de lavagem de uma indústria recicladora de plásticos, foi possível concluir que neste processo há grandes variações de parâmetros físico-químicos, que dependem, inclusive, da idade do efluente.

Ao final de todos os testes de coagulação e floculação apresentados no trabalho, considerando o sulfato de alumínio como coagulante, em uma concentração de 500 mg/L e tempo de sedimentação ideal de 20 minutos, os resultados demonstraram-se eficientes em relação aos parâmetros de pH, sólidos totais, sólidos suspensos totais e DQO. Entretanto, em relação à DBO, o tratamento não obteve eficiência necessária para atender à legislação municipal de descarte. Dessa forma, é necessária a realização de novos ensaios e testes a fim de validar um novo tratamento para redução do parâmetro possibilitando, dessa forma, seu descarte. Além disso, o reuso industrial para atividades secundárias não foi possível, devido ao fato de que os parâmetros não tiveram redução suficiente para atender ao solicitado nestas aplicações.

Assim, entende-se que o tratamento de gradeamento seguido de coagulação e floculação é válido em escala laboratorial para o seu descarte na rede de esgoto, sendo necessário sua validação em escala industrial.

Por fim, é possível concluir que o tratamento com uso do coagulante de sulfato de alumínio foi eficiente e pode ser replicado na indústria, porém, ainda é necessário realizar testes em relação ao tratamento da demanda bioquímica de oxigênio.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conservação e Reúso da água em Edificações**. São Paulo: ANA, 2005.

APHA *et al.* **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington: American Public Health Association, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). **Índice de reciclagem mecânica de plásticos atinge maior patamar desde 2018**. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/indice-de-reciclagem-mecanica-de-plasticos-atinge-maior-patamar-desde-2018/>. Acesso em: 28 out. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 10 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10024/2004: Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2020.

CASALI, Dionísio J. **Tratamento do efluente de uma recicladora de plásticos utilizando coagulante não metálico e compostagem**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CAVALCANTI, José Eduardo de A. **Manual de Tratamento de Efluentes Industriais**. 3. ed. São Paulo: Engenho, 2016.

CEMPRE. **Recycling rates in Brazil**. Disponível em: <https://cempre.org.br/en/taxas-de-reciclagem/>. Acesso em: 10 nov. 2023.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Qualidade da água tratada**. Disponível em: <https://www.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=40>. Acesso em: 25 set. 2023.

DOUGLAS, Daniel. **Os benefícios da reciclagem para o meio ambiente**. Disponível em: <https://convale.ce.gov.br/informa/28/os-beneficios-da-reciclagem-para-o-meio-ambiente>. Acesso em: 26 out. 2023.

FARIA, Flávia P.; PACHECO, Elen B. **A reciclagem de plástico a partir de conceitos de Produção Mais Limpa**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP). **Manual de conservação e reúso de água**. 2004. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4449049/mod_resource/content/1/Manual%2

Ode%20Conserva%C3%A7%C3%A3o%20e%20Re%C3%BAso%20FIESP.pdf
Acesso em: 28 ago. 2023.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN). **Manual de Conservação e Reuso de Água na Indústria**. Rio de Janeiro: FIRJAN, 2006.

FORLIN, Flávio J.; FARIA, José de A. Considerações sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Campinas, v. 12, n.1, p. 1-10. Disponível em: <https://www.scielo.br/jj/po/a/YNNvN9nLDV8rS5ffJp9rF4Q/>. Acesso em: 10 nov. 2023.

FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAUDE. **Manual prático de análise de água**. 4. ed. Brasília: Ministério da saúde, 2013.

GANDRA, Alana. **Índice de reciclagem no Brasil é apenas de 4%, diz Abrelpe**. 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-06/indice-de-reciclagem-no-brasil-e-de-4-diz-abrelpe#:~:text=De%20acordo%20com%20o%20Panorama,toneladas%20anuais%20de%20res%C3%ADduos%20recicl%C3%A1veis>. Acesso em: 10 nov. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Centro nacional de Monitoramento e Informações Ambientais (Cenima). Coordenação de Gestão da Informação Ambiental (Cogia). **Relatório de qualidade do meio ambiente**. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/phocadownload/qualidadeambiental/relatorios/2022/2022-06-03_RQMA_Brasil_2020.pdf. Acesso em: 23 out. 2023.

THE INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). **O futuro do setor de gestão de resíduos : tendências, oportunidades e desafios para a década**. 2022. Disponível em: <https://www.iswa.org/wp-content/uploads/2022/09/ISWA-Future-of-the-Waste-Management-Sector-Portuguese.pdf>. Acesso em 23 out. 2023.

IWAKI, Gheorge Patrick. **Implantação de coagulante de de alta performance à base de tanino para tratamento de água com foco na redução de turbidez da água bruta**: Estudo apresentado no Congresso Fenasan 2019. 2019. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/coagulante-tanino-tratamento-agua-turbidez/>. Acesso em: 15 out. 2023.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

MACÊDO, Jorge A. B. **Águas & Águas**. 3. ed. Belo Horizonte: CRQ-MG, 2007.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. Nova Iorque: 2003.

NUNES, José. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 6. ed. Aracaju: J. Andrade, 2012.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 26 out. 2023.

SPINACÉ, Márcia A. da Silva; PAOLI, Marcos A. **A tecnologia da reciclagem de polímeros**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2005.

STRAIATO, Henrique. **Tratamento de efluente de indústria de reciclagem de plástico por processo físico-químico em escala de bancada com coagulantes orgânicos e inorgânicos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. São Carlos: EdUFSCar, 2009, 144 p. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/x6mh4/pdf/zanin-9788576003601.pdf>>. Acesso: 10 nov. 2023.