

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE QUÍMICA
CURSO DE BACHARELADO E LICENCIATURA EM QUÍMICA**

PAULA DALLA VECCHIA

**TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA ORIUNDA DO
PROCESSO DE LAPIDAÇÃO E POLIMENTO DE VIDRO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2012

PAULA DALLA VECCHIA

**TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA ORIUNDA DO PROCESSO DE
LAPIDAÇÃO E POLIMENTO DE VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Comissão de Diplomação do Curso de Bacharelado em Química Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Pato Branco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Barreto Rodrigues
Co-orientador: Prof. Dr. Davi Costa Silva

FOLHA DE APROVAÇÃO

O trabalho de conclusão de curso intitulado **Tratamento de água residuária oriunda do processo de lapidação e polimento de vidro** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **O48B2** de 2012.

Fizeram parte da banca os professores:

Marcio Barreto Rodrigues

Davi Costa Silva

Simone Beux

RESUMO

VECCHIA, Paula Dalla. Tratamento de água residuária oriunda do processo de lapidação e polimento de vidro. 2012. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Pato Branco, 2012.

A crescente demanda de água utilizada no setor industrial tem levado as indústrias a avaliar as possibilidades internas de reúso. O reúso da água é considerado uma técnica segura e confiável, envolve menores investimentos no setor industrial e incentiva uma prática cada vez mais acessível. O objetivo desse trabalho é propor um sistema de tratamento e reúso de água residuária oriunda do processo de lapidação e polimento de vidro de uma empresa de comércio de vidros, baseado na otimização do processo de melhor eficiência, visando à escolha do tipo de tratamento mais adequado para a água residuária em questão em função de suas características físico-químicas e de sua tratabilidade. A água residuária é proveniente de uma empresa de comércio de vidros denominada Indústria e Comércio de Vidros Fratta LTDA, localizada na cidade de Pato Branco, PR. A geração da água residuária se dá na etapa de lapidação e polimento do vidro, onde significativas quantidades de água são utilizadas para refrigeração e lubrificação do material abrasivo utilizado no processo. Os resultados obtidos sugerem que o processo físico-químico fundamentado na floculação/decantação a base de sulfato de alumínio e polieletrólito aniônico é o mais eficiente para o tratamento do efluente em estudo tendo sido alcançado níveis máximos de remoção de DBO, DQO, turbidez e sílica da ordem de 83,7, 34,0, 99,9 e 60,1%, respectivamente. Ensaio com os filtros bag mostraram que tal alternativa não é compatível com o tipo de efluente em estudo, tendo apresentado baixas eficiências de remoção. A baixa eficiência deste processo diminuiu, conseqüentemente, a eficiência do processo de integração, onde os bags foram utilizados na filtração após o processo de coagulação/floculação. Apesar de o processo físico-químico com polieletrólito auxiliar de floculação apresentar boa eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos, ainda há padrões que não atingem os níveis exigidos pela legislação

ambiental vigente, como é o caso do alumínio e dos sólidos dissolvidos. Estudos devem ser realizados para identificar qual material inorgânico é responsável pela elevada concentração de sólidos e quais procedimentos devem ser efetuados para remoção eficiente tanto da carga de sólidos quanto da concentração de alumínio. Ensaios de otimização, fundamentados em estudos de planejamento fatorial multivariado, devem ser realizados para a adequação de tais parâmetros bem como para identificar os níveis de reuso.

Palavras-chave: polimento de vidro, água residuária, tratamento físico-químico.

ABSTRACTS

VECCHIA, Paula Dalla. Treatment of wastewater coming from the process of cutting and polishing of glass. 2012. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Pato Branco, 2012.

The increasing demand of water used in the industrial sector has led industries to assess the possibilities of internal reuse. The reuse of water is considered a safe and reliable technique involves less investment in the industrial sector and encourages a practice increasingly accessible. The aim of this work is to propose a system of treatment and reuse of wastewater coming from the process of cutting and polishing of glass of a company's trade glasses, based on optimization of the best efficiency, in order to choose the most appropriate type of treatment for wastewater in question due to their physicochemical characteristics and its treatability. The wastewater comes from a trading company called Glass Industry and Trade Fratta Glasses LTDA, located in the town of Pato Branco, PR. The generation of the wastewater occurs in the stage of cutting and polishing the glass, where significant quantities of water are used for cooling and lubricating the abrasive material used in the process. The results suggest that the physicochemical process based on flocculation/settling the basis of alum and anionic polyelectrolyte is the most efficient for treating the effluent under study have been reached maximum levels of removal of BOD, COD, turbidity and silica of about 83.7, 34.0, 99.9 and 60.1%, respectively. Tests on the filters bag shown that this alternative is not compatible with the type of effluent under study, presenting lower removal efficiencies. The low efficiency of this process decreased, consequently, the efficiency of the integration process, where the bags were used in filtration after coagulation / flocculation. Although the physicochemical process of flocculation with polyelectrolyte help provide good removal efficiency of physical and chemical parameters, there are still patterns that do not reach the levels required by environmental legislation, such as aluminum and dissolved solids. Studies should be conducted to identify inorganic material which is responsible for the high concentration of solids and what procedures should be made for efficient

removal of both solids loading as the aluminum concentration. Essays optimization, based on multivariate factorial design studies should be performed to the suitability of such parameters and to identify the levels of reuse.

Keywords: glass polishing, wastewater, physical-chemical treatment

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Fluxograma de desenvolvimento das atividades..... | 31 |
| Figura 2: Aparelho de jar-test utilizado nos ensaios físico-químicos | 34 |
| Figura 3: Bags tipo polifilamento de nylon (PFNY) utilizados na filtração..... | 36 |
| Figura 4: Caixa coletora e de decantação da água utilizada em reciclo no processo de lapidação e polimento do vidro..... | 38 |
| Figura 5: Caixa coletora acoplada ao equipamento de lapidação e polimento de vidro | 39 |
| Figura 6 – A) efluente tratado com diferentes pHs antes da realização do ensaio de jar-test. B) efluente tratado com diferentes pHs após realização do ensaio..... | 42 |
| Figura 7 – Efluente tratado com pH 7,0 e diferentes concentrações de sulfato de alumínio antes da realização do ensaio (A) e depois do ensaio (B)..... | 44 |
| Figura 8 – Coagulação/precipitação realizada repetindo as consideradas três melhores concentrações do ensaio anterior e aumentando a concentração do coagulante antes da realização do ensaio (A) e depois do ensaio (B)..... | 45 |
| Figura 9 – Efluente tratado com variação na concentração do polieletrólito e valor fixo de concentração de sulfato de alumínio após o ensaio em jar-test. | 48 |
| Figura 10 - Efluente tratado com variação na concentração do coagulante sulfato de alumínio e valor fixo de concentração do polieletrólito após o ensaio em jar-test. | 49 |
| Figura 11 – Ensaio em triplicata após o ensaio de coagulação/precipitação com o polímero auxiliar de coagulação..... | 50 |
| Figura 12 – Efluente obtido na última filtração da sequencia de filtrações realizadas em bags de polifilamento de nylon | 52 |
| Figura 13 – Ensaio de coagulação/precipitação seguido de filtração do efluente em estudo..... | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Categorias de água em função do seu grau de qualidade..... | 17 |
| Tabela 2 – Padrões de lançamento de efluentes (Resolução CONAMA nº 430 de 13 maio de 2011) | 27 |
| Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos utilizados para caracterização da água residuária oriunda do processo de lapidação e polimento de vidro (efluente bruto) e na análise do efluente tratado com diferentes processos..... | 33 |
| Tabela 4 – Consumo médio mensal de água na empresa. | 38 |
| Tabela 5 - Caracterização físico-química do efluente bruto oriundo do processo de lapidação e polimento de vidro comparado com a legislação. | 39 |
| Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio físico-químico para determinação do melhor pH de coagulação/precipitação. | 42 |
| Tabela 7 – Resultados obtidos no ensaio físico-químico para determinação da melhor concentração do coagulante a ser utilizado. | 43 |
| Tabela 8 – Quarto ensaio realizado repetindo as consideradas três melhores concentrações obtidas no ensaio anterior e utilizando maiores concentrações de coagulante..... | 44 |
| Tabela 9 – Valores encontrados para as análises físico-químicas realizadas no efluente tratado com sulfato de alumínio 1 g.L^{-1} e pH 7,0, comparados com a legislação. | 46 |
| Tabela 10 – Resultados obtidos na coagulação/precipitação do efluente com variação da concentração do polieletrólito e concentração fixa de sulfato de alumínio. | 48 |
| Tabela 11 - Resultados obtidos na coagulação/precipitação do efluente com variação da concentração de sulfato de alumínio e concentração fixa do polieletrólito (poliacrilamida aniônica)..... | 49 |
| Tabela 12 – Valores encontrados para as análises físico-químicas realizadas no efluente tratado com $0,3 \text{ g.L}^{-1}$ de sulfato de alumínio e $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de polieletrólito em pH 7,0..... | 50 |
| Tabela 13 - Valores encontrados para as análises físico-químicas realizadas da integração dos processos, utilizando concentração de sulfato de alumínio a 1 g.L^{-1} e pH 7,0 seguido de filtração..... | 53 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 OBJETIVOS | 14 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 14 |
| 3 REFERENCIAL TEÓRICO | 15 |
| 3.1 CONSUMO INDUSTRIAL DE ÁGUA | 15 |
| 3.2 QUALIDADE DA ÁGUA..... | 17 |
| 3.3 REÚSO DA ÁGUA..... | 18 |
| 3.3.1 Reuso industrial de água..... | 19 |
| 3.4 TRATAMENTO DE ÁGUA E SUAS TECNOLOGIAS..... | 20 |
| 3.4.1 Processo físico-químico de coagulação/floculação | 21 |
| 3.4.2 Processos de filtração | 25 |
| 3.5 LEGISLAÇÃO..... | 26 |
| 3.5.1 Legislação do Estado do Paraná..... | 29 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 4.1 ORIGEM DA ÁGUA RESIDUÁRIA | 32 |
| 4.2 PROCESSOS..... | 32 |
| 4.2.1 Caracterização da água residuária..... | 32 |
| 4.2.2 Processo físico-químico | 33 |
| 4.2.3 Processo de filtração em Bag..... | 36 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 38 |
| 5.1 ORIGEM DA ÁGUA RESIDUÁRIA | 38 |
| 5.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUÁRIA..... | 39 |
| 5.3 ESTUDOS DE TRATABILIDADE POR PROCESSO FÍSICO-QUÍMICO | 41 |
| 5.3.1 Seleção do pH..... | 41 |
| 5.3.2 Seleção da concentração do coagulante ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$)..... | 43 |
| 5.3.3 Seleção da concentração do polieletrólito (poliacrilamida aniônica) e ajuste da concentração de sulfato de alumínio..... | 47 |
| 5.4 ESTUDOS DE TRATABILIDADE POR PROCESSO DE FILTRAÇÃO EM BAGS | 51 |
| 5.5 ESTUDOS DE INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS: FÍSICO-QUÍMICO E FILTRAÇÃO EM BAGS | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 5.6 PROTOCOLO DE TRATAMENTO | 54 |
| 5.6.1 Procedimento operacional para tratamento da água residuária | 55 |
| CONCLUSÕES | 57 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 58 |
| REFERÊNCIAS | 59 |

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de suma importância para a sobrevivência humana, animal e vegetal na terra. Grande parte das atividades desenvolvidas seja no setor industrial, econômico, doméstico ou agroindustrial, não seriam possíveis de realização sem o uso desse recurso. Além de ser vital para a sobrevivência da vida no planeta, pode ser utilizada para transporte de pessoas e mercadorias, geração de energia, processos industriais em diversos setores, recreação, paisagismo, entre muitos outros.

Apenas uma pequena parcela da água existente na superfície do planeta terra é água doce e, somente esta, pode ser utilizada diretamente para o consumo humano e para o desenvolvimento das principais atividades econômicas e industriais. Hoje, além da pouca disponibilidade, a água está se tornando cada vez mais escassa devido a sua grande demanda, a qual é influenciada pelo acelerado crescimento populacional.

As indústrias consomem cerca de 22% do total da água doce disponível e utilizam, em sua maioria, água potável. Dependendo do ramo que a indústria segue e das tecnologias adotadas, a água resultante dos processos industriais pode ser acompanhada de grandes quantidades de resíduos tóxicos que, muitas vezes, são lançados diretamente no ambiente sem nenhum controle.

Por muitos anos, a água foi considerada um bem inesgotável, não precisando de nenhuma forma de conservação, proteção ou tratamento. Com o desenvolvimento industrial, houve um acelerado crescimento populacional e, áreas antes desocupadas, passaram a ser habitadas, aumentando assim, o fornecimento de água. Frente a esse crescimento da população, maior número de bens passou a ser produzido, gerando assim, maior quantidade de resíduos e, esses, eram lançados diretamente no ambiente sem que houvesse nenhum controle sobre o consumo e nem sobre a poluição que esses resíduos causavam (SCHREIER et al., 2001).

A água, uma vez poluída, pode ser recuperada e reutilizada. A crescente demanda da água utilizada no setor industrial tem levado as indústrias a avaliar as possibilidades internas de reúso. Os níveis de tratamentos recomendados, os critérios de segurança a serem adotados e os custos de capital, operação e

manutenção, serão as medidas estabelecidas a partir da qualidade da água que será utilizada e a forma de reúso empregado (HESPANHOL, 2003).

Há processos de tratamento que removem ou reduzem determinados constituintes da água bruta. As principais condições a serem utilizadas para a escolha do processo dependem da natureza da água bruta e da qualidade desejada para a água tratada, sendo que, a seleção final do processo deve ser baseada na segurança deste, na facilidade de construção, na existência de equipamentos adequados, facilidade de operação e manutenção e custos de operação e manutenção.

O reúso da água, além de diminuir o desperdício, reduz a emissão de poluentes industriais nos corpos hídricos. Porém, é necessário realizar um estudo de tratabilidade do efluente para se estabelecer um sistema de tratamento que possa produzir água com qualidade compatível com o processo industrial.

Baseando-se nesse contexto, reutilizar a água em um processo industrial é de suma importância, pois além de contribuir para a preservação ambiental, diminui os gastos econômicos da empresa. A água reutilizada pode ser usada nos processos de produção e em outros processos que não demandem água de excelente qualidade, uma vez que esta não possa ser utilizada para consumo humano.

Para o desenvolvimento deste projeto, utilizou-se água residuária proveniente de uma empresa de comércio de vidros denominada Indústria e Comércio de Vidros Fratta LTDA, localizada na cidade de Pato Branco, Paraná. A geração da água residuária se dá na etapa de lapidação e polimento do vidro, onde significativas quantidades de água são utilizadas para refrigeração e lubrificação do material abrasivo utilizado no processo. Esta água não atende os limites permitidos para o lançamento de efluentes dispostos na legislação ambiental vigente, sendo necessário tratá-la, viabilizando seu reúso no processo industrial e seu lançamento. Diante disso, o objetivo desse trabalho é propor um protocolo de tratamento e/ou reúso da água residuária, baseado na otimização do processo de melhor eficiência, visando à escolha do tipo de tratamento mais adequado para a água residuária em questão em função de suas características físico-químicas e de sua tratabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Proposta de sistema de tratamento e reúso de água residuária oriunda do processo de lapidação e polimento de vidro de uma empresa de comercio de vidros.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização do efluente industrial;
- Estudos de tratabilidade do efluente na modalidade filtração em bags;
- Estudos de tratabilidade do efluente na modalidade processo físico-químico;
- Estudos de otimização do processo de melhor eficiência;
- Elaboração de um protocolo de tratamento segundo o processo de melhor eficiência.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A água é uma substância vital presente na natureza, constitui parte de todas as matérias do ambiente natural ou antrópico. É essencial para o consumo humano e para o desenvolvimento de atividades industriais e agropecuárias, caracterizando-se como bem de importância global, responsável por aspectos ambientais, financeiros, econômicos, sociais e de mercado (TELLES et al., 2010).

Com o surgimento de problemas relacionados à escassez e poluição de água, principalmente nos grandes centros urbanos, um maior interesse por parte de vários setores econômicos, pelas atividades nas quais a água é utilizada, começa a surgir (FIESP, 2005).

Depois que os governos dos países se atentaram ao fato de que a água não é mais um bem inesgotável e que era necessário fazer o gerenciamento dos recursos hídricos através de legislações, procurou-se limitar a quantidade de poluentes lançados pelas indústrias, obrigando as mesmas a tratarem seus efluentes antes de serem lançados nos corpos d'água. Porém, com o aumento no consumo de água e uma possível escassez da mesma, o preço para o consumidor final, principalmente para as indústrias, foi aumentando continuamente (SCHREIER et al., 2001).

Conforme a intenção de uso, as características de qualidade da água podem variar, sendo, para isto, fixado um padrão mínimo relativo à sua aplicação. O consumo de água por atividade distingue três áreas: a agricultura, considerada a mais dispendiosa, seguida pela indústria e finalizando com as atividades urbano-domésticas. Porém, os incentivos culturais, econômicos e políticos, que vem apoiado a aplicação de tecnologias sustentáveis, vem proporcionado alterações significativas na demanda de água nesses setores (TELLES et al., 2010).

3.1 CONSUMO INDUSTRIAL DE ÁGUA

Grande parte do consumo total de água doce, é direcionada às indústrias que, em função de diferentes tecnologias e atividades desenvolvidas, possuem uma ampla gama de usos, como por exemplo, matéria-prima, reagente, solvente,

lavagens de gases e sólidos, veículo, transmissão de calor, agente de resfriamento, fonte de energia, entre outros (TELLES et al., 2010).

O porte da indústria, o qual se relaciona com sua capacidade de produção, irá definir qual a necessidade de água para uso em cada setor. A quantidade e a qualidade da água necessária para o desenvolvimento das atividades industriais dependem de vários fatores como: ramo de atividade; capacidade de produção; condições climáticas da região; disponibilidade; método de produção; idade da instalação; práticas operacionais; cultura da empresa e da comunidade local (MIERZWA, 2002).

Para o processo industrial, além de água potável, uma indústria se abastece de outros tipos de água, com diferentes níveis de qualidades. Os níveis de qualidade são definidos em função das características físicas, químicas e biológicas que a água apresenta e dependendo do tipo de impureza presente nesta água, é necessário que se faça algumas modificações de suas propriedades e qualidade para ser utilizada em outro setor (TELLES et al., 2010; MIERZWA, 2002).

Segundo Maron (2006), “o consumo de água na indústria pode ser diferente em razão da tecnologia aplicada na produção”. Indústrias modernas, as quais utilizam tecnologias avançadas e métodos de produção, a água e outros recursos naturais são utilizados da melhor maneira possível. Porém, em indústrias mais antigas, com tecnologias ultrapassadas, ocorrem desgaste de equipamentos e de componentes, podendo ocasionar paradas constantes para manutenção e perdas em função de vazamentos.

Dependendo da aplicação a que se destina e de seu grau de qualidade, a água pode ser classificada em quatro categorias, conforme apresenta a tabela 1.

A poluição ambiental acontece por perdas de energia, matérias-primas e, muitas vezes, por ineficiência dos processos industriais. É de suma importância que a produção industrial seja compatível com o ambiente que nos cerca. A poluição pelos efluentes industriais pode ser controlada utilizando processos mais modernos e otimizados, reduzindo o consumo de água, fazendo a reutilização desta e evitando o lançamento de efluentes sem tratamento nas redes coletoras ou diretamente no ambiente (GIORDANO, 2011).

Tabela 1 - Categorias de água em função do seu grau de qualidade

| Grau de qualidade | Parâmetros | | | |
|--|-------------------|----------|----------|----------------------|
| | SDT* ^a | DQO* | SST* | Dureza* ^b |
| TIPO I – Água Ultra Pura | < 10 | < 1 | 0 | 0 |
| TIPO II – Água de Processo de Alta Qualidade | 10 - 60 | 0 – 10 | 0 | < 30 |
| TIPO III – Água Tratada | 20 – 60 | 0 – 10 | 0 – 10 | 30 – 75 |
| TIPO IV – Água Bruta ou Reciclada | 60 - 800 | 10 – 150 | 10 – 100 | X |

* Valores apresentados em mg.L⁻¹

a - Valores baseados nos dados fornecidos pela ANEEL

b - Valores baseados nos dados fornecidos pela ANEEL e pela classificação da água em função da dureza

Fonte: Mierzwa et al., 2005, p. 35.

3.2 QUALIDADE DA ÁGUA

Segundo Telles et al. (2010), quando a qualidade de um produto é definida, entende-se que esteja dentro de um conceito normativo, aprovado para um determinado fim e seja capaz de satisfazer uma necessidade. O controle de qualidade objetiva o limite aceitável de impureza, em conformidade com o produto em uma determinada aplicação. É necessário ainda que a relação qualidade/aplicação contenha o conceito de sustentabilidade, considerando sua viabilização técnica, econômica, política e ambiental.

Para avaliar a qualidade de uma água para uso humano ou industrial, seja ela tratada ou *in natura*, é utilizado diversos parâmetros físicos, químicos, bacteriológicos e indicativos de contaminação orgânica e biológica. Se essas características estiverem dentro de certos padrões, viabilizam determinados usos (RICHTER, 2009).

Em geral, os parâmetros físicos englobam cor, turbidez, sólidos, temperatura, sabor, odor e condutividade. As características químicas envolvem, principalmente, pH, alcalinidade, acidez, dureza, cloretos, sulfatos, fosfatos, carbono orgânico total, nitrato, nitrito, amônia, oxigênio dissolvido, DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio), metais e produtos farmacêuticos. Entre as características hidrobiológicas estão as bactérias, algas e protozoários (DI BERNARDO et al., 2008).

A água apresenta propriedades que favorecem ou dificultam sua aplicação na área industrial. Entre essas propriedades estão a densidade, temperatura, pressão, condutividade elétrica e térmica e viscosidade. De acordo com os processos utilizados pelas indústrias, devem ser especificadas as correções ou manutenções da qualidade da água, considerando a relação custo/benefício do produto final (TELLES et al., 2010).

3.3 REÚSO DA ÁGUA

O conceito de reúso da água, embora amplamente discutido na atualidade, é muito antigo. Em todo Brasil, a prática de conservação e reúso de água vem sendo desenvolvida em grande escala. Esta prática consiste, basicamente, na utilização de fontes alternativas de água e na redução dos volumes de água captados por meio da otimização do uso (FIESP, 2005).

A necessidade de reduzir o consumo e o desperdício de água tem forçado o setor industrial a alterar técnicas e processos que envolvem o grande consumo desta, passando a utilizar efluentes tratados e água de qualidade inferior em suas instalações (OENNING et al., 2007).

O reúso da água é considerada uma técnica segura e confiável. Esta envolve menores investimentos no setor industrial e incentiva uma prática cada vez mais acessível. De acordo com Telles et al. (2010), “entende-se por reúso o aproveitamento do efluente após uma extensão de seu tratamento, com ou sem investimentos adicionais”.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) atribuiu um dos conceitos mais antigos sobre reúso da água, definindo reuso direto, indireto e reciclagem. Segundo Oenning et al. (2007),

“o reuso direto é o uso planejado e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquíferos e água potável. O reúso indireto ocorre quando a água já usada, uma ou mais vezes para o uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente a jusante, de forma diluída. E a reciclagem é o reuso da água internamente às instalações

industriais, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição” (OENNING et al., 2007).

Há, também, o reúso de efluente tratados, o qual está sendo muito utilizado pela indústria. Consiste em utilizar o efluente gerado na própria instalação, após ser tratado adequadamente para se obter a qualidade necessária aos usos pré-estabelecidos. Porém, na avaliação do potencial de reúso dos efluentes tratados, é necessário considerar um aumento da concentração de contaminantes, os quais não são eliminados pelas técnicas de tratamento empregadas (SILVA, 2009).

Antes de se implementar a prática de reúso, é necessário realizar essa avaliação de potencial do efluente gerado, da água para as aplicações do reúso e, também, dos padrões de emissão dos efluentes, baseando-se nas características da água disponível para captação. O reúso da água deve ser considerado mais abrangente que o uso racional ou eficiente da água. Este compreende também, o controle de perdas e desperdícios e a minimização da produção de efluentes e do consumo da água (MIERZWA et al., 2005; TELLES et al., 2010). De acordo com Maron (2006),

“reusar o efluente torna-se economicamente e ambientalmente o método mais racional para o gerenciamento integrado da água. A recuperação, reciclagem e reúso de efluentes promove a preservação de recursos naturais e transforma-se em uma opção atrativa para conservar e preservar as fontes de águas disponíveis” (MARON, 2006).

3.3.1 Reuso industrial de água

Segundo Telles et al. (2010), há três fatores que comandam as pesquisas para a redução tanto do consumo da água bruta quanto da descarga de efluentes aquosos pela indústria, são eles: proteção ambiental, o custos crescentes dos tratamentos e a crescente indisponibilidade de água. O reúso da água no setor industrial tem como principais benefícios a maximização da eficiência na utilização dos recursos hídricos, boa imagem ambiental da empresa, garantia na qualidade da água tratada, viabilização de um sistema “fechado” com um descarte mínimo de

efluentes e o credenciamento da empresa para futuros processos de certificação ambiental - ISO 14000.

A alternativa adotada para a redução nos custos de produção foi o tratamento da água para o reúso. A água proveniente do processo produtivo passou a ser tratada e reutilizada. Porém, a implantação do reúso de água na indústria não substitui a necessidade total de água, pois há limitações técnicas, operacionais, econômicas e ambientais que restringem a utilização da água em sistemas fechados. Por isso, é necessário avaliar o potencial de reúso considerando as características da água disponível para captação, o efluente gerado, água de reúso e padrões de emissão de efluentes (SCHREIER et al., 2001; SILVA, 2009).

3.4 TRATAMENTO DE ÁGUA E SUAS TECNOLOGIAS

O tratamento de água consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias, aos menores custos de implantação, operação e manutenção, gerando o menor impacto ambiental às áreas circunvizinhadas. As tecnologias de tratamento disponíveis visam a conciliar estes objetivos e abarcam um conjunto de processos e operações físico-químicos (LIBÂNIO, 2010).

A obtenção de água em um bom grau de qualidade, só é possível com a aplicação de técnicas de tratamento específicas que, para melhor efeito, devem ser combinadas entre si. Para desenvolver um sistema de tratamento que atenda as necessidades de cada processo, é importante conhecer as capacidades e limitações de cada técnica e, a escolha da tecnologia mais adequada para o tratamento de água ou de um determinado efluente, depende muito das características dos contaminantes que deverão ser eliminados ou minimizados (MIERZWA et al., 2005).

Há muitas técnicas utilizadas para o tratamento de água. Abrandamento, troca iônica, separação por membranas (osmose reversa) e o sistema convencional de tratamento, o qual é utilizado para tratar a água no sistema de abastecimento público, são exemplos de técnicas para o tratamento de água.

O sistema convencional de tratamento tem como objetivo adequar as características físicas, químicas e biológicas da água, padrões higiênicos, estéticos e econômicos, e em geral, é o primeiro procedimento adotado para o tratamento de

água para uso industrial. Esse sistema é composto por unidades de tratamento que compreendem aeração ou pré-cloração; coagulação, floculação e sedimentação; filtração; desinfecção e controle da corrosão (MIERZWA et al., 2005).

3.4.1 Processo físico-químico de coagulação/floculação

A coagulação e a floculação exercem um papel importante na cadeia de processos de tratamento de água, principalmente na preparação da decantação ou flotação e na filtração que segue (RICHTER, 2009).

Segundo Di Bernardo et al. (2008), a coagulação é um processo que consiste na desestabilização das partículas coloidais ou neutralização das moléculas de substâncias húmicas, através de dois fenômenos: o primeiro, essencialmente químico, onde ocorrem as reações do coagulante com a água e a formação de espécies hidrolisadas com carga positiva ou os precipitados do metal do coagulante usado. O segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte de espécies hidrolisadas ou dos precipitados para que haja o contato com as impurezas presentes na água, de maneira que formem aglomerados maiores, os quais podem ser removidos posteriormente.

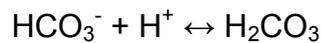
Depois de efetuada a coagulação, passa-se para a etapa de floculação, onde há formação de flocos sedimentáveis. O floculante reúne partículas em uma rede, formando pontes de ligação entre estas, associando as partículas individuais em aglomerados. A floculação é ativada por uma mistura lenta que associa os flocos. Agitação intensa pode desagregá-los, rompendo as baixas energias de aglutinação entre as partículas. Pode acontecer de o floco formado não ser suficientemente grande para sedimentar com rapidez pretendida. Assim, é conveniente utilizar produtos coadjuvantes da floculação, denominados agentes floculantes (TRINDADE et al., 2006).

Os coagulantes mais utilizados englobam sais de alumínio e ferro. O mais usual é o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) que, em solução, é um ácido. Em águas de baixa alcalinidade e muita cor, pode-se empregar o aluminato de sódio ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$). Os coagulantes férricos mais empregados são o sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) e o cloreto férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (RICHTER, 2009, p. 96).

As reações que ocorrem com a adição do sulfato de alumínio à água, podem ser simplificadas da seguinte maneira:



Na presença de suficiente alcalinidade natural,

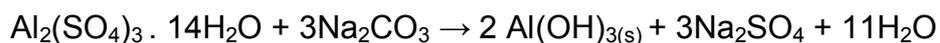


Se a alcalinidade natural é insuficiente, óxido de cálcio (CaO), hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) ou qualquer outro alcalinizante pode ser adicionado.

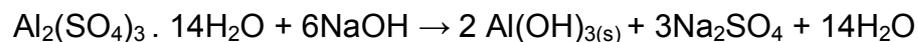
Hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂):



Carbonato de sódio (Na₂CO₃):



Hidróxido de sódio (NaOH):



A solubilidade do sulfato de alumínio se dá em função do pH, sendo mais baixa em pH entre 5 e 7. Fora desta faixa, é impraticável a coagulação com sulfato de alumínio. Nas reações apresentadas, o produto final é o hidróxido de alumínio (Al(OH)₃). Antes da formação deste precipitado, ocorrem reações de hidrólise e de polimerização, complexas e instantâneas. Os produtos de hidrólise combinam-se formando uma série de espécies polinucleares de alumínio, incluindo Al₆(OH)₁₅⁺³, Al₇(OH)₁₇⁺⁴ ..., Al₁₃(OH)₃₄⁺⁵. São essas espécies, e não o íon de alumínio, que promovem a desestabilização dos coloides (RICHTER, 2009, p. 96).

No controle da coagulação, as características físico-químicas da água bruta incluem a concentração de coloides (avaliada pela turbidez e/ou pela cor), o pH e a alcalinidade, principalmente quando a coagulação é realizada por sais de alumínio e ferro. De acordo com as características da água bruta, pode-se ocorrer:

- *Alta concentração de coloides e baixa alcalinidade:* condição fácil de tratar, basta determinar a dosagem ótima de coagulante. A coagulação ótima se dá a baixos valores de pH (entre 4,5 e 6,0, dependendo do coagulante).
- *Alta concentração de coloides e alta alcalinidade:* é necessária uma alta dose de coagulante e a coagulação se dará a um pH próximo do neutro.
- *Baixa concentração de coloides e baixa alcalinidade:* condição fácil de se tratar. Sem a adição de um alcalinizante, o pH poderá tomar valores mais baixos que o ótimo de coagulação, impedindo ou dificultando a mesma. Essa é a situação em que geralmente é viável a filtração direta. Para a decantação, poderá ser necessária a adição de um auxiliar de coagulação com o objetivo de aumentar a velocidade de floculação e dar peso aos flocos. No caso de polieletrólitos, este geralmente será não aniônico.
- *Baixa concentração de coloides e alta alcalinidade:* a coagulação será facilmente realizada a uma dosagem relativamente alta de coagulante, com pH em torno de 7,0. Poderá ser conveniente a adição de um auxiliar de coagulação (RICHTER, 2009, p. 102).

Coagulantes orgânicos podem ser adicionados como auxiliares de floculação ou como coagulantes primários, promovem o crescimento dos flocos e incrementam a velocidade de sedimentação destes. Estes coagulantes são denominados polieletrólitos, polímeros de alto peso molecular os quais contém grupos adsorventes, que formam ligações entre partículas ou flocos com carga. Grandes flocos (0,3 a 1 mm) são criados quando pequenas dosagens de polieletrólitos (1 a 5 mg.L⁻¹) são adicionadas conjuntamente com sulfato de alumínio ou cloreto férrico (LAMBDA, 2012).

Existem três tipos de polieletrólitos:

- **Catiônicos:** os quais absorvem coloides ou flocos negativos;
- **Aniônicos:** os quais substituem os grupos aniônicos em uma partícula coloidal e permitem a ligação de hidrogênio entre o coloide e o polímero;

- **Não iônico:** absorve e forma flocos por ligações de hidrogênio entre as superfícies sólidas e os grupos polares no polímero (LAMBDA, 2012).

Dentre os polieletrólitos auxiliares de floculação, pode-se citar a acrilamida e a poliacrilamida. A acrilamida é um monômero cristalino e relativamente estável, solúvel em água e em muitos solventes orgânicos. É uma molécula polifuncional que contém uma dupla ligação carbono-carbono vinílico e um grupo amida. A poliacrilamida (PAM) é um floculante polimérico muito utilizado, pois possibilita a síntese de poliacrilamidas (PAMs) com várias funcionalidades (cargas positivas, neutras ou negativas). Esta característica da PAM produz um bom desempenho de ajustes a custos relativamente baixos (VIEIRA, 2009).

O desempenho da floculação de floculantes recai principalmente sobre o tipo de floculante e seu peso molecular, o conteúdo e natureza iônica, sobre o conteúdo em suspensão na água residual e o tipo de água residual (VIEIRA, 2009).

A condição apropriada de coagulação, levando em consideração pH, dosagem de coagulante, dosagem de polieletrólito e agitação, pode ser obtida em equipamentos de laboratório como o jar-test.

3.4.1.1 Jar-Test

O teste de jarros (Jar-Test) é, ainda, o método mais empregado e o mais útil para avaliar o processo de coagulação-precipitação e seus efeitos nas etapas sequenciais do tratamento de água (RICHTER, 2009).

Este teste é muito utilizado para determinar as quantidades de coagulantes a serem utilizados e a melhor condição para floculação da água, quando empregado tempo e agitação necessária. Uma vez determinada a dosagem dos coagulantes, verifica-se qual o melhor tempo e gradiente de velocidade para se flocular a água em estudo. Deve-se verificar também, se a floculação obtida fornece uma água que, após a sedimentação, apresentará uma representativa diminuição da turbidez (ROSSIN, 2008).

Para a realização deste ensaio, é necessário conhecer as características da água bruta, como cor, turbidez, alcalinidade, pH e temperatura. O ensaio de coagulação não é um processo muito simples, pois devem ser consideradas algumas variáveis do processo, como a cor e turbidez da água, se a alcalinidade

natural da água é suficiente, se o pH está dentro da faixa de floculação, o tipo de coagulante empregado, entre outros (FUNASA, 2009).

3.4.2 Processos de filtração

A filtração consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais da água, além de microrganismos, que não foram retirados no processo de decantação. É o processo final de remoção de impurezas realizado em uma estação de tratamento de água (ETA). No processo da filtração, os filtros podem ser classificados em filtros lentos ou rápidos. Os filtros lentos são utilizados para águas que apresentam baixa turbidez e promove a purificação da água por meio de uma ação mais biológica do que físico-química. Os filtros rápidos são utilizados para águas que necessitam de um tratamento físico-químico prévio (GALVÃO, 2010).

A filtração é o processo unitário mais importante na cadeia de processos de tratamento de água. Pode ser único, como na filtração lenta, ou apenas precedido pela coágulo-floculação, como na filtração direta. A granulometria de um material filtrante é definida por três parâmetros básicos: tamanho efetivo, coeficiente de uniformidade e porosidade (RICHTER, 2009).

Para o tratamento de água, os sistemas de filtração mais comuns são os que utilizam filtros de areia, de areia antracito ou de areia, antracito e granada. Além do meio filtrante, também fazem parte do sistema a camada de suporte, o sistema de alimentação, o sistema de drenagem e o sistema de contralavagem do filtro, pois a capacidade de retenção de partículas é limitada. À medida que as partículas presentes na água vão sendo retidas, o leito de filtração vai sendo obstruído, aumentando a perda de carga no seu interior e reduzindo sua eficiência. Neste caso, interrompe-se a filtração e inicia-se o processo de lavagem, que consiste na passagem de uma vazão superior de água limpa no sentido inverso ao da operação de filtração (MIERZWA et al., 2005).

Atualmente, o mercado oferece vários tipos de sistemas de filtração, com meios filtrantes descartáveis ou reutilizáveis, como por exemplo, filtros tipo cartucho, filtros com meio granular, filtros a vácuo, filtros prensas e prensas desaguadoras.

Os filtros tipo cartucho são mais adequados para efluentes contendo baixa concentração de sólidos e para vazões não muito elevadas, ao passo que os filtros

com meio granular são indicados para baixa concentração de sólidos e vazões maiores. Os demais sistemas são indicados para correntes com grande concentração de sólidos, como para a secagem de lodos gerados em estações de tratamento de água, esgotos e efluentes, de modo que o volume para a disposição final diminua (MIERZWA et al., 2005).

3.4.2.1 Filtração em Bags

O sistema de filtração por bolsas (conhecido também como filtração em bags) tem uma ampla área de aplicação e são muito utilizados quando há uma grande vazão de líquidos. Apresentam a vantagem de conter na bolsa o resíduo sólido, sendo mais fácil de isolar o elemento filtrado (FILTROS..., 2006).

O produto a ser filtrado é bombeado para o filtro passando por dentro do elemento filtrante tipo bolsa (bag), fazendo com que as partículas sólidas fiquem retidas dentro desta. As bolsas devem trabalhar alojadas dentro de equipamentos metálicos de aço, chamados de vasos de filtração ou carcaças, responsáveis por manter o líquido a ser filtrado dentro de um circuito de bombeamento, geralmente pressurizado, obrigando-o a passar pelo elemento filtrante. O tempo de parada para manutenção diminui e elimina-se a necessidade de uso de produtos para a limpeza do vaso, gerando economia no processo. Hoje, já é possível encontrar bags com eficiência de filtração de até 99,98% para partículas de 2 micra e vazões relativamente altas, quando comparadas com outras tecnologias (DIAS, 2007).

3.5 LEGISLAÇÃO

Devido à grande importância que a água exerce sobre o desenvolvimento de diversas atividades humanas, foi necessário criar normas que disciplinassem a utilização dos recursos hídricos pelos diversos segmentos da sociedade, principalmente pelas indústrias. As legislações têm como objetivo principal, minimizar os problemas de poluição ambiental decorrentes da emissão de poluentes diretamente nos rios (MIERZWA et al., 2005).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou a Resolução nº 357 de 17 de março de 2005, a qual revoga a Resolução CONAMA nº 20/1986, classificando as águas doces, salobras e salinas do Brasil. Esta resolução estabelece os valores máximos dos parâmetros de qualidade para cada classe, regulamenta os procedimentos para o lançamento de efluentes nos corpos d'água e define as concentrações máximas para o lançamento de algumas substâncias, sendo, no total, cerca de setenta parâmetros de qualidade exigidos. É importante o cumprimento dessa resolução, pois, somente conhecendo as características da água que está sendo utilizada, será possível selecionar as tecnologias de tratamento adequadas (BRASIL, 2005).

Em 2011, o COMANA publicou a Resolução nº 430 de 13 de maio, a qual dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementando e alterando a Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. De acordo com a Seção II, art. 16, das condições e padrões de lançamento de efluentes desta resolução, os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedeçam as condições e padrões previstos neste artigo (BRASIL, 2011).

A tabela 2 apresenta os padrões de lançamento de efluentes dispostos na Resolução CONAMA nº 430 de maio de 2011.

Tabela 2 – Padrões de lançamento de efluentes (Resolução CONAMA nº 430 de 13 maio de 2011)

(continua)

| Parâmetros Inorgânicos | Valores Máximos |
|---|---|
| Arsênio total | 0,5 mg.L ⁻¹ As |
| Bário total | 5,0 mg.L ⁻¹ Ba |
| Boro total (não se aplica para o lançamento em águas salinas) | 5,0 mg.L ⁻¹ B |
| Cádmio total | 0,2 mg.L ⁻¹ Cd |
| Chumbo total | 0,5 mg.L ⁻¹ Pb |
| Cianeto total | 1,0 mg.L ⁻¹ CN |
| Cianeto livre (destilável por ácido fracos) | 0,2 mg.L ⁻¹ CN |
| Cobre dissolvido | 1,0 mg.L ⁻¹ Cu |
| Cromo hexavalente | 0,1 mg.L ⁻¹ Cr ⁺⁶ |
| Cromo trivalente | 1,0 mg.L ⁻¹ Cr ⁺³ |
| Estanho total | 4,0 mg.L ⁻¹ Sn |
| Ferro dissolvido | 15,0 mg.L ⁻¹ Fe |
| Fluoreto total | 10,0 mg.L ⁻¹ F |

Tabela 2 – Padrões de lançamento de efluentes (Resolução CONAMA nº 430 de 13 maio de 2011)
(conclusão)

| Parâmetros Inorgânicos | Valores Máximos |
|--|---|
| Manganês dissolvido | 1,0 mg.L ⁻¹ Mn |
| Mercúrio total | 0,01 mg.L ⁻¹ Hg |
| Níquel total | 2,0 mg.L ⁻¹ Ni |
| Nitrogênio amoniacal total | 20,0 mg.L ⁻¹ N |
| Prata total | 0,1 mg.L ⁻¹ Ag |
| Selênio total | 0,3 mg.L ⁻¹ Se |
| Sulfeto | 1,0 mg.L ⁻¹ S |
| Zinco total | 5,0 mg.L ⁻¹ Zn |
| Parâmetros orgânicos | Valores Máximos |
| Benzeno | 1,2 mg.L ⁻¹ |
| Clorofórmio | 1,0 mg.L ⁻¹ |
| Dicloroetano (somatório de 1,1 + 1,2 cis + 1,2 trans) | 1,0 mg.L ⁻¹ |
| Estireno | 0,07 mg.L ⁻¹ |
| Etilbenzeno | 0,84 mg.L ⁻¹ |
| Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina) | 0,5 mg.L ⁻¹ C ₆ H ₅ OH |
| Tetracloroeto de carbono | 1,0 mg.L ⁻¹ |
| Tricloroetano | 1,0 mg.L ⁻¹ |
| Tolueno | 1,2 mg.L ⁻¹ |
| Xileno | 1,6 mg.L ⁻¹ |

Fonte: BRASIL, 2011.

Em 08 de janeiro de 1997, foi sancionada a Lei Federal nº 9433 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH). Para o desenvolvimento de um programa de gerenciamento de águas e efluentes industriais, devem ser observadas as seções III e IV desta lei. Essas seções tratam de questões relacionadas à outorga de direitos de uso dos recursos hídricos (seção III) e à cobrança do uso dos recursos hídricos (seção IV) (BRASIL, 1997).

Com a preocupação do governo brasileiro com o meio ambiente, foi aprovada a Lei nº 9605 de 12 de fevereiro de 1998, denominada Lei de Crimes Ambientais, estabelecendo penas restritivas e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (BRASIL, 1998).

3.5.1 Legislação do Estado do Paraná

O Estado do Paraná possui suas próprias legislações relacionadas à água. A Lei Estadual nº 12726/99 criou o sistema de gerenciamento de recursos hídricos, enquadrando os corpos de água em classes, segundo seus usos predominantes. Criou também a outorga dos direitos pelo uso dos recursos hídricos, instituindo o mecanismo de cobrança (PARANÁ, 1999). É no Decreto Estadual nº 4646/2001 que se podem observar todos os procedimentos para autorização administrativa da utilização dos recursos hídricos (PARANÁ, 2001). De acordo com Galvão (2010),

“empresas que realizam a captação de águas subterrâneas e superficiais e que desejam lançar seus efluentes hídricos em corpos d’água, de domínio estadual, devem solicitar autorização para captação e operação ao órgão competente para esse fim, que atualmente, é o Instituto Paranaense das Águas” (GALVÃO, 2010).

O Conselho Estadual do Meio Ambiente (CEMA), por meio da resolução nº 70/2009, com as alterações da resolução nº 72/2009, a qual dispõe sobre o licenciamento ambiental, estabelece condições, critérios, providências, trâmite administrativo e premissas para o licenciamento ambiental de empreendimentos industriais dentro do estado (PARANÁ, 2009).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho iniciou-se conhecendo a empresa, o processo de laminação e polimento de vidro, como ocorre a geração da água residuária no processo e qual é o destino desta água após a limpeza da caixa de decantação. Em seguida, efetuou-se a coleta do efluente o qual foi submetido à caracterização físico-química. Após a caracterização, iniciaram-se os estudos de tratabilidade do efluente. Estes estudos compreenderam a tratabilidade por processo físico-químico de coagulação/floculação com e sem polímero coadjuvante, a tratabilidade por filtração em bags e a interação entre os dois processos. Depois de otimizados os processos de tratamento, o tratado foi analisado e os valores obtidos nas análises foram comparados com os parâmetros dispostos na legislação vigente.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Química Analítica do curso de Bacharelado em Química Industrial e as análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório Agroindustrial de Água e Alimentos – LAQUA, ambos na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco.

Na figura 1 pode-se observar as etapas do desenvolvimento do projeto através de um fluxograma.

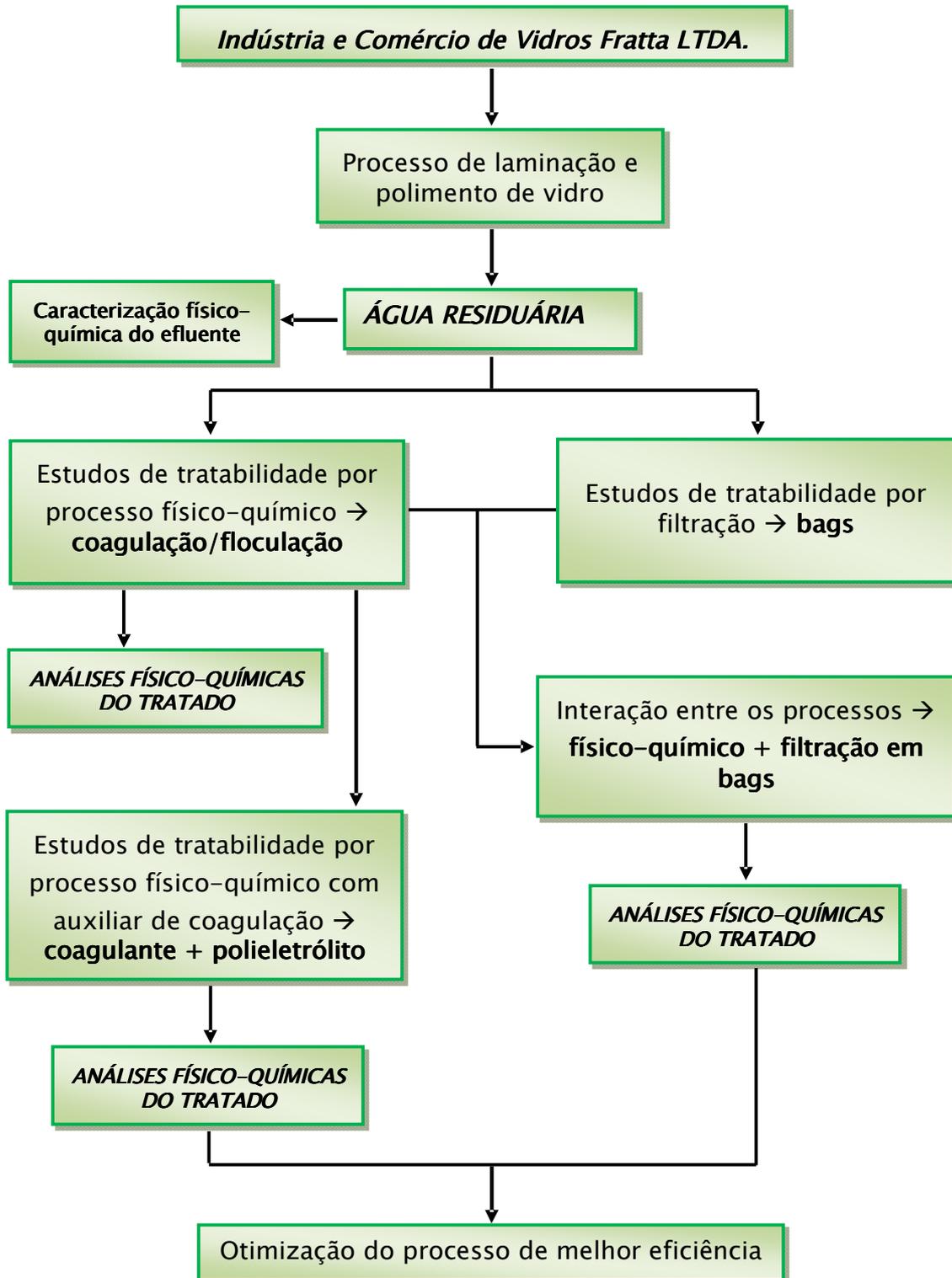


Figura 1 – Fluxograma de desenvolvimento das atividades

4.1 ORIGEM DA ÁGUA RESIDUÁRIA

A água residuária, a qual foi utilizada para o desenvolvimento do projeto, é proveniente de uma empresa de comércio de vidros localizada na cidade de Pato Branco, Paraná, denominada *Indústria e Comércio de Vidros Fratta LTDA*. Esta empresa comercializa vidros laminados, insulados ou duplos, curvos, blindados e portas automáticas. Hoje, atende a construção civil de forma geral, fábricas de cabines para máquinas agrícolas, empresas de refrigeração, fábricas de móveis, vidraçarias, etc.

A geração da água residuária se dá na etapa de lapidação e polimento do vidro, onde significativas quantidades de água são utilizadas para refrigeração e lubrificação do material abrasivo utilizado no processo. Embora a água seja utilizada em processo de reciclo, há necessidade de substituí-la em função de sua saturação com material vítreo particulado. A água substituída é lançada diretamente no solo para infiltração superficial ou em rede coletora, o que se caracteriza como uma destinação inadequada, uma vez que suas características podem não estar de acordo com os limites previstos pela legislação ambiental vigente (CONAMA 430/2011). A água utilizada no processo é fornecida pela Companhia de Água e Saneamento do Paraná – SANEPAR.

O efluente foi coletado no mês de fevereiro, época em que, segundo empresário, compreende os maiores picos de produção.

4.2 PROCESSOS

4.2.1 Caracterização da água residuária

Para a caracterização da água residuária, utilizou-se os métodos oficiais constantes no Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater (2005).

Os parâmetros avaliados na caracterização físico-química do efluente bruto e na análise do efluente tratado com diferentes processos, bem como os métodos utilizados nas análises, estão dispostos na tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos utilizados para caracterização da água residuária oriunda do processo de lapidação e polimento de vidro (efluente bruto) e na análise do efluente tratado com diferentes processos.

| Parâmetro | Finalidade | Método* |
|--|-------------------|---|
| pH | A; B | 4500-H ⁺ (método potenciométrico) |
| DQO¹ | A; B | 5220 D (método colorimétrico) |
| DBO₅dias² | A; B | 5210 B (teste DBO 5 dias) |
| Óleos e graxas | A | 5520 D (método de extração em Soxhlet) |
| Sólidos Totais | A; B | 2540 B (método gravimétrico) |
| Sólidos Sedimentáveis | A; B | 2540 F (sedimentação) |
| Sólidos Suspensos Totais | A; B | 2540 D (método gravimétrico) |
| Sólidos Dissolvidos Totais | A; B | 2540 C (método gravimétrico) |
| Fósforo | A | 4500-P C (método colorimétrico) |
| Alcalinidade Total | A | 2320 B (método titulométrico) |
| Turbidez | A; B | 2130 B (método nefelométrico) |
| Cloretos | A | 4500-Cl ⁻ B (titulometria com AgNO ₃) |
| Dureza Total | A | 2340 C (titulometria com EDTA) |
| Ferro | A; B | 3111 B (absorção atômica) |
| Sílica | A; B | 4500-SiO ₂ C (método milibdosilicato) |
| Sulfato | A; B | 4500- SO ₄ ²⁻ E (método turbidimétrico) |
| Cálcio | A | 3500-Ca B (titulometria com EDTA) |
| Magnésio | A | 3500-Mg B (método titulométrico) |
| Alumínio | A; B | 3500-Al B (método ericromocianina) |
| Sódio | A; B | 3500-Na B (fotômetro de chama) |
| Potássio | A; B | 3500-K B (fotômetro de chama) |
| Lítio | A; B | 3500-Li B (fotômetro de chama) |
| Cobre | A; B | 3111 B (absorção atômica) |
| Zinco | A; B | 3500-Zn B (absorção atômica) |
| Manganês | A; B | 3111 B (absorção atômica) |

A – Caracterização da água residuária; B – Análise do efluente tratado por diferentes processos; ¹DQO – Demanda Química de Oxigênio; ²DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; * Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater (2005).

4.2.2 Processo físico-químico

O processo de tratamento físico-químico foi realizado em aparelho de jar-test (Figura 2) com ensaios convencionais utilizando a metodologia descrita por Richter (2009, p. 310-311) com algumas modificações, sendo, a finalidade do ensaio, a

determinação das doses mais efetivas dos produtos utilizados para o tratamento da água residuária em questão.



Figura 2: Aparelho de jar-test utilizado nos ensaios físico-químicos

4.2.2.1 Reagentes e Equipamentos

- Aparelho de jar-test com seis jarros, modelo JT – 203, 50 a 100 rpm
- Seis béqueres de 600 mL
- Solução padrão de sulfato de alumínio a 10%
- Ácido Clorídrico P.A (Porcentagem Absoluta)
- Hidróxido de sódio 1 mol.L⁻¹
- Solução padrão de poliacrilamida aniônica a 0,1%
- Equipamentos para determinação de pH (pHmetro) e turbidez (tubidímetro).

4.2.2.2 Procedimento experimental

Após realizada a caracterização do efluente, verificando pH, turbidez e alcalinidade total da água bruta, que são as principais parâmetros a serem avaliados para a realização da coagulação/precipitação, iniciou-se o processo físico-químico de tratamento da água, utilizando como coagulante o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$).

Nesse processo foram realizados seis ensaios para se determinar as dosagens corretas dos reagentes utilizados, uma coagulação satisfatória e um bom resultado no tratamento do efluente.

No geral, procedeu-se da seguinte maneira:

1. Ajustou-se o pH da água bruta em um valor ótimo para floculação utilizando ácido clorídrico P.A.
2. Colocou-se 600 mL da água bruta em cada um dos seis béqueres e levou-os ao aparelho de agitação na velocidade máxima (100 rpm).
3. Adicionaram-se simultaneamente nos béqueres as doses de sulfato de alumínio necessárias para a coagulação do efluente.
4. Após 2 minutos de agitação rápida, reduziu-se a rotação do aparelho para 50 rpm e deixou-se agitar por 20 minutos.
5. Observou-se e anotou-se o tempo de aparecimento de flocos em cada um dos jarros e aparência, tamanho e quantidade de floco no final do período de agitação.
6. Terminada a agitação, deixou-se decantar por 20 minutos, determinando, posteriormente, a turbidez e pH do sobrenadante da água decantada.
7. Mediu-se o volume de lodo formado.
8. Acertou-se o pH final do efluente com hidróxido de sódio de acordo os padrões exigidos pela legislação para lançamento de efluente industrial (BRASIL, 2011).

No primeiro ensaio realizado, não foi efetuado o ajuste de pH com ácido clorídrico, utilizando para coagulação o próprio pH do efluente. As concentrações de sulfato de alumínio utilizadas foram: 0,67 g.L⁻¹; 0,50 g.L⁻¹; 0,33 g.L⁻¹; 0,25 g.L⁻¹; 0,17 g.L⁻¹ e 0,08 g.L⁻¹.

No segundo ensaio, utilizou-se concentração de 2 g.L⁻¹ de sulfato de alumínio nos seis béqueres e variou-se o pH, utilizando valores de 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5 e 8,0 nos béqueres 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente, para se determinar o melhor pH de coagulação/precipitação.

No terceiro e quarto ensaio, utilizou-se o melhor pH encontrado no ensaio anterior e determinou-se a melhor concentração de sulfato de alumínio a ser

utilizada no tratamento do efluente. As concentrações de sulfato de alumínio variaram de $0,20 \text{ g.L}^{-1}$ a $3,5 \text{ g.L}^{-1}$.

Nos dois últimos ensaios realizados, utilizou-se poliacrilamida aniônica como auxiliar de coagulação, sendo colocada no efluente logo após a adição do sulfato de alumínio. O polímero, como coadjuvante de coagulação, é empregado para se determinar a quantidade mínima de sulfato de alumínio a ser utilizado na coagulação do efluente. Nesses dois últimos ensaios, determinaram-se as menores concentrações de polímero e floculante necessários para se obter um ótima coagulação.

Análises de pH, DQO, DBO, sólidos, sílica, turbidez, sulfato, alumínio e minerais foram realizadas depois de determinadas as melhores condições para a coagulação/precipitação do efluente em questão.

4.2.3 Processo de filtração em Bag

O processo de filtração foi realizado em um sistema que utiliza um elemento filtrante em forma de bolsa (bag). O sistema de filtração consiste em três partes: carcaça, cesto (suporte) e bolsa filtrante. Os bags utilizados foram de monofilamento de nylon tipo PFNY com aro em aço carbono galvanizado e retenção de 30, 100, 200 e 500 micra (Figura 3).



Figura 3: Bags tipo polifilamento de nylon (PFNY) utilizados na filtração

Em função da viabilidade, fez-se a filtração com auxílio de um suporte universal, não sendo montada a carcaça com o cesto.

Filtrou-se cinco litros do efluente passando, sequencialmente, no filtro de maior porosidade seguindo para os de menor porosidade. A água a ser filtrada foi introduzida na parte superior da bolsa filtrante presa no suporte. O líquido fluiu de dentro para fora do bag e, os contaminantes retidos, permaneceram na parte interna da bolsa.

Posteriormente, efetuou-se um ensaio de coagulação/precipitação seguido de filtração no elemento filtrante de menor porosidade (30 micra), utilizando melhor pH e a melhor dose de coagulante anteriormente estudada. Este tratado também foi analisado.

Para estudo do efluente tratado com diferentes processos, foram realizadas análises físico-químicas utilizando os métodos oficiais constantes no Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater (2005) (Tabela 3).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ORIGEM DA ÁGUA RESIDUÁRIA

Na *Indústria e Comércio de Vidros Fratta LTDA* a produção atinge, mensalmente, cerca de 1000 metros cúbicos de vidro laminado, onde os maiores picos de produção estão entre os meses de agosto a fevereiro. O uso da água em reciclo no processo de produção justifica o baixo consumo de água na empresa, não ultrapassando 10 metros cúbicos por mês, conforme mostra a tabela 4.

Tabela 4 – Consumo médio mensal de água na empresa.

| Mês | Jan | fev | Mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Média de consumo mensal (m ³) | 10 | 10 | 9 | 8 | 5 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 |

As figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, a caixa coletora da água utilizada em reciclo no processo de lapidação e polimento do vidro e a caixa coletora acoplada ao equipamento de lapidação e polimento. Esta caixa comporta um volume de, aproximadamente, 150 litros.



Figura 4: Caixa coletora e de decantação da água utilizada em reciclo no processo de lapidação e polimento do vidro



Figura 5: Caixa coletora acoplada ao equipamento de lapidação e polimento de vidro

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUÁRIA

A tabela 5 apresenta os parâmetros físico-químicos avaliados no efluente bruto oriundo do processo de lapidação e polimento de vidro e seus respectivos valores comparados com os limites previstos pela Resolução CONAMA 430, de maio de 2011, para lançamento de efluente.

Tabela 5 - Caracterização físico-química do efluente bruto oriundo do processo de lapidação e polimento de vidro comparado com a legislação.

(continua)

| Parâmetro | Resultado | Legislação* |
|---|-----------|----------------|
| pH | 10,1 | 5 – 9 |
| DQO ¹ (mg.L ⁻¹ O ₂) | 216,7 | – |
| DBO _{5 dias} ² (mg.L ⁻¹ O ₂) | 69,25 | Remoção de 60% |
| Óleos e Graxas (mg.L ⁻¹) | 2,3 | 20,0 |
| Sólidos Totais (mg.L ⁻¹) | 1771,0 | – |
| Sólidos Sedimentáveis (mg.L ⁻¹) | 0,7 | 1,00 |
| Sólidos Dissolvidos Totais (mg.L ⁻¹) | 1068,0 | 500,0 |
| Sólidos Suspensos Totais (mg.L ⁻¹) | 741,0 | – |
| Fósforo (mg.L ⁻¹ P) | 0,12 | 0,15 |
| Sílica (mg.L ⁻¹ Si) | 200,3 | – |
| Turbidez (uT ³) | 1747,0 | 100,0 |
| Alcalinidade Total (mg.L ⁻¹ CaCO ₃) | 412,0 | – |
| Dureza Total (mg.L ⁻¹ CaCO ₃) | 62,0 | – |

Tabela 5 - Caracterização físico-química do efluente bruto oriundo do processo de lapidação e polimento de vidro comparado com a legislação.

(conclusão)

| Parâmetro | Resultado | Legislação* |
|--|-----------|-------------|
| Cloretos (mg.L ⁻¹ Cl ⁻) | 66,0 | 250,0 |
| Cálcio (mg.L ⁻¹ Ca) | 16,6 | – |
| Magnésio (mg.L ⁻¹ Mg) | 3,16 | – |
| Sulfato (mg.L ⁻¹ SO ₄) | 41,77 | 250,0 |
| Alumínio (mg.L ⁻¹ Al) | < 0,025 | 0,20 |
| Sódio (mg.L ⁻¹ Na) | 64,0 | – |
| Potássio (mg.L ⁻¹ K) | 3,0 | – |
| Lítio (mg.L ⁻¹ Li) | 65,0 | 2,50 |
| Cobre (mg.L ⁻¹ Cu) | 0,09 | 1,00 |
| Ferro (mg.L ⁻¹ Fe) | 0,29 | 15,0 |
| Zinco (mg.L ⁻¹ Zn) | 0,03 | 5,00 |
| Manganês (mg.L ⁻¹ Mn) | 0,00 | 1,00 |

¹ DQO – Demanda Química de Oxigênio; ² DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; ³ uT – Unidade de Turbidez; * BRASIL, 2011

Observando os valores dos parâmetros avaliados no efluente bruto e tendo como base a Resolução CONAMA 430, de maio de 2011 (BRASIL, 2011) e Resolução CONAMA 357, de março de 2005 (BRASIL, 2005), para padrões de lançamento de efluente, verifica-se que alguns parâmetros não estão de acordo com os exigidos pela legislação, são eles: pH, sólidos dissolvidos totais, turbidez e lítio.

Gases e sólidos dissolvidos são os principais constituintes responsáveis pela variação do pH. Este é importante em diversas etapas do tratamento de água, principalmente para a ótima atuação de coagulantes.

Todos os contaminantes da água residuária, com exceção dos gases dissolvidos, contribuem para a carga de sólidos. Os sólidos (principalmente os dissolvidos, que compreendem sais inorgânicos e matéria orgânica), são os principais responsáveis pelas alterações químicas e físicas da água, alterando seus padrões de qualidade.

A turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, o que confere aparência turva a mesma. No efluente em estudo, os sólidos em suspensão são os principais constituintes da alteração deste parâmetro.

Com o objetivo de tornar esse efluente adequado ao reuso e, se possível, ao lançamento, efetuaram-se estudos de tratabilidade, onde os resultados estão descritos a seguir.

5.3 ESTUDOS DE TRATABILIDADE POR PROCESSO FÍSICO-QUÍMICO

No primeiro ensaio realizado, onde se utilizou o efluente bruto sem nenhuma alteração, somente com adição de diferentes concentrações de sulfato de alumínio (citado no item 4.2.2.2), não se obteve resultado. Não se tinha conhecimento que a solubilidade do sulfato de alumínio não depende somente da alcalinidade em carbonatos e bicarbonatos, mas depende também do pH, sendo mais baixa em pH entre 5 e 7. Fora dessa faixa é impraticável a coagulação. No efluente em questão, a concentração de coloides e a alcalinidade são elevadas, portanto, é necessário ajustar o pH para próximo da neutralidade e utilizar uma alta dose de coagulante para que ocorra a coagulação.

É importante destacar que as avaliações após os ensaios de coagulação/floculação foram realizadas através de uma inspeção visual do estado geral de floculação.

5.3.1 Seleção do pH

No segundo ensaio realizado, determinou-se o melhor pH de coagulação/floculação para tratamento do efluente em questão. Utilizou-se concentração de 2 g.L^{-1} de sulfato de alumínio nos seis béqueres variando os valores de pH.

Após os 20 minutos de agitação em jar-test, deixou-se decantar pelos próximos 20 minutos. Em 2 minutos de repouso, iniciou a decantação do coagulado.

A partir do ensaio realizado verifica-se que a faixa de pH de 6,5 a 8,0 apresentou bons resultados de coagulação e diminuição da turbidez, como observa-se na figura 6B. Dessa forma, utilizou-se para os demais ensaios o pH 7,0, o qual está entre os valores que apresentaram bons resultados e que, visualmente, mostra melhor diminuição de turbidez, parâmetro considerado de fundamental importância para o tratamento de efluentes e na otimização do processo.

A tabela 6 apresenta os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio físico-químico para determinação do melhor pH de coagulação/precipitação.

| Jarros | pH | [Al ₂ (SO ₄) ₃] (g.L ⁻¹) | Observações após 20 min. |
|--------|-----|---|---|
| 1 | 5,5 | 2,0 | Sem resultados (pH 3,0) |
| 2 | 6,0 | 2,0 | Houve pouca precipitação e permaneceu com elevada turbidez (pH 3,2). |
| 3 | 6,5 | 2,0 | Precipitou e eliminou grande parte da turbidez (pH 3,4). |
| 4 | 7,0 | 2,0 | Precipitou todos os sólidos eliminando quase toda a turbidez (pH 3,5) |
| 5 | 7,5 | 2,0 | Precipitou e eliminou grande parte da turbidez (pH 3,4). |
| 6 | 8,0 | 2,0 | Precipitou e eliminou grande parte da turbidez (pH 3,5). |

Na figura 6 observa-se a diferença na turbidez do efluente com a variação do pH antes da realização do ensaio (figura 6 A) e depois da realização do ensaio de jar-test (figura 6B).

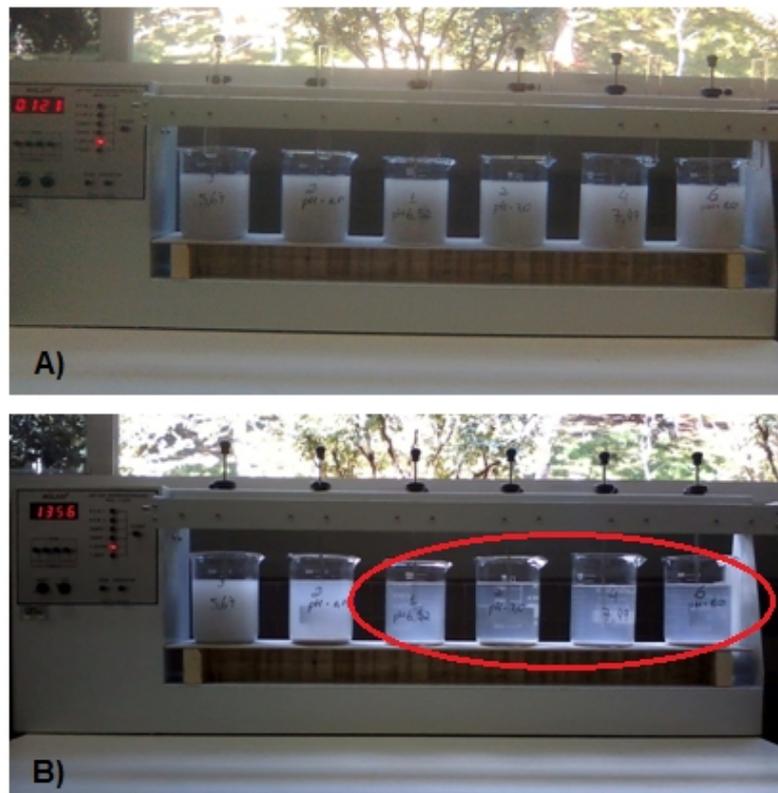


Figura 6 – A) efluente tratado com diferentes pHs antes da realização do ensaio de jar-test. **B)** efluente tratado com diferentes pHs após realização do ensaio.

5.3.2 Seleção da concentração do coagulante ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$)

No terceiro e quarto ensaio, utilizou-se o pH 7,0, melhor pH encontrado no ensaio anterior e determinou-se a melhor concentração de sulfato de alumínio a ser utilizada no tratamento do efluente.

O procedimento utilizado foi o mesmo do ensaio anterior. Com aproximadamente 2 minutos de repouso, iniciou a decantação do coagulado.

A tabela 7 mostra os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 7 – Resultados obtidos no ensaio físico-químico para determinação da melhor concentração do coagulante a ser utilizado.

| Jarros | pH | $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ (g.L^{-1}) | Observações após 20 min. |
|--------|-----|--|--|
| 1 | 7,0 | 0,20 | Sem resultados |
| 2 | 7,0 | 0,30 | Houve pouca precipitação e elevada turbidez. |
| 3 | 7,0 | 0,50 | Houve pouca precipitação e elevada turbidez. |
| 4 | 7,0 | 0,70 | Precipitou e eliminou grande parte da turbidez. |
| 5 | 7,0 | 1,0 | Precipitação boa eliminando quase toda turbidez. |
| 6 | 7,0 | 2,0 | Precipitação boa eliminando quase toda turbidez. |

Observando a tabela, verifica-se que com pH 7,0 as concentrações de 0,70, 1,0 e 2,0 g.L^{-1} (Fig. 7B) foram as que apresentaram melhores resultados, eliminando grande parte da turbidez característica do efluente. Estes resultados também se observam na figura 7.

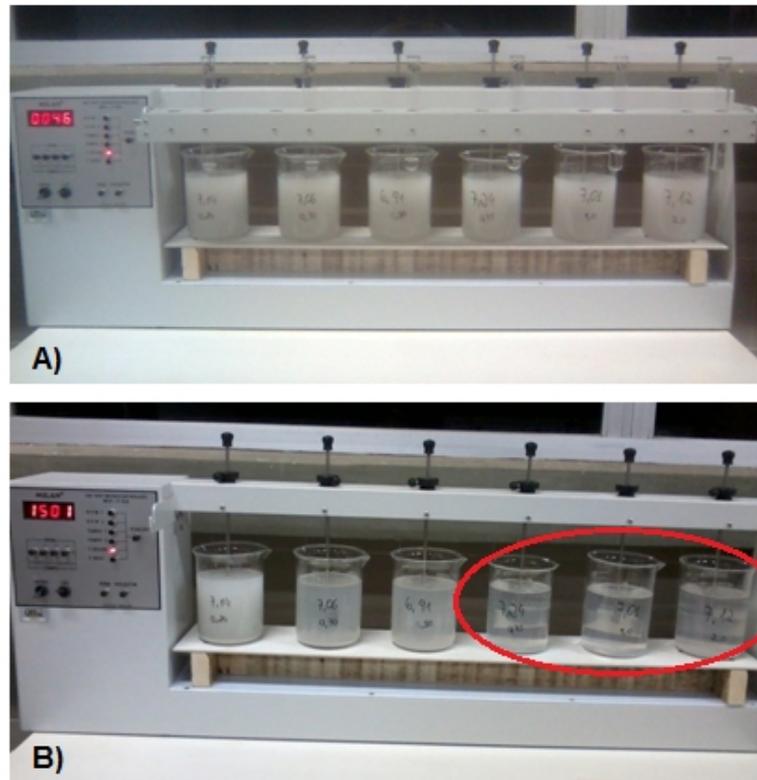


Figura 7 – Efluente tratado com pH 7,0 e diferentes concentrações de sulfato de alumínio antes da realização do ensaio (A) e depois do ensaio (B).

Os resultados obtidos no quarto ensaio podem ser visualizados na tabela 8, onde se repetiram os três melhores resultados encontrados no ensaio anterior (0,70, 1,0 e 2,0 g.L⁻¹ em pH 7,0) e, nos jarros 4, 5 e 6, utilizaram-se maiores concentrações de sulfato de alumínio, permanecendo o pH em 7,0.

Tabela 8 – Quarto ensaio realizado repetindo as consideradas três melhores concentrações obtidas no ensaio anterior e utilizando maiores concentrações de coagulante.

| Jarros | pH | [Al ₂ (SO ₄) ₃] (g.L ⁻¹) | Observações após 20 min. |
|--------|-----|---|--|
| 1 | 7,0 | 0,70 | |
| 2 | 7,0 | 1,0 | |
| 3 | 7,0 | 2,0 | Em todos os jarros houve precipitação eliminando |
| 4 | 7,0 | 2,5 | quase toda turbidez |
| 5 | 7,0 | 3,0 | |
| 6 | 7,0 | 3,5 | |

Em todos os jarros, o efluente tratado apresentou visualmente ótimas características, rápida precipitação, grande diminuição de turbidez e aspecto límpido (Fig. 8).

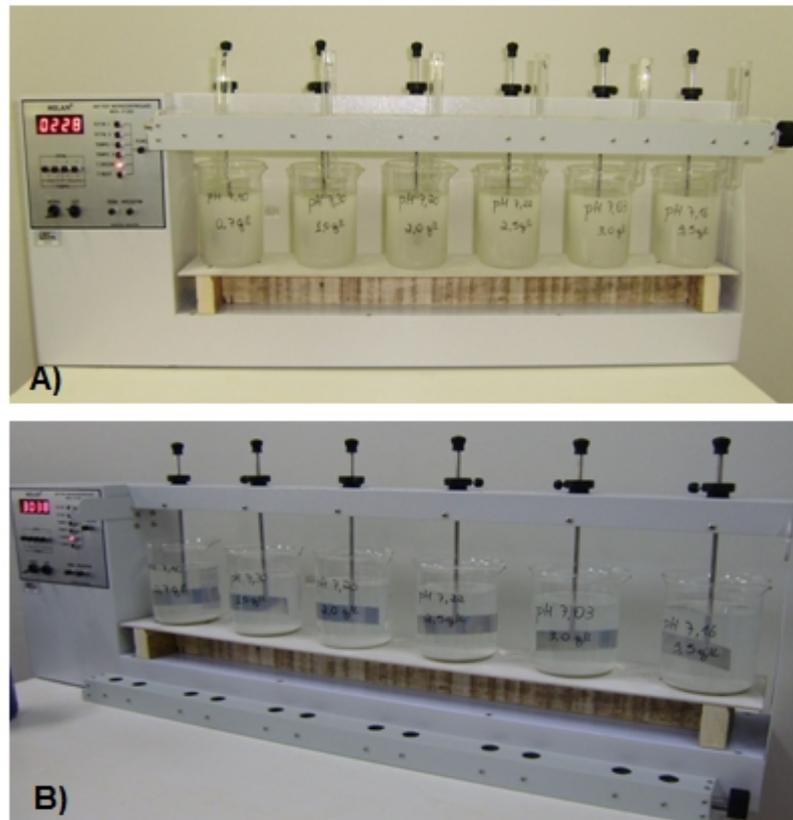


Figura 8 – Coagulação/precipitação realizada repetindo as consideradas três melhores concentrações do ensaio anterior e aumentando a concentração do coagulante antes da realização do ensaio (A) e depois do ensaio (B).

A partir deste ensaio, verificou-se que não há necessidade de se utilizar concentração de sulfato de alumínio superior a 1g.L^{-1} . O aspecto do tratado não apresentará visíveis diferenças e o aumento na concentração só irá favorecer o consequente aumento de íons de alumínio no efluente tratado, tornando-o tóxico ao receptor e inviável para lançamento.

O pH final em todos os ensaios realizados, após a coagulação/precipitação, ficou entre 3,0 e 4,0. Em presença de alcalinidade natural há formação de ácido carbônico (H_2CO_3) que, em solução, se ioniza formando gás carbônico e água ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) ou um próton H^+ e bicarbonato (HCO_3^-), o que confere a acidez identificada no tratado. Assim, o pH foi ajustado com hidróxido de sódio (NaOH) para ficar de acordo com a legislação vigente.

Diante disso, escolheu-se a concentração de 1g.L^{-1} de sulfato de alumínio e pH 7,0 para tratar o efluente em questão. Nesta condição otimizada, realizou-se o ensaio em triplicata e, posteriormente, análises físico-químicas do tratado, onde os valores, comparados com a legislação, encontram-se na tabela 9.

Após os 20 minutos de repouso para precipitação do coagulado, mediu-se o volume de lodo formado, tendo como média dos três jarros 7,5 mL de lodo/L de efluente tratado.

Tabela 9 – Valores encontrados para as análises físico-químicas realizadas no efluente tratado com sulfato de alumínio 1 g.L⁻¹ e pH 7,0, comparados com a legislação.

| Parâmetro | Resultado | Legislação* |
|--|-------------------------|----------------|
| pH | 6,90 | 5 – 9 |
| DQO ¹ (mg.L ⁻¹ O ₂) | 80,7 | – |
| DBO _{5dias} ² (mg.L ⁻¹ O ₂) | 4,65 (remoção de 93,3%) | Remoção de 60% |
| Sólidos Totais (mg.L ⁻¹) | 1450,0 | – |
| Sólidos Sedimentáveis (mg.L ⁻¹) | <0,5 | 1,00 |
| Sólidos Totais Dissolvidos (mg.L ⁻¹) | 1304,0 | 500,0 |
| Sólidos Suspensos Totais (mg.L ⁻¹) | 62,0 | – |
| Turbidez (uT ³) | 0,99 | 100,0 |
| Ferro (mg.L ⁻¹ Fe) | 0,01 | 15,0 |
| Sílica (mg.L ⁻¹ Si) | 131,5 | – |
| Sulfato (mg.L ⁻¹ SO ₄) | 90,2 | 250,0 |
| Alumínio (mg.L ⁻¹ Al) | 45,4 | 0,20 |
| Sódio (mg.L ⁻¹ Na) | 59,5 | – |
| Potássio (mg.L ⁻¹ K) | 3,00 | – |
| Lítio (mg.L ⁻¹ Li) | 57,0 | 2,50 |
| Cobre (mg.L ⁻¹ Cu) | 0,025 | 1,00 |
| Zinco (mg.L ⁻¹ Zn) | 0,11 | 5,00 |
| Mangânês (mg.L ⁻¹ Mn) | 0,01 | 1,00 |

¹ DQO – Demanda Química de Oxigênio; ² DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; ³ uT – Unidade de Turbidez; * BRASIL, 2011.

De acordo com os valores dos parâmetros analisados, verifica-se que, mesmo depois do tratamento, ainda há padrões que ultrapassam os limites previstos pela legislação, como por exemplo, sólidos dissolvidos, alumínio e lítio.

O aumento significativo do alumínio no efluente tratado é resultado da elevada concentração de sulfato de alumínio utilizado na coagulação. Observa-se ainda, um aumento de 53,7% na concentração de íons sulfato, também proveniente do sulfato de alumínio utilizado no tratamento, porém este, não vai além do limite permitido, que é de 250 mg.L⁻¹ de SO₄²⁻.

Houve redução dos sólidos totais, porém aumento nos sólidos dissolvidos totais. Isso pode ser justificado pela solubilidade de alguns sais, presentes no

efluente, nos reagentes utilizados para o processo de tratamento, como por exemplo, o ácido clorídrico e hidróxido de sódio utilizados para correção de pH e, até mesmo no coagulante sulfato de alumínio.

Em relação aos demais parâmetros, verifica-se redução na concentração dos mesmos, principalmente na turbidez e DBO. A DBO apresentou redução de 93,3%, indicando alta eficiência no processo. O cálculo de redução de DBO foi efetuado utilizando a equação 1:

$$DBO_e = DBO_{e \text{ bruto}} \cdot (1 - E/100)$$

onde, DBO_e é a demanda bioquímica do efluente tratado, $DBO_{e \text{ bruto}}$ é a demanda bioquímica do efluente bruto e E é a eficiência de redução (VON SPERLING, 1996, p. 138).

5.3.3 Seleção da concentração do polieletrólito (poliacrilamida aniônica) e ajuste da concentração de sulfato de alumínio

Para reduzir a concentração de sulfato de alumínio a ser utilizado no tratamento do efluente, utilizou-se a poliacrilamida aniônica, um polieletrólito auxiliar de coagulação. Os polímeros aniônicos são produtos utilizados como agentes auxiliares de coagulação ou condicionador de lama, em processos de separação sólido-líquido, em estações de tratamento de águas, sistemas de flotação e tratamento de efluentes industriais. Por apresentar alto peso molecular, em pequenas dosagens possibilita a remoção de grande quantidade de sólidos suspensos em sistemas aquosos com rapidez e eficiência, seja como coagulante auxiliar na decantação ou em sistemas de flotação.

Efetuaram-se dois ensaios em jar-test: um para ajuste da concentração do polieletrólito e outro para ajuste da concentração do coagulante, permanecendo com pH 7,0.

No primeiro ensaio, a concentração de 1 g.L^{-1} de sulfato de alumínio utilizada anteriormente foi reduzida à metade, mantendo-a fixa em todos os jarros, e variou-se a concentração do polímero de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ a $3,0 \text{ mg.L}^{-1}$. A tabela 10 mostra

as observações feitas após o primeiro ensaio de coagulação/precipitação do efluente com o polieletrólito.

Tabela 10 – Resultados obtidos na coagulação/precipitação do efluente com variação da concentração do polieletrólito e concentração fixa de sulfato de alumínio.

| Jarros | pH | [Al ₂ (SO ₄) ₃] (g.L ⁻¹) | [Polímero] (mg.L ⁻¹) | Observações após 20 min. |
|--------|-----|---|----------------------------------|--|
| 1 | 7,0 | 0,50 | 0,50 | Todos os jarros apresentaram coagulação com eliminação de turbidez |
| 2 | 7,0 | 0,50 | 1,0 | |
| 3 | 7,0 | 0,50 | 1,5 | |
| 4 | 7,0 | 0,50 | 2,0 | |
| 5 | 7,0 | 0,50 | 2,5 | |
| 6 | 7,0 | 0,50 | 3,0 | |

A coagulação e precipitação ocorreram em todos os jarros (Fig. 9), eliminado totalmente a turbidez do efluente, isso porque as concentrações de sulfato de alumínio e polímero utilizados foram relativamente elevadas. Observou-se que o volume de lodo formado neste ensaio foi maior que nos demais, apresentando um valor médio de 23 mL de lodo/L de efluente tratado.

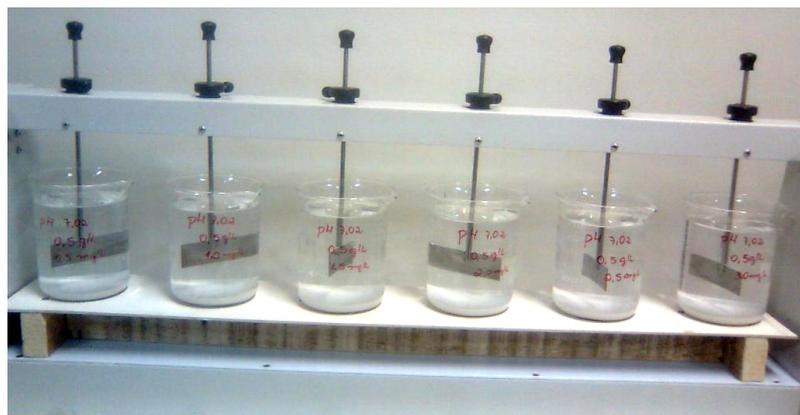


Figura 9 – Efluente tratado com variação na concentração do polieletrólito e valor fixo de concentração de sulfato de alumínio após o ensaio em jar-test.

No segundo ensaio, manteve-se fixa a concentração do polieletrólito em 0,5 mg. L⁻¹, escolhida a partir do ensaio anterior, variando a concentração do coagulante sulfato de alumínio. Considerou-se valores de concentração inferior a 1 g.L⁻¹, como se observa na tabela 11.

Tabela 11 - Resultados obtidos na coagulação/precipitação do efluente com variação da concentração de sulfato de alumínio e concentração fixa do polieletrólito (poliacrilamida aniônica).

| Jarros | pH | [Al ₂ (SO ₄) ₃] (g.L ⁻¹) | [Polímero] (mg.L ⁻¹) | Observações após 20 min. |
|--------|-----|---|----------------------------------|---|
| 1 | 7,0 | 0,70 | 0,50 | Ocorreu coagulação seguido de precipitação, eliminando quase toda turbidez. |
| 2 | 7,0 | 0,50 | 0,50 | |
| 3 | 7,0 | 0,40 | 0,50 | |
| 4 | 7,0 | 0,30 | 0,50 | |
| 5 | 7,0 | 0,20 | 0,50 | Pouca coagulação, não eliminou a turbidez. |
| 6 | 7,0 | 0,10 | 0,50 | Sem resultados. |

Neste ensaio, observou-se que concentrações inferiores 0,3 g.L⁻¹ do coagulante sulfato de alumínio não apresentou bons resultados, sendo esta, a concentração mínima capaz de coagular grande parte dos sólidos responsáveis pela turbidez do efluente. O volume de lodo formado permaneceu com valor elevado, como apresentado no ensaio anterior, com 27 mL de lodo/L de efluente tratado.

A figura 10 apresenta o efluente tratado com variação na concentração de sulfato de alumínio e concentração de polímero fixo em 0,5 mg. L⁻¹.

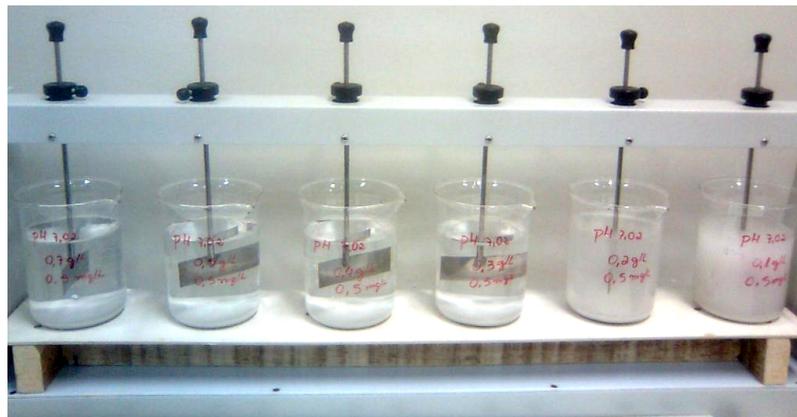


Figura 10 - Efluente tratado com variação na concentração do coagulante sulfato de alumínio e valor fixo de concentração do polieletrólito após o ensaio em jar-test.

Com base nos ensaios realizados, escolheram-se as concentrações mínimas de coagulante e polieletrólito suficientes para coagular e precipitar o efluente em estudo, sendo assim, utilizou-se 0,3 g.L⁻¹ de sulfato de alumínio e 0,5 mg.L⁻¹ de polieletrólito. Nesta condição otimizada, foi realizado ensaio em triplicata (Fig.11) e o tratado foi submetido a análises físico-químicas, como apresenta a tabela 12.



Figura 11 – Ensaio em triplicata após o ensaio de coagulação/precipitação com o polímero auxiliar de coagulação.

Tabela 12 – Valores encontrados para as análises físico-químicas realizadas no efluente tratado com $0,3 \text{ g.L}^{-1}$ de sulfato de alumínio e $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de polieletrólito em pH 7,0.

| Parâmetro | Resultado | Legislação* |
|--|-------------------------|----------------|
| pH | 6,80 | 5 – 9 |
| DQO ¹ ($\text{mg.L}^{-1} \text{ O}_2$) | 142,9 | – |
| DBO _{5dias} ² ($\text{mg.L}^{-1} \text{ O}_2$) | 11,3 (remoção de 83,7%) | Remoção de 60% |
| Sólidos Totais (mg.L^{-1}) | 1052,5 | – |
| Sólidos Sedimentáveis (mg.L^{-1}) | <0,5 | 1,00 |
| Sólidos Totais Dissolvidos (mg.L^{-1}) | 1030,0 | 500,0 |
| Sólidos Suspensos Totais (mg.L^{-1}) | 42,5 | – |
| Turbidez (uT^3) | 0,21 | 100,0 |
| Ferro ($\text{mg.L}^{-1} \text{ Fe}$) | 0,29 | 15,0 |
| Sílica ($\text{mg.L}^{-1} \text{ Si}$) | 79,9 | – |
| Sulfato ($\text{mg.L}^{-1} \text{ SO}_4$) | 151,9 | 250,0 |
| Alumínio ($\text{mg.L}^{-1} \text{ Al}$) | 2,51 | 0,20 |
| Sódio ($\text{mg.L}^{-1} \text{ Na}$) | 64,0 | – |
| Potássio ($\text{mg.L}^{-1} \text{ K}$) | 3,00 | – |
| Lítio ($\text{mg.L}^{-1} \text{ Li}$) | 0,00 | 2,50 |
| Cobre ($\text{mg.L}^{-1} \text{ Cu}$) | 0,02 | 1,00 |
| Zinco ($\text{mg.L}^{-1} \text{ Zn}$) | 0,08 | 5,00 |
| Manganês ($\text{mg.L}^{-1} \text{ Mn}$) | 0,00 | 1,00 |

¹ DQO – Demanda Química de Oxigênio; ² DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; ³ uT – Unidade de Turbidez; * BRASIL, 2011.

Comparado com o ensaio anterior, o volume de lodo formado permaneceu constante, com valor de 27 mL de lodo/L de efluente tratado.

Em relação aos valores encontrados dos parâmetros analisados, verifica-se que a redução de alguns parâmetros foi ainda maior se comparado com o tratado citado no item 5.3.2, como por exemplo, os sólidos, alumínio, turbidez, sílica, lítio e zinco.

Porém, ainda há dois padrões que permanecem com seus valores elevados: sólidos dissolvidos e alumínio. O alumínio apresentou grande redução na concentração, passando de $45,4 \text{ mg.L}^{-1}$ para $2,51 \text{ mg.L}^{-1}$, mas ainda ultrapassa os limites impostos pela legislação.

Observa-se grande aumento na concentração de íons sulfato. Comparado com o efluente bruto, o aumento foi de 72,5%, mas ainda está de acordo com os padrões exigidos. Esse aumento pode ser justificado pelo uso do polímero. Por este ser aniônico, há repulsão dos ânions sulfato com a cadeia polimérica não havendo ligação, aumentando, assim, a concentração de sulfato no efluente tratado.

A DBO apresentou redução menor quando comparada com o tratado anterior, mas está de acordo com o limite de redução exigido pela Resolução CONAMA 430, de maio de 2011. Utilizando a equação 1, a eficiência de redução calculada foi de 83,7%, indicando boa eficiência no processo de tratamento do efluente.

O maior volume de lodo formado é justificado pelo tamanho da cadeia do polímero utilizado e sua elevada massa molecular, agregando assim, maior volume ao lodo. Porém, o lodo formado com a adição de polímero é relativamente mais denso e mais fácil de ser desidratado – ao contrário do lodo gelatinoso oriundo do sulfato de alumínio – facilitando o manuseio e a disposição final.

5.4 ESTUDOS DE TRATABILIDADE POR PROCESSO DE FILTRAÇÃO EM BAGS

Após a sequencia de filtração realizada, passando o efluente no filtro de maior porosidade seguindo para o de menor porosidade, observou-se que não houve alterações nas características deste.

Imaginava-se que este método apresentaria bons resultados na eliminação dos sólidos presentes no efluente bruto, pelo fato de se utilizar malhas muito finas no processo de filtração, porém não foi o que aconteceu.

Pela água residuária apresentar grandes concentrações de sólidos dissolvidos e suspensos, os filtros utilizados não foram eficientes para retê-los, os quais escoaram permanecendo no efluente. A figura 12 mostra como ficou o último filtrado após passar pela sequencia de bags.

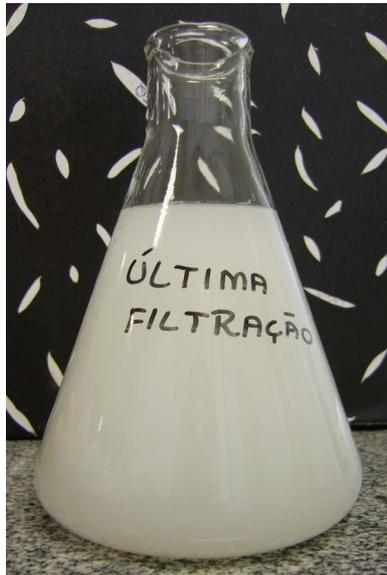


Figura 12 – Efluente obtido na última filtração da sequencia de filtrações realizadas em bags de polifilamento de nylon

Com este ensaio, conclui-se que a utilização de bags de polifilamento de nylon não é eficiente no tratamento de efluente que apresentam características semelhantes ao efluente em questão.

5.5 ESTUDOS DE INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS: FÍSICO-QUÍMICO E FILTRAÇÃO EM BAGS

Com a finalidade de melhorar a eficiência do tratamento, efetuou-se a integração dos dois processos, físico-químico e filtração em bags, utilizando o processo otimizado com concentração de sulfato de alumínio a 1 g.L^{-1} e pH 7,0 e

passando o coagulado/precipitado no elemento filtrante de menor porosidade (30 micra) (Fig. 13).



Figura 13 – Ensaio de coagulação/precipitação seguido de filtração do efluente em estudo

Como no ensaio anterior, este também não apresentou bons resultados. Ao passar o efluente tratado por processo físico-químico nos bags, o lodo decantado mistura-se com o tratado, não mostrando eficiência na filtração.

O efluente tratado nessas condições também foi submetido a análises físico-químicas, como mostra a tabela 13.

Tabela 13 - Valores encontrados para as análises físico-químicas realizadas da integração dos processos, utilizando concentração de sulfato de alumínio a 1g.L^{-1} e pH 7,0 seguido de filtração.

(continua)

| Parâmetro | Resultado | Legislação* |
|---|-------------------------|----------------|
| pH | 6,80 | 5 – 9 |
| DQO ¹ ($\text{mg.L}^{-1} \text{O}_2$) | 204,0 | – |
| DBO _{5dias} ² ($\text{mg.L}^{-1} \text{O}_2$) | 20,3 (remoção de 70,7%) | Remoção de 60% |
| Sólidos Totais (mg.L^{-1}) | 1505,0 | – |
| Sólidos Sedimentáveis (mg.L^{-1}) | <0,5 | 1,00 |
| Sólidos Totais Dissolvidos (mg.L^{-1}) | 1295,0 | 500,0 |
| Sólidos Suspensos Totais (mg.L^{-1}) | 132,0 | – |
| Turbidez (uT^3) | 105, 2 | 100,0 |
| Ferro ($\text{mg.L}^{-1} \text{Fe}$) | 0,06 | 15,0 |

Tabela 13 – Valores encontrados para as análises físico-químicas realizadas da integração dos processos, utilizando concentração de sulfato de alumínio a 1g.L^{-1} e pH 7,0 seguido de filtração.

(conclusão)

| Parâmetro | Resultado | Legislação* |
|--|-----------|-------------|
| Sílica (mg.L^{-1} Si) | 115,3 | – |
| Sulfato (mg.L^{-1} SO_4) | <0,5 | 250,0 |
| Alumínio (mg.L^{-1} Al) | 50,6 | 0,20 |
| Sódio (mg.L^{-1} Na) | 57,0 | – |
| Potássio (mg.L^{-1} K) | 3,00 | – |
| Lítio (mg.L^{-1} Li) | 56,0 | 2,50 |
| Cobre (mg.L^{-1} Cu) | 0,04 | 1,00 |
| Zinco (mg.L^{-1} Zn) | 0,04 | 5,00 |
| Manganês (mg.L^{-1} Mn) | 0,01 | 1,00 |

¹ DQO – Demanda Química de Oxigênio; ² DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; ³ uT – Unidade de Turbidez; * BRASIL, 2011.

Observando os valores encontrados para os parâmetros físico-químicos analisados após a integração dos dois processos, verifica-se que a redução não foi significativa quando comparada com o efluente bruto.

Houve remoção de 70,7% de DBO, atingindo os limites exigidos pela legislação. A concentração de sólidos permanece elevada, não mostrando diferença significativa. Observa-se aumento na concentração de sólidos dissolvidos totais pela elevada quantidade de sais inorgânicos presentes no tratado, os quais não foram identificados.

Pela utilização de alta concentração de sulfato de alumínio no processo de coagulação/floculação, o teor de alumínio no tratado extrapola os limites legais, sendo inviável seu lançamento.

Não mostrando bons resultados, torna-se inviável a utilização da integração dos dois processos, pela baixa eficiência apresentada no tratamento.

5.6 PROTOCOLO DE TRATAMENTO

Com base nos ensaios realizados, o processo de tratabilidade que apresentou melhores resultados foi o físico-químico de coagulação/floculação com polímero coadjuvante, utilizando sulfato de alumínio a $0,3\text{ g.L}^{-1}$ e poliacrilamida

aniônica a $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ em pH 7,0. Partindo deste processo anteriormente otimizado, propõem-se um protocolo de tratamento para a água residuária em questão.

5.6.1 Procedimento operacional para tratamento da água residuária

PROTOCOLO DE TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA

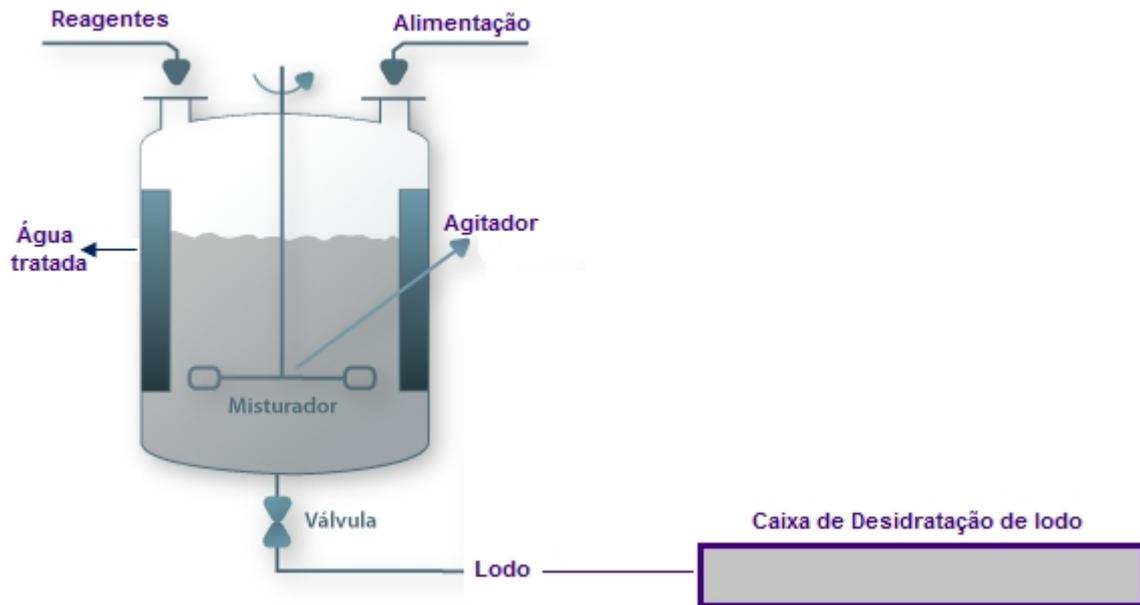
Tipo de efluente: água residuária de processo de laminação e polimento de vidro.

Identificação da Indústria: Indústria e Comércio de Vidros Fratta LTDA.

Tipificação do efluente: água residuária com elevado teor de sólidos, sílica e turbidez.

Descrição do sistema: Estação de tratamento de efluentes (ETE) compacta e portátil para processo físico-químico de coagulação/floculação/decantação baseada em um tanque misturador/floculador/decantador fabricada em polipropileno, aço carbono ou aço inox de geometria cilíndrica com fundo cônico, misturador mecânico de eixo vertical com janela para inspeção e adição de insumos químicos. O lodo é removido através de uma tubulação situada no fundo do tanque e conduzido a caixas de secagem. A desidratação do lodo pode ocorrer por evaporação natural ou utilizando sistemas de aquecimento, reduzindo assim, seu volume. A água coagulada, por sua vez, é recolhida através de vertedores localizados na parte superior do tanque e reutilizada no processo industrial.

ETAPAS DE OPERAÇÃO (para carga de 500 litros)



- 1) Enchimento do tanque;
- 2) Medir o pH e ajustá-lo em 7,0 com ácido clorídrico;
- 3) Ligar agitação do misturador em velocidade rápida, aproximadamente 100 rpm;
- 4) Adicionar no tanque 1,5 litros de solução de sulfato de alumínio a 10%;
- 5) Em seguida adicionar 250 mL de solução de poliacrilamida aniônica a 0,1%;
- 6) Após 2 minutos de agitação em 100 rpm, reduzir a rotação do aparelho para 50 rpm e deixar agitar por 20 minutos;
- 7) Terminada a agitação, deixar decantar por 20 minutos;
- 8) Acionar a válvula de drenagem para esgotamento do lodo;
- 9) Medir novamente o pH. Corrigir com hidróxido de sódio para um valor entre 6,0 e 7,0.
- 10) Reutilizar a água tratada ou, se estiver de acordo com os padrões exigidos pela legislação (Resolução CONAMA nº 430 de maio de 2011), efetuar o lançamento em rede coletora ou corpo receptor.
- 11) Efetuar análises físico-químicas rotineiras para controlar os padrões de qualidade da água, principalmente DQO, DBO, sólidos, turbidez e sílica.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos sugerem que o processo físico-químico fundamentado na floculação/decantação a base de sulfato de alumínio e polieletrólito aniônico é o mais eficiente para o tratamento do efluente em estudo tendo sido alcançado níveis máximos de remoção de DBO, DQO, turbidez e sílica da ordem de 83,7, 34,0, 99,9 e 60,1%, respectivamente. Os ensaios com os filtros bag em polifilamento de nylon demonstraram que tal alternativa não é compatível com o tipo de efluente em estudo, tendo apresentado baixas eficiências de remoção. A baixa eficiência deste processo diminuiu, conseqüentemente, a eficiência do processo de integração, onde os bags foram utilizados na filtração após o processo de coagulação/floculação. A integração dos processos poderia apresentar maior eficiência se o tipo de filtração fosse alterada, substituindo os bags por outro material, como por exemplo, membranas, carvão ativado, areia e/ou terra diatomácea.

Apesar de o processo físico-químico de coagulação/floculação com polieletrólito auxiliar apresentar boa eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos, ainda há padrões que não atingem os níveis exigidos pela legislação ambiental vigente, como é o caso do alumínio e dos sólidos dissolvidos. O excesso de alumínio no tratado é justificado pela alta concentração de sulfato de alumínio utilizado no processo de tratamento que, em concentrações menores, não se atingiu bons níveis de tratabilidade. A carga de sólidos dissolvidos no efluente é elevada, em função da grande concentração sais inorgânicos presentes. Mais estudos devem ser realizados para identificar qual material inorgânico é responsável pela elevada concentração deste parâmetro e quais procedimentos devem ser realizados para remoção eficiente tanto da carga de sólidos quanto da concentração de alumínio.

Em função da elevada concentração destes parâmetros, os quais estão acima dos limites permitidos pela legislação, não se recomenda o lançamento imediato do efluente sem um processo mais eficiente de remoção, mas sim, seu reuso no processo industrial. Tanto a adequação de tais parâmetros quanto os níveis de reuso devem ser estudados através da realização de novos ensaios de otimização fundamentada em estudos de planejamento fatorial multivariado.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudos da capacidade de ciclos de uso e reuso do efluente tratado.
- Tratamento e destinação de lodo drenado.
- Para correção do parâmetros sólidos dissolvidos e alumínio, sugere-se estudos de tratabilidade complementar ao processo físico-químico, como por exemplo, filtração com membranas, carvão ativado, areia e/ou terra diatomácea.

REFERÊNCIAS

BRASIL. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em 19 nov 2011.

BRASIL. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso 03 set 2012.

BRASIL. Lei Federal nº 9433 de 08 de janeiro de 1997. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/Institucional/Legislacao/leis/lei9433.pdf>>. Acesso em 19 nov 2011.

BRASIL. Lei Federal nº 9605 de 12 de fevereiro de 1998. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/fauna/legislacao/lei_9605_98.pdf>. Acesso em 20 nov 2011.

DI BERNARDO, Luiz; PAZ, Lyda Patricia Sabogal. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. vol 1. São Carlos, SP: Editora LDIBE LTDA, 2008. p. 119, 120.

DIAS, Tiago. Conceitos simples com ótimos resultados. **Meio Filtrante**. Ano V. ed. nº 24, janeiro/fevereiro de 2007. Disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/materias_ver.asp?action=detalhe&id=276&revista=n24>. Acesso em 14 nov 2011.

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; CIESP – Centro da Indústrias do Estado de São Paulo. **Conservação e Reúso da Água: manual de orientação para o setor industrial**. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/reuso.pdf>>. Acesso em 19 nov 2011.

FILTROS: interesse em água consolida o setor. **Química e Derivados**. ed. nº 450 de junho de 2006. Disponível em: <<http://www.quimica.com.br/revista/qd450/filtro1.html>>. Acesso em 14 nov 2011.

FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. **Manual de Conservação e Reúso de Água na Indústria**. 1ª ed. Rio de Janeiro: DIM, 2006. Disponível em: <http://www.siamfesp.org.br/novo/downloads/cartilha_reuso.pdf>. Acesso em 19 nov 2011.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água**. 3ª ed. rev. Brasília, 2009. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/internet/arquivos/biblioteca/eng/eng_analAgua.pdf>. Acesso em 09 out 2011.

GALVÃO, Michel Ribas. **Estudo do reúso não potável de água de processo e efluente tratado em indústria de bebidas**. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial do Setor de Tecnologia). Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2010. Disponível em: <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/25656/Dissertacao_MichelRibasGalvao_finaI20110417%20entrega%20final%20pdf.pdf?sequence=1>. Acesso em 27 nov 2011.

GIORDANO, Gandhi. **Tratamento e Controle de Efluentes Industriais**. Apostila. Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente – UERJ, 2011. Disponível em: <http://www.cepuerj.uerj.br/insc_online/itaguai_2011/edital/superior/biologo/Apostila%20-%20Tratamento%20de%20efluentes%20industriais.pdf>. Acesso em 24 nov 2011.

HESPANHOL, Ivanildo. **Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos**. vol. 13. n. Especial. Bahia Análise & Dados. Salvador, Ba. p. 411-437, 2003. Disponível em: <<http://www.hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/ChuvaNet/ChuvaTrabalhosPublicados/Potencialdereusodegua noBrasilagriculturaindstriamunicipiosrecargadeaquiferos.pdf>>. Acesso em 27 ago 2011.

LAMBDA, Maxwell. **Coagulação química**. PUC – Rio. Disponível em: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/11608/11608_5.PDF> Acesso em 03 set 2012.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3ª ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. p. 135.

MARON, Romário Jr. **Reúso de água em indústria metalúrgica rolamenteira – estudo de caso da SKF do Brasil LTDA**. 2006. Dissertação (Mestrado em Saneamento Básico). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde.../RomarioMaronJunior.pdf>>. Acesso em 02 set 2011.

MIERZWA, José Carlos. **O uso racional e o reúso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria - estudo de caso da Kodak brasileira**. 2002. 367 p. vol. 1 e 2. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-14112002.../TeseJCM.pdf>>. Acesso em 02 set 2011.

MIERZWA, José Carlos; HESPANHOL, Ivanildo. **Água na Indústria: Uso Racional e Reúso**. São Paula: Editora Oficina de Textos, 2005.

OENNING JR, Airton; PAWLOWSKY, Urivald. **Avaliação de Tecnologias Avançadas para o Reúso de Água em Indústria Metal-Mecânica**. Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol 12. nº 3, julho/setembro de 2007, p. 305-316. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v12n3/a08v12n3.pdf>>. Acesso em 23 nov 2011.

PARANÁ. Lei Estadual nº 12726 de 26 de novembro de 1999. Disponível em: <<http://celepar7cta.pr.gov.br/SEEG/sumulas.nsf/9973229f063f4a8d03256c2f007a992a/8c56f0aff5b8de3903256e990068a3bb?OpenDocument>>. Acesso em 20 nov 2011.

PARANÁ. Decreto Estadual nº 4646 de 31 de agosto de 2001. Disponível em: <<http://celepar7cta.pr.gov.br/SEEG/sumulas.nsf/2b08298abff0cc7c83257501006766d4/2f917fbc2c0829803256e990064ce0c?OpenDocument>> Acesso em 20 nov 2011.

PARANÁ. CEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente, Resolução nº 70/2009. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/resolucao_cema_70_2009.pdf>. Acesso em 20 nov 2011.

RICHTER, Carlos, A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo, SP: Editora Blucher, 2009. p. 67-82.

ROSSIN, Antônio Carlos. **Técnica de abastecimento e tratamento de água – teste de jarros (Jar Test)**. Novembro de 2008. Disponível em: <http://www.tratamentodeagua.com.br/r10/Biblioteca_Detalhe.aspx?codigo=388&topico=0> Acesso em 08 out 2011.

SCHREIER, Julio; CAMMAROTA, Flávia C. L.; CIPRIANI, Márcio J. I.; FILHO, Sidney S. F. **Tratamento físico-químico de águas residuárias provenientes da foscação de vidro, visando o reúso**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/brasil/ii-166.pdf>>. Acesso em 28 ago 2011.

SILVA, Adão Jr. **Tratamento terciário de efluente de uma indústria de refrigerantes visando ao reúso – estudo de caso**. 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Escola de Química, Rio de Janeiro, 2009.

Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater. APHA. 21ª ed, 2005

TELLES, Dirceu D.; COSTA, Regina H. P. G et al. **Reuso da água: conceitos, teorias e práticas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

TRINDADE, Teodoro; MANUEL, Renato. **Ensaio de tratabilidade em águas residuais (tratamentos físico-químicos: coagulação/floculação)**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – ISEL. Departamento de Engenharia Química, Laboratórios Integrados 6C. Seção de Ambiente e Qualidade. Setembro, 2006. Disponível em: <http://pwp.net.ipl.pt/deq.isel/teodoro/li6c2006b/pdf/li6c_floculacao.pdf> Acesso em 09 out 2011.

VIEIRA, Rafael Bruno. **Estudo da coagulação de cultura mista utilizada na biodegradação de efluente de terminais de combustíveis**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Uberlândia – MG, 2009. Disponível em: <http://www.btdt.ufu.br/tde_arquivos/12/TDE-2009-08-14T121145Z-1623/Publico/dis.pdf> Acesso em 13 jul 2012.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade de água e ao tratamento de esgoto**. 2ª ed. vol.1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.