

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA FLOTAÇÃO POR AR
DISSOLVIDO PARA REMOÇÃO DE FIBRAS DE
EFLUENTE ÁGUA CLARA DE MÁQUINA DE PAPEL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BRUNA LUIZA MANAGÓ

IRATI-PR

2015

BRUNA LUIZA MANAGÓ

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO PARA
RECUPERAÇÃO DE FIBRAS DE EFLUENTE ÁGUA CLARA DE MÁQUINA DE
PAPEL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal - Orientador

Profa. Dra. Jeanette Beber de Souza - Co-orientadora

IRATI-PR

2015

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

MANAGÓ, Bruna Luiza.

M266 Avaliação do emprego da flotação por ar dissolvido para remoção de fibras de efluente água clara de máquina de papel. -- Irati, PR : [s.n], 2015.

64f.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal

Coorientadora: Profa. Dra. Jeanette Beber de Souza

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, PR. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

1. Engenharia Florestal – dissertação. 2. Polímero catiônico. 3. Tecnologia – papel – celulose. I. Vidal, Carlos Magno de Sousa. II. Souza, Jeanette Beber de. III. UNICENTRO. IV. Título.

CDD 20 ed. 676



Universidade Estadual do Centro-Oeste

Reconhecida pelo Decreto Estadual nº 3.444, de 8 de agosto de 1997

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PARECER

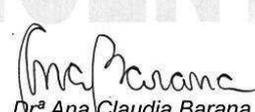
Defesa Nº 76

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus de Irati, após arguir a mestranda **Bruna Luiza Managó** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO PARA REMOÇÃO DE FIBRAS DE EFLUENTES ÁGUA CLARA DE MÁQUINA DE PAPEL", é de parecer favorável à APROVAÇÃO da estudante, habilitando-a ao título de **Mestre em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

Irati-PR, 10 de março de 2015.



Dr. Sandro Xavier de Campos
Universidade Estadual de Ponta Grossa
Primeiro Examinador



Dr. Ana Claudia Barana
Universidade Estadual de Ponta Grossa
Segunda Examinadora



Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Campus Santa Cruz: Rua Pres. Zacarias 875 – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 – FAX: (42) 3621-1090 – CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR
Campus CEDETEG: Rua Simeão Camargo Varela de Sá, 03 – Fone/FAX: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-080 – GUARAPUAVA – PR
Campus de Irati: PR 153 – Km 07 – Riozinho – Cx. Postal, 21 – Fone: (42) 3421-3000 – FAX: (42) 3421-3067 – CEP 84.500-000 – IRATI – PR

Aos meus amados pais Cleusa e José que são exemplos de caráter e dignidade, sempre presentes na minha vida.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, primeiramente, por ter me iluminado nas decisões mais difíceis e por ter me guiado ao longo do curso para trilhar o caminho mais correto possível.

Agradeço a minha família, aos meus irmãos Paulo e Rafael que, não importa a distância, sempre demonstram amizade. Aos meus pais que sempre me deram apoio e incentivo para que eu pudesse realizar os meus sonhos, por me transmitirem os valores mais importantes da vida com muito amor e sabedoria. Mãe, seu cuidado e dedicação me deram a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

Ao meu afilhado Miguel e minha sobrinha Manuella que iluminam meus dias.

Ao Luis Henrique por todo amor, carinho, paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre, dando apoio nas minhas decisões.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal e Profª. Dra. Jeanette Beber de Souza pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta dissertação.

À Prof. Dra. Kelly Geronazzo Martins, pela atenção, apoio e disposição com que auxiliou com as análises estatísticas.

À Santa Maria Cia. de Papel e Celulose, pela oportunidade do estágio.

Ao coordenador de utilidades Jacques Gimenes pela paciência, atenção e orientação durante o período de estágio.

Aos operadores da ETE, Eva, Ewerton, Sônia, Celso e Diecson pela disposição e conhecimento que compartilharam.

Aos professores do programa de pós-graduação e demais funcionários.

Às minhas queridas amigas Leticia, Ludmila, Ana, Paula, Vanessa, Karina, Silvia, Caroline e Andréia pela amizade e companheirismo.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| Lista de Figuras | i |
| Lista de Tabelas | ii |
| Lista de Símbolos e Abreviaturas | iii |
| Resumo | iv |
| Abstract | v |
| | |
| 1. Introdução | 1 |
| | |
| 2. Objetivos | 3 |
| | |
| 3. Referencial Teórico | 4 |
| 3.1. A indústria papeleira..... | 4 |
| 3.2. Processo produtivo..... | 8 |
| 3.3. Tratamento de efluentes..... | 11 |
| 3.4. Recuperação de fibras..... | 12 |
| 3.5. Flotação na recuperação de fibras..... | 16 |
| 3.6. Principais impactos da indústria de papel e celulose..... | 18 |
| 3.7. Coagulantes..... | 21 |
| | |
| 4. Materiais e Métodos | 24 |
| 4.1. Caracterização do efluente objeto de estudo..... | 24 |
| 4.2. Ensaio de flotação..... | 25 |
| 4.3. Análise estatísticas dos dados..... | 28 |
| | |
| 5. Resultados e Discussão | 30 |
| 5.1. Caracterização do efluente água clara..... | 30 |
| 5.2. Eficiência de remoção dos parâmetros estudados..... | 31 |
| 5.3. Estudo de remoção dos parâmetros estudados..... | 33 |
| 5.4. Configuração ótima..... | 49 |
| | |
| 6. Conclusões | 51 |
| | |
| 7. Recomendações | 52 |
| | |
| 8. Referências Bibliográficas | 53 |
| | |
| Anexos | 60 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|---------|
| Figura 1 - Esquema geral de uma máquina de papel..... | 10 |
| Figura 2 - Filtro de disco da máquina de papel..... | 24 |
| Figura 3 - Diagrama simplificado do sistema de geração de água clara..... | 25 |
| Figura 4 - Equipamento flotateste utilizado na pesquisa..... | 26 |
| Figura 5 - Procedimentos dos ensaios com o flotateste..... | 27 |
| Figura 6 - Esquema do Arranjo Fatorial 6 x 2 x 2..... | 29 |
| Figura 7 - Gráficos para o parâmetro cor aparente..... | 33 e 34 |
| Figura 8 - . Gráficos para o parâmetro turbidez..... | 36 e 37 |
| Figura 9 - Gráficos para o parâmetro DQO..... | 39 e 40 |
| Figura 10 - Gráficos para o parâmetro ST..... | 42 e 43 |
| Figura 11 - Gráficos para o parâmetro SST..... | 45 e 46 |
| Figura 12 - Formação de flocos após a aplicação do polímero catiônico..... | 49 |
| Figura 13 - Efluente água clara do papel <i>gloss</i> após a flotação..... | 49 |
| Figura 14 - Equipamento flotateste utilizado nos ensaios..... | 60 |
| Figura 15 - Câmara de saturação e válvulas..... | 61 |
| Figura 16 - Sistema de mangueira, tês e jarros..... | 63 |
| Figura 17 - Jarro de flotação..... | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Etapas da produção do papel a partir de fibras virgens..... | 10 |
| Tabela 2 - Processos utilizados para recuperação de fibras..... | 15 |
| Tabela 3 - Comparação entre os principais processos de recuperação de fibras.... | 16 |
| Tabela 4 - Aplicações gerais dos coagulantes no tratamento de efluentes..... | 23 |
| Tabela 5 - Configurações da FAD adotadas para os ensaios..... | 27 |
| Tabela 6 - Características físico-químicas do polímero catiônico..... | 28 |
| Tabela 7 - Caracterização físico-química do efluente água clara tipo <i>print</i> | 30 |
| Tabela 8 - Caracterização físico-química do efluente água clara tipo <i>gloss</i> | 30 |
| Tabela 9 - Eficiência média de remoção (%) dos parâmetros cor, turbidez, DQO SST e ST pelo processo de flotação por ar dissolvido empregado no tratamento do efluente água clara de máquina de papel..... | 32 |
| Tabela 10 - Comparação de valores e percentuais de remoção de SST obtidos na atual pesquisa com tratamentos por FAD, em relação às referências estabelecidas pela literatura..... | 48 |

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

°C – Graus Celsius, unidade de temperatura;
µm – Micrometro, unidade de medida de comprimento;
AOX – Composto orgânico halogenado;
atm - Atmosfera, unidade de pressão;
Bar – Bar, unidade de pressão;
COV – Compostos orgânicos voláteis;
DBO - Demanda bioquímica de oxigênio;
DIC - Delineamento inteiramente casualizado;
DQO – Demanda química de oxigênio;
ETA - Estação de tratamento de água;
ETE – Estação de tratamento de esgoto;
FAD - Flotação por ar dissolvido;
Gf - Gradiente de floculação;
Gm - Gradiente de mistura rápida;
Kgf/cm² - Quilograma-força por centímetro quadrado;
m³/ha/ano - Metro cúbico por hectare por ano;
m³/ tsa - Metro cúbico por tonelada de celulose seca ao ar;
mg/L - Miligrama por litro;
mL/L - Mililitro por litro;
PAC - Cloreto de Polialumínio;
ppm - Parte por milhão;
Psat - Pressão de saturação;
R - Recirculação (%);
SST - Sólidos suspensos totais;
ST - Sólidos totais;
Tfloc - tempo de floculação;
Tmr - Tempo de mistura rápida;
uC - Unidade de cor;
uT - Unidade de turbidez;
Vf - Velocidade de flotação.

RESUMO

Bruna Luiza Managó. Avaliação do emprego da flotação por ar dissolvido para recuperação de fibras de efluente de água clara de máquina de papel.

A perda de fibra celulósica fica em torno de 1 a 3% de todas as fibras que entram no processo de produção de papel. Parte destas fibras pode retornar ao processo caso esteja associado à máquina de papel algum tipo de recuperador de fibras. O efluente água clara estudado nesta pesquisa é resultado do tratamento primário de água branca através do equipamento filtro de disco de uma máquina de papel. Foi investigado nesta pesquisa o uso da flotação por ar dissolvido (FAD) visando à recuperação de fibras do efluente água clara gerada na produção de dois tipos de papel. Avaliou-se a influência dos parâmetros dosagem de polímero catiônico (0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 mg/L), velocidade de flotação (18 e 9 cm/min) e efluente água clara de dois tipos de papel (*print* e *gloss*). Os dados foram submetidos à análise estatística através de arranjo fatorial 6 x 2 x 2 - delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os resultados obtidos indicaram que o processo de FAD nas condições otimizadas, com dosagem de 1 mg/L de polímero catiônico e velocidade de flotação de 18 cm/min, demonstrou ser uma alternativa viável para a remoção de sólidos suspensos totais (fibras), sólidos totais, cor, turbidez e DQO do efluente estudado com eficiências de remoção de 99%, 25,5%, 98% e 48,5% respectivamente, no efluente água clara do papel *gloss*, e remoção de 92,9% de SST, 42,7% de ST, 73% de cor, 97% de turbidez, não ocorrendo remoção de DQO no caso do efluente água clara do papel *print*.

Palavras-Chave: polímero catiônico, flotação por ar dissolvido, água clara, efluente de papel.

ABSTRACT

Bruna Luiza Managó. Evaluation of the use of dissolved air flotation for recovering fibers from clear water effluent of a paper machine.

The loss of cellulose fiber is about 1 to 3% of all fibers used in the paper production process. Part of these fibers can return to the process if it is associated with the paper machine some sort of fibers recovery. The clear water effluent studied in this research is the result of a primary treatment white water through the filter disc equipment of a paper machine. It was investigated in this research, the use of dissolved air flotation (DAF) in order recovery the fiber in the effluent clear water, generated in the production of two types of paper. We evaluated the influence of parameters: cationic polymer dosage (0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 mg/L), flotation rate (18 and 9 cm/min) and clear water effluent of two types of paper (print and gloss). Data were statistically analyzed using a factorial arrangement 6 x 2 x 2 - completely randomized design (CRD). The results indicate that the process of FAD in the optimized conditions with a dosage of 1 mg / L and cationic polymer flotation velocity of 18 cm / min has proved to be a viable alternative for the removal of suspended solids (fibers), total solids, color, turbidity and COD of the studied effluent with removal efficiencies of 99%, 25.5%, 98% and 48.5% respectively in the clear water effluent from the paper gloss and 92.9% removal of TSS, 42.7% of ST, 73% of color, 97% of turbidity, COD removal did not occur in the case of effluent clear water of the print paper.

Keywords: cationic polymer, dissolved air flotation, clear water, paper effluent.

1. INTRODUÇÃO

No *ranking* dos maiores produtores mundiais de papel e celulose o Brasil encontra-se como 9º produtor mundial de papel e o 4º produtor mundial de celulose de fibra curta (eucalipto). A indústria de papel e celulose representa um dos setores produtivos mais significativos do mundo, a qual contribui com parcela importante na geração de produtos, renda, tributos e empregos. Desta forma, este setor tem grande importância econômica e tem contribuído de forma relevante para o desenvolvimento econômico e social do Brasil.

O processo de produção de papel e celulose é constituído basicamente de três etapas: consumo de recursos (madeira, água, aditivos, energia, etc.), processamento e por fim a geração de produtos. Cada uma dessas fases gera impactos ambientais, assim como um grande número de subprodutos. Caso não tenham destino final correto podem acarretar danos ao meio ambiente, além de desperdício de produtos com grande potencial de reaproveitamento.

A água branca provém da seção de formação da máquina de papel. Devido ao excesso de água no processo ocorre perda de fibra na máquinas de papel, correspondendo ao volume de efluente líquido de água branca drenado e não reaproveitado, que posteriormente segue para a estação de tratamento de efluentes da indústria.

Uma das formas de se aprimorar a qualidade final de efluentes de indústria de papel é tratar com elevada eficiência os efluentes gerados na máquina de papel (água branca) antes de serem encaminhados para as subseqüentes etapas do tratamento. Para isso o uso de recuperadores de fibras como tratamento primário na linha de processo reduz a presença de fibras nos efluentes, o que contribui na melhoria do tratamento biológico e na redução da produção de lodo gerado na ETE da indústria. Este efluente proveniente dos recuperadores de fibras é definido como água clara, e usualmente ainda apresentam elevada concentração de fibras passíveis de serem removidas em sistemas mais eficientes de tratamento.

A recuperação de água e fibras do processo de fabricação de papel, particularmente do sistema da máquina de papel, se configura em uma medida de produção mais limpa, de grande importância econômica e ambiental.

Neste contexto, o que tem sido amplamente empregado nas indústrias papeleiras é a instalação de tanques de flotação por ar dissolvido (FAD), filtros e decantadores como forma de tratamento primário. A FAD se destaca pela sua excelente remoção de partículas suspensas

e coloidais, apresentando grande potencialidade no tratamento de água branca e recuperação de fibras, com valores típicos de remoção de sólidos suspensos entre 70 até 98%.

Com o objetivo de se remover ou recuperar as fibras de celulose, pode ser aplicado o processo de coagulação/floculação e flotação, que é iniciado com a aplicação de coagulante, o qual promove a desestabilização química das partículas suspensas presentes no efluente. Sais de ferro ou alumínio, cal e polímeros orgânicos sintéticos ou naturais são alguns dos coagulantes que podem ser empregados neste processo químico. Após inicia-se a floculação e logo em seguida ocorre a separação entre flocos e o meio líquido.

Neste sentido, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho da flotação por ar dissolvido no tratamento primário de efluente água clara (água branca pré-tratada) gerado na produção de dois tipos de papel (*print* e *gloss*).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar a remoção de fibras de celulose e sólidos suspensos de efluente água clara de uma máquina de papel empregando a flotação por ar dissolvido (FAD).

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as águas claras geradas no processo de fabricação de dois tipos de papel (*print* e *gloss*) da indústria em estudo;
- Avaliar o desempenho da flotação por ar dissolvido na remoção/recuperação de fibras, sólidos suspensos, sólidos totais, cor, turbidez e matéria orgânica presentes nos efluentes da máquina de papel;
- Determinar as melhores condições operacionais de velocidade de flotação;
- Avaliar o desempenho da flotação por ar dissolvido utilizando polímero catiônico e encontrar a dosagem ótima com base em ensaios de flotatestes.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A indústria papelera

Papel é uma folha de fibras de celulose, água e grande quantidade de insumos adicionados com finalidade de fornecer certas qualidades específicas para o uso final. A massa de fibras utilizada para a fabricação de papel pode ser proveniente de duas origens: fibras virgens, as quais são extraídas por processos químicos ou mecânicos, ou fibras recicladas, sendo estas produzidas pelo reprocessamento de papéis recuperados (ALEXANDERSSON, 2003).

A celulose é a principal matéria-prima para a produção de papéis, constituindo cerca de 80% da composição do papel. A matéria prima mais comum na produção de papel e celulose é a madeira, proveniente de espécies de eucalipto e pinus. Os dois tipos de celulose mais utilizadas são as de fibra curta e de fibra longa. A madeira do eucalipto é a principal matéria-prima para o processo de produção de celulose de fibra curta, com 0,5 a 2 milímetros de comprimento. Essas fibras são ideais para a produção de papéis como os de imprimir e escrever e de fins sanitários. A celulose de fibra longa, originária de espécies coníferas como o pinus, tem comprimento entre 2 e 5 milímetros. É utilizada na fabricação de papéis que demandam mais resistência, como os de embalagens e nas camadas internas do papel cartão, além do papel jornal (IBÁ, 2014).

3.1.1 Importância econômica e social

A participação da indústria de papel e celulose no Produto Interno Bruto (PIB) nacional e industrial no ano de 2012 foi de 0,8% e de 3,8%, respectivamente, somando cerca de US\$ 7 bilhões em exportações de papel e celulose no ano de 2013 (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2013).

Segundo levantamento realizado pelo estudo, o setor conta atualmente com 220 empresas em atividade em 540 municípios, localizados em 18 estados. São 167 fábricas de papel, 28 de celulose e 27 de pasta de alto rendimento, gerando cerca de 128 mil empregos diretos. Os estados de São Paulo e Paraná se destacaram no cenário nacional como detentores de 61 e 50 indústrias, respectivamente (BRACELPA, 2013).

Em 2013, o consumo brasileiro de madeira de árvores plantadas para uso industrial foi de 185,3 milhões de metros cúbicos, o que representou aumento de 1,8% em relação ao consumo de 2012. Destaca-se, nesse contexto, que a madeira utilizada por essa indústria é extraída exclusivamente de reflorestamentos destinados a esse setor, sendo que o segmento de celulose e papel corresponde a 35,2% do consumo total de madeira in natura (IBÁ, 2014).

A maior parte da área de plantios de árvores (61%) localiza-se na China, Índia e Estados Unidos. No Brasil, existem 7,6 milhões de hectares de árvores plantadas para fins industriais, porém o Brasil leva vantagem devido a atual produtividade das florestas de rápido crescimento, com uma estimativa de 41 m³/ha/ano (eucalipto), comparado ao Chile e Uruguai, ambos com produtividade de eucalipto de 25 m³/ha/ano. Segundo a Bracelpa (2013) o potencial de produtividade do eucalipto no Brasil poderá chegar a 71 m³/ha.ano no futuro.

Segundo dados levantados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2013), entre 2003 e 2013, o custo da madeira para produção de celulose de fibra curta (eucalipto) no Brasil aumentou 93% em dólar. Em 2013, o Chile foi o país com o menor custo de produção da madeira entregue na fábrica, cerca de 18% inferior ao do Brasil. Justificando assim a necessidade da indústria investir em pesquisas e tecnologias que auxiliem na otimização da produção brasileira, para se manter no mercado com preço mais competitivo e aumentar seu potencial produtivo.

Os plantios de árvores para fins industriais representam uma importante cadeia produtiva no cenário brasileiro, cujo maior benefício ao país pode ser resumido no tripé da sustentabilidade – econômico, social e ambiental (BRACELPA, 2013).

Em 2013, o Brasil ocupou o 5º lugar no ranking de área certificada do sistema de certificação florestal do *Forest Stewardship Council*, ficando atrás somente do Canadá, Rússia, Estados Unidos e Suécia. Na modalidade de Cadeia de Custódia, o Brasil registrou 1.030 certificados e ocupou o 8º lugar no ranking geral. O segmento brasileiro de celulose e papel possui a maior área de florestas certificadas entre os segmentos de base florestal do país. Segundo IBÁ (2014), a área total certificada é de 5,4 milhões de hectares.

No mundo, as grandes empresas produtoras de celulose e papel do Hemisfério Norte mostram-se extremamente competitivas nas operações industriais especializadas, pesquisas industriais e tecnológicas. Todavia, a indústria brasileira leva vantagem nas etapas iniciais da cadeia produtiva, basicamente na fase de plantio de florestas homogêneas e na logística. O tempo de maturação de uma árvore, do seu plantio ao corte, determina um claro diferencial de

custos. No Brasil, o eucalipto, que compõe a base florestal das empresas brasileiras, pode ser cortado entre seis e sete anos, enquanto no norte da Europa os pinheiros não levam menos de 30 e 40 anos para estarem prontos para a colheita (FONSECA, 2003).

Além das características de solo e clima, outro fator que propiciou o desenvolvimento do setor de árvores plantadas no Brasil foi o grande investimento em tecnologia por parte das empresas e instituições de pesquisa. Essa vantagem de custos tem sido reforçada também pela realização de investimentos na modernização do parque industrial e na mão de obra altamente qualificada (BRACELPA, 2013).

Algumas das razões para os altos níveis de produtividade florestal são atribuídos aos avanços tecnológicos encontrados na área de genética, biotecnologia, matéria-prima de alta qualidade, planejamento socioambiental, manejo florestal e rotação de áreas plantadas. Como resultado dessas pesquisas, as produtividades florestais do eucalipto e do pinus aumentaram 83% e 100%, respectivamente, entre 1980 e 2011 (BRACELPA, 2013). Segundo a ABRAF (2013), a produtividade de árvores folhosas e coníferas em 2013, no Brasil, foi de 38,1 e 31,1 m³/ha.ano respectivamente.

O Brasil é um grande exportador de pastas químicas produzidas a partir de fibras curtas e submetidas ao processo de branqueamento. Em 2013, o preço médio da celulose Kraft branqueada de eucalipto na Europa Ocidental atingiu US\$ 795 por tonelada, valor 4,8% superior à média de 2012 (IBÁ, 2014).

O consumo aparente de celulose aumentou 4,3% em 2013, sendo este um indicador que dimensiona a demanda doméstica. As exportações do segmento de celulose e papel totalizaram US\$ 4,7 bilhões. Em termos de volume total, foram exportados 9,4 milhões de toneladas de celulose, com as principais exportações sendo para a Europa 41%, China 30% e América do Norte 20% (BRACELPA, 2013).

Em 2013 o consumo aparente brasileiro *per capita* de papel era de 48,6 kg por ano, consideravelmente baixo ao comparado com: Finlândia (280,6 kg/ano); Alemanha (242,6 kg/ano); Estados Unidos (240,2 kg/ano) e Chile com 79,2 kg/ano (BRACELPA, 2013).

Os papéis para embalar, imprimir e escrever são os tipos mais produzidos e consumidos no Brasil e o país é um grande exportador desses tipos de papéis. Em 2013, destaca-se o aumento nas vendas de papel *tissue* em 5%. Já o consumo de papéis imprensa e de imprimir e escrever reduziu 14% e 5%, respectivamente (IBÁ, 2014).

Os principais mercados do papel brasileiro no exterior, em 2013, segue com a América Latina como o principal consumidor, destino de 55% das exportações do setor, seguida pela Europa com 15% e América do Norte com 13%, as quais totalizaram 5,7 milhões de toneladas resultando em um ganho de US\$ 1,3 bilhão para o setor (BRACELPA, 2013).

A taxa de recuperação de papéis recicláveis, que corresponde ao volume de aparas recuperadas no país dividido pelo consumo aparente de papel, cresceu 20% no decorrer dos anos de 1990 a 2012. Chegando a recuperar 14.500 toneladas de papel no ano de 2012, correspondente a uma taxa de recuperação de papéis de 45,5% (BRACELPA, 2013).

As regiões Sul e Sudeste concentram a maior parte da produção de celulose e papel. Em 2012, os maiores estados em produção de pastas de celulose foram São Paulo (25,3% do total), Espírito Santo (17,1%), Bahia (17%) e Paraná (9,8%). No que diz respeito ao destino da produção brasileira de pastas de celulose, 26,7% correspondem ao consumo interno dos produtores integrados. Do restante, 61,4% são exportados e apenas 11,9% são vendidos para produtores de papel no mercado interno (BRACELPA, 2013).

Segundo a Bracelpa (2013), os estados com maior produção de papel foram São Paulo (41% do total), Paraná (20,8%), Santa Catarina (19,2%), Bahia (4,9%) e Minas Gerais (3,5%). Da produção total de papel em 2013, 53,9% corresponderam a vendas para o mercado interno, 27,9% foi para consumo próprio, sobretudo de papéis de embalagem e 18,2% foram exportados (BRACELPA, 2013).

O setor se mostra especialmente estratégico para o país pelos fatores já expostos, por seu lado ambiental forte e por ser um setor da indústria florestal extremamente intensivo em energia, em várias formas como: biomassa, energia elétrica, óleo combustível, vapor, gás natural, licor negro entre outros (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2013).

O histórico da matriz energética do setor comprova o empenho da indústria na redução do consumo de fontes fósseis e aumento de fontes renováveis. Por exemplo, entre 1970 e 2012, a participação percentual de licor preto na matriz energética do setor aumentou de 17,9% para 66,2%. O consumo de óleo combustível, que representava 44,6% da matriz energética do setor em 1970, caiu para apenas 4% em 2010. O uso de biomassa teve uma redução de 31% na matriz energética da indústria de papel e celulose. Os dados indicam que o componente fabril do setor investe na transição para uma economia de baixo carbono (BRACELPA, 2013).

Como apresentado anteriormente, a competitividade da indústria nacional é inegável no que diz respeito à produtividade das florestas e ao processo produtivo das indústrias brasileiras. O desafio é manter-se competitivo com a inclusão de novos processos tecnológicos e na agregação de valor ao que é produzido em território nacional. Algumas estratégias nesse ponto são: redução de desperdícios, uso de vapor d'água, monitoramento e manutenção dos equipamentos, recuperação de condensado, uso de novas tecnologias e investimento em pesquisas para o desenvolvimento de novas soluções para o setor (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2013).

3.2 Processo produtivo

3.2.1 Produção do papel a partir de fibra virgem

Nos processos de polpação, a matéria prima é transformada em fibras individuais. A madeira é a principal matéria-prima, mas, outras matérias-primas não lenhosas também podem ser utilizadas (ALEXANDERSSON, 2003).

O principal processo químico para extração de fibras virgens da madeira é o processo Kraft, onde a madeira é cozida em digestores sob pressão e temperaturas controladas. Neste processo é alcançado entre 50 e 60% de rendimento (NAVARRO, 2004).

Nas fábricas de papel integradas, a celulose é armazenada na forma de suspensão em tanques que alimentam as máquinas de papel. Quando a fábrica não é integrada, a celulose utilizada no processo é fornecida na forma de fardos por outra fábrica (AMARAL, 2008).

Segundo Nunes (2007), o processo de produção de papel pode ser dividido em 4 estágios distintos:

1. Desagregação da pasta seca: A fabricação do papel a partir de fibra virgem, inicia-se no desagregador, onde a pasta celulósica seca, que é recebida em fardos, é colocada no tanque de mistura chamado de *Pulper*, juntamente com água e por meio de agitação transforma-se em uma suspensão diluída homogeneizada. Neste estágio podem ser adicionadas cargas minerais, aditivos, entre outros, dependendo das características que se pretende no produto final. Cada tipo de papel a produzir tem uma formulação específica de matérias primas a utilizar e respectivas quantidades. Também pode ocorrer desperdício

interno nesta fase do processo. Neste tanque, a massa, cuja consistência pode variar de 2 a 4%, é bombeada para um tanque pulmão (NUNES, 2007).

2. Refinação da suspensão de pasta: Após a desagregação da polpa celulósica, a pasta é direcionada para a refinação na qual a fibra sofrerá um tratamento de fibrilação, aumentando sua área superficial. O refinador tem por função o tratamento da fibra celulósica para melhorar a resistência no papel. Através de uma quebra das fibras obtém-se uma suspensão com tamanho desejado, de acordo com o papel que se pretende formar. Após a refinação a suspensão de fibra é direcionada para o tanque de mistura, onde se inicia a adição de outros componentes químicos que irão constituir o papel (DRUMOND, 2004).

3. Depuração da massa: Do tanque de mistura a massa é direcionada para o sistema de depuração ou limpeza fina composta de limpadores centrífugos e depuradores pressurizados. A fase de depuração tem como finalidade fornecer a última limpeza da massa antes desta ser alimentada na máquina de papel (DRUMOND, 2004).

4. Produção de papel: Na máquina de papel (Figura 1), da caixa de entrada a massa é direcionada em forma de jato à uma mesa plana que distribui a suspensão de fibras de forma homogênea sobre uma tela, tal tela possui elementos para a drenagem da água da suspensão de fibras, passando de uma concentração de cerca 0,5% para cerca de 20% na saída da tela (ANDRIONI, 2006).

As próprias fibras, após depositadas na tela, dificultam a drenagem da água e ficam sujeitas a perdas, geralmente finos, que passam pela tela. A água proveniente na máquina de papel, especialmente da parte úmida da produção (Figura 1), é chamada de água branca, devido à coloração produzida por sólidos em suspensão e outros componentes do papel perdidos no efluente, como cola, amido, carbonato de cálcio e corantes. Existem, no entanto, técnicas para recuperar estas fibras e retorná-las ao processo (NUNES, 2007).

O papel, ainda com um elevado teor de umidade, passa por várias baterias de rolos aquecidos a vapor onde é secado (Figura 1). A umidade do papel na saída da secagem varia de 3 a 8% dependendo do tipo do papel a ser fabricado. Finalmente a folha é bobinada (SILVA, 2013).

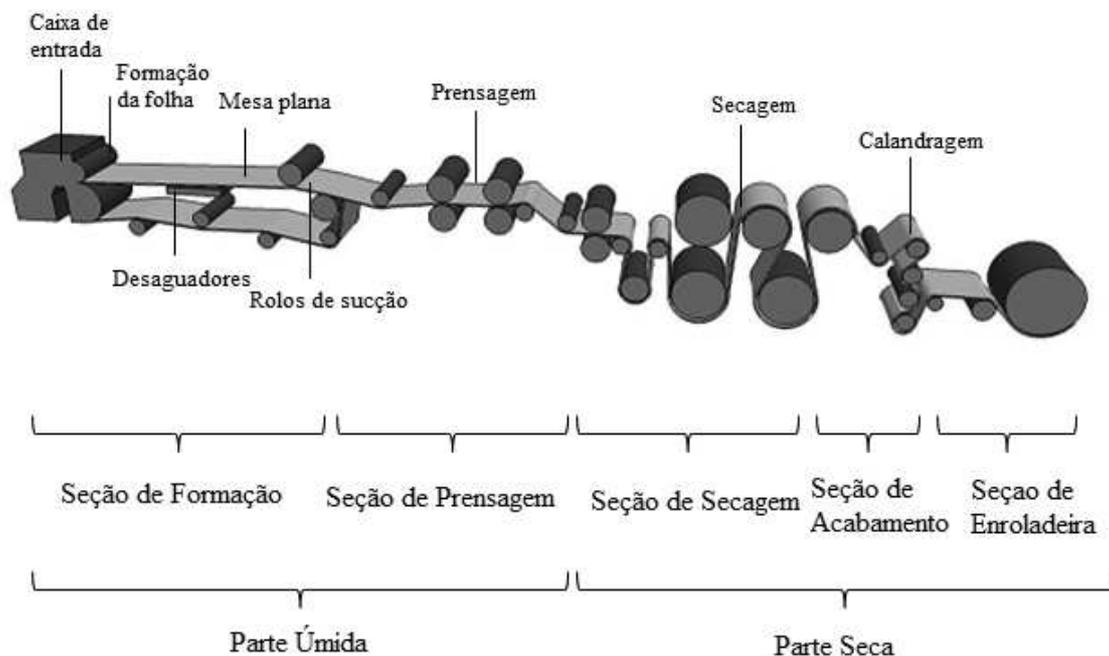


Figura 1. Esquema geral de uma máquina de papel.

Fonte: Autor (2015)

Um resumo das etapas da fabricação do papel a partir da fibra virgem está na Tabela 1.

Tabela 1. Etapas da produção do papel a partir de fibras virgens.

| Processo | Etapas | Funções |
|-------------|--------------------------------------|---|
| Parte úmida | Seção de formação (Caixa de entrada) | Responsável pela distribuição da suspensão de fibras (massa) sobre a tela formadora. |
| | Seção de formação (Mesa plana) | Onde é formada a folha. Consiste numa mesa propriamente dita com suporte e colunas de aço, sobre o qual corre a tela formadora (de plástico ou metal). |
| | Seção de prensagem | A folha de papel sai da mesa plana já formada, porém 80 a 85 % da sua constituição é água. A finalidade das prensas é retirar a quantidade máxima de água da folha antes de submetê-la a secagem por calor. |
| Parte seca | Seção de secagem | Setor da máquina de papel onde se faz a secagem final da folha e realiza-se a cura das resinas adicionadas. |
| | Seção de acabamento (Calandra) | Usada para o acerto da espessura e aspereza do papel. |
| | Seção de enroladora (Enrolamento) | É a última seção da máquina de papel. Neste ponto, o papel é enrolado em bobinas de tamanho determinado. No caso de cartões, esses podem ser cortados em folhas. |

Fonte: adaptado de (AMARAL, 2008)

3.3 Tratamento de efluentes

3.3.1 Tratamento de efluentes líquidos em indústria de papel e celulose

No Brasil, o consumo médio de água nas fábricas de celulose que utilizam o processo Kraft é de aproximadamente 60 m³/tsa, valor este que tende a aumentar em fábricas mais antigas, ou, em fábricas mais modernas pode diminuir a níveis de até 30 m³/tsa. Nos últimos anos a indústria de papel e celulose, está sendo obrigada a fazer modificações e adaptar os seus processos de produção, para um melhor desempenho ambiental, cumprindo as exigências legais (MIELLI, 2007).

Mielli (2007) destaca que o tratamento de efluentes líquidos na indústria de celulose e papel é composto, geralmente, por quatro etapas distintas com diferentes objetivos:

1. Preliminar: Seu objetivo é remover os sólidos grosseiros. Geralmente, são adotados dois tipos de tratamento preliminar que são o resfriamento do efluente em torres de resfriamento, que algumas vezes chega à estação com até 45 °C e a remoção dos sólidos grosseiros, como areia e resíduos do pátio de madeira, como cascas, galhos, terra, areia, etc. A remoção de sólidos grosseiros é realizada através de caixas de areia, normalmente não é necessária nas indústrias de papel, embora haja a necessidade às vezes, para o tratamento setorial no pátio de madeira no caso das indústrias de celulose e papel integradas.

2. Primário: Seu objetivo é remover os sólidos em suspensão. Os sólidos suspensos são um dos principais poluentes encontrados nos efluentes líquidos das fábricas de papel e celulose. É recomendável que a remoção de sólidos suspensos ocorra antes do tratamento biológico secundário, pois o excesso de sólidos suspensos pode prejudicar significativamente a eficiência do tratamento. Essa remoção é feita, geralmente, por meio de decantação por gravidade (sedimentadores), flotores, peneiras, filtros, etc. Os sólidos suspensos nos efluentes de fábricas de papel e celulose são basicamente fibras de celulose, aditivos usados na fabricação de papel, e, quando existentes, materiais provenientes do revestimento de papéis.

3. Secundário: O objetivo principal é reduzir a carga orgânica solúvel. Os principais tipos de tratamentos secundários biológicos utilizados pelas indústrias de papel e celulose são:

- Lagoas de estabilização;
- Lagoas aeradas;

- Lodos ativados;
- Filtros biológicos.

4. Terciário: O objetivo deste último estágio é a remoção adicional de poluentes em águas residuárias, como AOX, lignina, DBO, DQO, cor, etc., que não foram totalmente removidos no tratamento biológico anterior, antes de sua descarga no corpo receptor, essa operação é também chamada de “polimento”. Os processos de tratamento terciário mais utilizados compreendem:

- Microfiltração e ultra filtração;
- Filtração;
- Absorção por carvão ativado;
- Processos oxidativos avançados;
- Cloração ou ozonização;
- Processos de absorção química;
- Troca iônica;
- Osmose reversa;
- Eletrodiálise.

3.4 Recuperação de fibras

3.4.1 Perdas de fibras na máquina de papel

A perda de fibras está ligada ao consumo de água na fabricação de papel. A maior parte das máquinas de papel não possui circuito fechado de águas. Alimenta-se água ao processo para diluição da polpa, que ao passar pela máquina de papel é drenada na mesa, tornando-a rica em fibras. A entrada de água fresca no processo é proporcional ao volume de efluente a ser tratado em um recuperador de fibras. Normalmente, quanto mais finas são as classes de papel, maior é o consumo de água e conseqüentemente, maior é a diluição dos despejos industriais (BRYANT et al., 1992; GRAVES; JOYCE, 1994).

O processo de fabricação de papel tem na celulose o maior percentual em massa e em custo. A celulose constitui cerca de 80% da composição do papel e contribui com aproximadamente 50% no custo total do papel. Isto faz com que a perda de fibras nas

máquinas de papel seja algo a ser minimizado (SANTA MARIA CIA DE PAPEL E CELULOSE, 2010).

A água branca provém da seção de formação da máquina de papel. Devido ao excesso de água no processo e por não haver consumidores suficientes, ocorre a perda de fibra nas máquinas de papel, correspondendo ao volume de efluente líquido de água branca, drenado e não reaproveitado no processo, que posteriormente segue para a estação de tratamento de efluentes da indústria (SILVA, 2000).

A água branca contribui com cerca de 700 a 1400 mg/L de DBO e de 1900 a 3200 mg/L de DQO, que deverão ser removidos nos processos seguintes de tratamento de efluentes da indústria (LACORTE et al., 2003).

Um problema relacionado ao tratamento de efluentes das indústrias de papel e celulose é a presença de material em suspensão, substâncias orgânicas dissolvidas e material não sedimentável. Este último geralmente se apresenta na forma coloidal e é constituído principalmente por fibras finamente divididas, cola, amido, tintas e corantes, que elevam a cor, turbidez e a carga orgânica do efluente (FONSECA, 2003).

Segundo Foelkel (2008), as perdas de fibras em máquinas de papel podem ocorrer devido à troca de tipo de papel fabricado, limpezas da máquina e tanques, quebra de papel, falhas na fabricação, excesso de água branca, transbordos de tanques e resíduos de papéis e fibras que caem ao chão da fábrica e são levados até ao efluente por lavagens feitas por operadores. As perdas ficam em torno de 1 a 3% de todas as fibras que entram no processo. Sendo esse desperdício calculado diretamente relacionado à falta de eficiência na operação, gerando grandes quantidades de perdas de fibras que muitas vezes não são detectadas e poderiam ser evitadas.

Durante o processo de fabricação do papel, também ocorrem perdas provenientes, na maioria das vezes, de rejeitos de depuradores e do sistema de recuperação de fibras da água branca, proveniente da máquina de papel, que nem sempre atingem 100% de eficiência, logo estas perdas são encaminhadas para o efluente e na etapa de tratamento biológico, misturadas com diversas impurezas, irão compor o lodo primário. Enfim, uma matéria-prima que era nobre e com alto valor agregado, acaba virando um resíduo sólido a descartar (FOELKEL, 2008).

Segundo Foelkel (2008), reduzindo as perdas de fibras no processo temos uma série de vantagens ambientais, sociais e econômicas, tais como: redução dos custos unitários de

fabricação; otimização da utilização das matérias-primas; menor impacto ambiental atendendo as exigências dos órgãos ambientais; menor poluição hídrica; menor geração de resíduos sólidos; menor necessidade de áreas de aterro para dispor os resíduos sólidos, que em sua grande maioria são fibras desperdiçadas no processo produtivo.

A reintrodução de matéria-prima no processo por meio da recuperação das fibras de celulose presentes na água branca, na forma de tratamento primário, ou seja, na área geradora do efluente, traz como principal benefício o retorno de fibras ainda limpas para reprocessamento através do sistema de refugo do preparo de massa e produção de água clarificada, substituindo boa parte o uso de água tratada, que seria utilizada na produção (FOELKEL, 2008).

Ainda, segundo Foelkel (2007), a solução ideal não está só em encontrar um uso para o lodo primário, como é muito comum no setor. Deve-se buscar também alternativas para evitar que as fibras sejam direcionadas para o decantador primário da estação de efluentes. Pois quando a recuperação é feita na área onde ocorre a sua perda, as fibras terão a mesma qualidade das que estão no início do processo. Logo, podem voltar para os pontos onde foram perdidas, facilitando sua reutilização.

Considerando os testes de avaliação da perda de fibras, uma consideração importante é que medições de DQO (Demanda Química de Oxigênio) e de SST (Sólidos Suspensos Totais) estão associadas com a medição de fibras (FOELKEL, 2007).

3.4.2 Sistemas de recuperação de fibras

Os recuperadores de fibras são fundamentais no controle de custos da fabricação de papel. Por exemplo, a retenção de fibras na tela formadora é cerca de 90%, sendo que 10% de tudo que entra na tela, vai para a estação de tratamento de efluentes (ETE), caso não seja recuperado no processo. Para uma indústria que produz cerca de 120 ton/dia, 9,6 toneladas de matéria prima, da qual 4,8 toneladas são fibras celulósicas, por dia iriam para a ETE. Ou seja, não há possibilidade de uma indústria de papel funcionar sem um sistema de recuperação de fibras. A recuperação, além de possibilitar que o máximo possível de fibras e cargas insolúveis seja devolvido ao sistema para que possa ser reutilizado, também trata a água para sua reutilização (chuveiros, diluição, etc.). A qualidade das fibras não deve ser afetada, assim como a qualidade do produto final (SANTA MARIA CIA DE PAPEL E CELULOSE, 2010).

Em relação à recuperação das fibras, o princípio básico está em evitar e prevenir que essas fibras sejam desperdiçadas no processo. Isso se faz possível com a manutenção adequada dos equipamentos, com operadores conscientes e treinados. Mas, principalmente, através da análise adequada de todos os pontos de escape de processo, podendo também definir as melhores práticas para impedir as saídas de águas brancas arrastando fibras nos efluentes. Depois de ocorrido o desperdício, a solução mais viável é recuperar as fibras que escapam pelos efluentes e que se direcionariam à ETE, que iriam virar o indesejado lodo primário. Para isso, existem diversos meios recuperadores de fibras, tais como filtros, flotadores, peneiras, decantadores, clarificadores, etc. Todos possuem sua utilidade, sua eficiência característica e resultam em recuperação de no mínimo 60 a 70% do material fibroso contido na água branca. Em situações otimizadas, a recuperação das fibras atinge percentagens acima de 95% (FOELKEL, 2007).

Em geral, há uma série de métodos e equipamentos para recuperação de fibras, alguns de tecnologia antiga e outros mais recentes. Estes recuperadores podem ser divididos em grupos, de acordo com seu princípio operacional, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Processos utilizados para recuperação de fibras.

| Filtração | Flotação | Sedimentação |
|--------------------------|---------------------|-----------------------|
| Filtros de discos | Flotador circular | Decantador cônico |
| Filtro de tambor | Flotador retangular | Decantador cilíndrico |
| Peneira estática | | |
| Filtro de membrana | | |
| Filtro de espiral rígido | | |

Fonte: Foelkel (2007)

A avaliação do desempenho global dos diversos tipos de recuperadores de fibra deve ser feita para cada tipo de equipamento em particular, dependendo das condições do efluente, espaço disponível e orçamento. No entanto, para melhor entendimento, na Tabela 3 encontra-se uma comparação entre os três sistemas básicos de recuperação de fibras mais utilizados nas indústrias do setor.

Tabela 3. Comparação entre os principais processos de recuperação de fibras.

| Descrição | Filtração | Flotação | Sedimentação |
|--|------------------|-------------------------------------|--|
| Tempo de retenção | Baixo | Baixo | Alto |
| Necessidade de área | Baixa | Baixa | Alta |
| Facilidade para troca de papel | Boa | Satisfatória | Insatisfatória |
| Necessidade de produtos químicos | Não | Quase obrigatoriamente | Eventualmente |
| Sensibilidade a variação de fluxo, propriedades químicas e concentração da água branca | Baixa | Alta | Alta |
| Facilidade de reaproveitamento das fibras recuperadas | Boa | Pouco satisfatória (presença de ar) | Pouco satisfatória (presença de impurezas) |
| Consistência da fibra recuperada | Alta | Baixa | Baixa/Média |
| Custo de manutenção | Baixo | Baixo | Muito baixo |

Fonte: adaptado de Foelkel (2007)

3.5 Flotação na recuperação de fibras

Segundo Di Bernardo e Centurione Filho (2003) a flotação pode ser descrita como um processo físico-químico, no qual é possível separar partículas sólidas ou líquidas de uma fase líquida a partir da introdução de pequenas bolhas de gás, normalmente o ar. O ar é dissolvido em água num saturador sob pressão (2-5 Kgf/cm²). Quando a água saturada com ar é injetada à pressão atmosférica na célula de flotação, o ar em excesso é liberado sob a forma de microbolhas (30-100 µm), essas microbolhas aderem à superfície das partículas em suspensão, aumentando o seu empuxo, promovendo assim o processo da flotação, onde ocorre o movimento ascensional dessas partículas em suspensão em direção à superfície da fase líquida, para favorecer a coleta das mesmas em uma operação de raspagem superficial.

Geralmente o sistema de flotação por ar dissolvido é composto, basicamente, por uma câmara de saturação de ar, um compressor, um tanque de flotação e um raspador de materiais flotados na superfície. Os fatores operacionais que mais interferem na eficiência de um sistema de flotação por ar dissolvido são: a floculação, dosagem de coagulantes e polímeros, a

pressão de saturação, modelo de bocais difusores, a distribuição do tamanho das microbolhas de ar, taxa de aplicação e a quantidade de ar fornecida ao sistema (PIOLTINE, 2009).

Durante o estudo do tratamento de efluentes de uma fábrica de papel para imprimir, visando o reuso por flotação e sedimentação, Constanzi e Daniel (2002) evidenciaram alguns benefícios da flotação por ar dissolvido em comparação ao processo de sedimentação:

- Processo compacto e de alta taxa;
- Necessidade de área reduzida;
- Aplicação de dosagens de coagulante e polímero menores que as empregadas na sedimentação, alcançando o mesmo desempenho de remoção de fibras de celulose do efluente;
- Produção de lodo concentrado na superfície do flotador, com maior teor de sólidos;
- Maior facilidade em recuperar o lodo concentrado.

Por outro lado, a flotação por ar dissolvido possui como principal desvantagem o custo relativamente elevado de implantação e operação. É um processo viável a medida em que suas vantagens superem seu custo e complexidade operacional (AISSE et al., 2001).

Lima (2007), relatou que essa tecnologia apresenta-se como uma técnica de grande potencial no tratamento de águas e diversos efluentes, principalmente em função de sua elevada eficiência e alta capacidade dos equipamentos modernos, chegando a tratar até 60 m³/h.

Vários estudos foram realizados com efluentes de indústrias de papel e celulose, com a intenção de remoção e reuso de fibras. Desta forma, o uso de processo físico-químico composto por coagulação, seguido de floculação e flotação tem sido apontado por diversos autores como um importante processo no tratamento de águas residuárias, podendo ser utilizado em vários pontos do sistema de tratamento de efluentes, do tratamento primário ao terciário, desde o afluente bruto até o pós-tratamento (LIMA; REALI, 1997; THOMPSON et al. 2001; CONSTANZI; DANIEL, 2002; SILVA, 2000; QUARTAROLI et al., 2014).

A flotação pode ser realizada em unidades retangulares ou cilíndricas, sendo o efluente clarificado (subnadante) encaminhado à etapa posterior do tratamento, ou ainda reutilizado. O sobrenadante, constituído por fibras e outros componentes do papel é coletado e direcionado ao tanque de preparo de massa. Devido a fatores adversos que reduzem a eficiência da flotação e a sedimentação das partículas nos flotadores, deve-se relacionar a velocidade de flotação (V_f) no ensaio de flotatestes (para as condições de mistura rápida e de floculação

previamente conhecidas) com a turbidez ou cor aparente remanescente do subnadante, possibilitando que seja obtida na unidade em escala a real eficiência de remoção semelhante à observada nos reatores estáticos, com correspondente velocidade de flotação. Em geral o valor de V_f usado no equipamento de laboratório deve ser maior que aquele observado nas unidades em escala real, pois nestas existem os efeitos negativos. Cabe ao executor dos ensaios verificar, para diferentes vazões de funcionamento, qual valor de V_f deve ser adotado sempre que for necessária a execução de ensaios em equipamentos de laboratório (Jar-Test ou Flotateste) (DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2003).

Lima (2007) concluiu que a flotação por ar dissolvido constitui técnica bastante eficiente para o tratamento de efluentes líquidos provenientes de indústria de papel. Durante o estudo, ao comparar dois coagulantes (cloreto férrico e PAC), observou-se que com o PAC foi possível remover de 90% de sólidos suspensos por flotação na maioria dos ensaios.

Constanzi e Daniel (2002) compararam os resultados entre vários ensaios realizados com efluentes de indústria de papel e celulose, utilizando duas tecnologias: sedimentação e flotação, concluíram assim que a flotação foi mais eficiente na remoção de turbidez e SST e necessita de menor área, obtendo-se unidades mais compactas.

Silva (2000) concluiu que utilizando uma pressão de saturação de 4 atm, no processo de flotação, foi possível obter uma eficiência de separação de cerca de 90% de SST, a partir de um efluente contendo 7 g/L de fibras.

Russo (2003) relatou sobre uma importante indústria italiana de papel e celulose, localizadas em Porcari, Lucca, a qual produzia cerca de 300 ton/dia de papel refinado, com uma produção de efluentes finais estimada em 2.000 m³/dia, na qual eram tratados no flotador por ar dissolvido (FAD).

3.6 Principais impactos da indústria de papel e celulose

As indústrias de papel e celulose são um exemplo de indústria que utiliza grandes volumes de água no processo produtivo e geram grande quantidade de efluentes a serem tratados e dispostos corretamente, com características típicas como odores e coloração extremamente forte, substâncias tóxicas e alta carga orgânica (FONSECA, 2003).

No caso de uma planta integrada de fabricação de papel e celulose, o consumo médio de água depende de inúmeros fatores específicos de cada unidade, tendo relação direta com os

fatores operacionais, do projeto, do tipo e da gramatura do papel fabricado. A água utilizada no processo de fabricação de celulose e papel também faz parte do processo de geração de vapor, assim como é uma matéria-prima importante para a lavagem e dispersão das fibras de celulose (MIELI, 2007).

Atualmente, as indústrias de papel e celulose, pressionadas por tendências e exigências de um mercado cada vez mais restrito e competitivo, buscam adequar-se às exigências legais destinadas a proteger o meio ambiente, por meio de ações modificadoras do processo, tais como redução de geração de efluentes na fonte, desenvolvimento de tecnologias para tratamento externo, recuperação e reaproveitamento de efluentes (MIELI, 2007).

3.6.1 Resíduos líquidos gerados nas indústrias de papel e celulose

As indústrias de papel e celulose, principalmente as que utilizam o processo Kraft, geram grande volume de efluentes líquidos, devido à grande quantidade de água utilizada nos processos. Estes efluentes são ricos em sólidos suspensos (principalmente fibras), matéria orgânica dissolvida, cor e, principalmente compostos organoclorados (MIELI, 2007).

De acordo com o processo utilizado na polpação e produção, podem ocorrer variações nas características dos efluentes provenientes da produção papeleira. Entretanto, alguns parâmetros geralmente estão presentes: o elevado teor de matéria orgânica, que ocasiona elevados valores de demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio e lignina, bem como forte coloração e odor (FONSECA et al., 2003).

Segundo Tambosi (2005), no âmbito do tratamento secundário biológico, o sistema de lodos ativados é o mais utilizado para tratar efluentes de indústria de papel e celulose, porém, devido à presença de fibras e compostos organoclorados no efluente, este nem sempre alcança a eficiência esperada. Em alguns casos o sistema de tratamento secundário de lodos ativados ainda não é suficiente para atender as exigências ambientais, necessitando de aprimoramento e auxílio de outras formas de tratamento.

3.6.2 Emissões atmosféricas

As emissões atmosféricas mais significativas, e passíveis de controle da indústria de papel e celulose são provenientes dos processos de branqueamento, recuperação de produtos

químicos, caldeira, forno de cal e secagem da polpa. Entre os poluentes atmosféricos gerados na produção de papel e celulose destacam-se os materiais particulados (MP), óxidos de nitrogênio e de enxofre, compostos de enxofre reduzido total (TRS), cloro e dióxido de cloro, quando usados no branqueamento e compostos orgânicos voláteis (MIELI, 2007).

3.6.3 Geração de resíduos sólidos

Os principais resíduos inorgânicos da indústria de papel e celulose são os dregs, grits e lama de cal do processo de recuperação. Atualmente, grande parte das indústrias do setor possui aterros industriais controlados para a correta disposição final de seus resíduos sólidos, assim como dispõe de mecanismos para a sua coleta seletiva, permitindo o tratamento, reciclagem, reutilização ou valorização energética de parte dos resíduos produzidos, reduzindo assim a necessidade de deposição em aterro sanitário e evitando gastos com transporte e disposição final (BRACELPA, 2013).

É importante considerar que muitas indústrias do setor, ao se preocuparem com a otimização do processo produtivo, com a intenção de evitar ou diminuir a geração de resíduos sólidos, estão inseridas na Política Nacional de Resíduos Sólidos, seguindo a ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final, ambientalmente adequada, do resíduo sólido gerado no processamento do reciclado (BRASIL, 2010).

3.6.4 Considerações à legislação ambiental para efluentes

O interesse em reduzir o consumo de água e o lançamento de efluentes não é somente para cumprir a legislação ambiental, mas também para satisfazer um mercado altamente competitivo e responder a uma opinião pública cada vez mais atenta às questões ambientais. Além disso, a questão é cercada de interesse econômico, principalmente após a promulgação da Lei 9433/97 (que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos) que introduziu os mecanismos do usuário-pagador e do poluidor-pagador.

A Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre condições, padrões, parâmetros e as exigências para a gestão do lançamento de efluentes nos corpos de água receptores, determina que o lançamento de qualquer efluente de fonte

poluidora somente deverá ser lançado diretamente nos corpos receptores após o tratamento, desde que atenda aos padrões determinados na resolução.

O Art. 16 da Resolução CONAMA N° 430/2011, a qual complementa e altera a Resolução n° 357/2005, descreve as condições de lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora da seguinte forma:

- pH entre 5 e 9;
- temperatura menor que 40 °C;
- materiais sedimentáveis até 1 mL/L;
- regime de lançamento com vazão máxima de 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor;
- óleos minerais até 20 mg/L;
- óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/L;
- ausência de materiais flutuantes;
- remoção mínima de 60% de DBO.

Contudo, a Resolução CONAMA N° 357 não explicita valores e limites para a demanda química de oxigênio (DQO). Cabe aos órgãos ambientais no âmbito federal, estadual e municipal, por meio de norma específica ou na documentação do licenciamento da atividade ou empreendimento, estabelecer a carga poluidora máxima para o lançamento de substâncias passíveis de estarem presentes ou serem geradas nos processos produtivos.

A tendência dos últimos anos tem levado a indústria de papel e celulose a fazer modificações e adaptações nos seus processos de produção, para um melhor desempenho ambiental e cumprimento das exigências legais (MIELLI, 2007).

3.7 Coagulantes

A escolha do coagulante e sua aplicação é muito importante no tratamento de efluentes industriais. Os coagulantes mais empregados são os inorgânicos, como por exemplo, o sulfato de alumínio, o cloreto férrico e o sulfato férrico. São também utilizados os coagulantes orgânicos com densidade de carga positiva, também chamados de polímeros catiônicos, que podem ser sintéticos ou naturais. A diferença entre os coagulantes metálicos e os polímeros catiônicos está na sua reação hidrolítica com a água. Nos polieletrólitos, as cadeias polimerizadas já estão formadas quando eles são adicionados no meio líquido. Nos

coagulantes metálicos, a polimerização se inicia no contato com o meio líquido, vindo a seguir a etapa de adsorção dos colóides existentes no meio (DI BERNARDO, 1993).

Um requisito básico da FAD é a necessidade da coagulação e floculação prévia através da adição de produtos químicos como polímeros e sais inorgânicos que levam a formação de flocos, levando a aglomeração dos sólidos suspensos e recuperando, assim, não só as fibras mas parte de outros materiais como cargas e finos (SANTOS, 2006).

A flotação por ar dissolvido é comumente usada na indústria de celulose e papel. Coagulantes e polímeros são as opções preferidas para remoção de turbidez e cor da água residuária. Resultados apresentados demonstraram que eles também são capazes de reduzir a DQO, cor e AOX presentes nestes efluentes (BEN et al., 2003).

Coagulantes e floculantes muitas vezes são utilizados para aumentar a eficácia do processo de flotação por ar dissolvido. Os sólidos são concentrados no material que se acumula na superfície após a flotação, o chamado sobrenadante/lodo (KAYA; KURAMA, 1999).

Os polímeros podem variar no peso molecular, estrutura, intensidade de carga, tipo de carga e composição. Há três tipos de polímeros que podem ser usados: catiônico, aniônico e não iônico. O catiônico é aquele que quando dissolvido em água se ioniza, adquire carga positiva e atua como um autêntico cátion. O aniônico, de maneira semelhante, adquire carga negativa e atua como ânion. O não iônico é aquele que não se ioniza em água. Nos polímeros catiônicos a carga positiva fica ligada ao corpo do polímero, ou seja, à cadeia do mesmo, e nos aniônicos a carga negativa é a que fica ligada ao corpo do polímero (SANTOS FILHO, 1973).

Os polímeros catiônicos em geral são efetivos dentro de uma ampla faixa de pH, cujas características catiônicas permitem a neutralização de cargas negativas presentes na superfície das partículas suspensas em meio aquoso, as quais adquirem cargas positivas. Além disso, por efeitos de adsorção e formação de pontes intermoleculares de partículas em suspensão, é possível formar flocos maiores que serão mais facilmente separados do meio (DI BERNARDO, 1993).

Os coagulantes mais utilizados no tratamento de efluentes, assim como suas funções, faixas de pH e comentários gerais estão listados na Tabela 4.

Tabela 4. Aplicações gerais dos coagulantes no tratamento de efluentes.

| Coagulante | Faixa de dosagem (mg/L) | Faixa de pH | Função | Comentário |
|---|-------------------------|-------------|---|--|
| Al ₂ (SO ₄) ₃ - Sulfato de Alumínio | 75 - 250 | 4,5 - 7,0 | Coagulação de coloides e remoção de fósforo. Águas residuárias com alta alcalinidade e baixa concentração de fósforo. | Cátions polivalentes (Al ⁺³ , Fe ⁺³ , Fe ⁺² , etc.) neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas e os hidróxidos metálicos (Ex: Al ₂ (OH) ₃), ao adsorverem os particulados, geram uma floculação parcial. |
| PAC - Cloreto de Polialumínio | 10 - 200 | 6,0 - 10,0 | Auxilia na formação flocos grandes, rígidos e pesados e na capacidade de remoção de carga orgânica/inorgânica. | |
| FeCl ₃ - Cloreto Férrico | 35 - 150 | 4,0 - 7,0 | Coagulação de coloides e remoção de fósforo. | |
| FeSO ₄ - Sulfato Ferroso | 70 - 200 | 4,0 - 7,0 | Águas residuárias com alta alcalinidade e baixa concentração de fósforo. | |
| Ca(OH) ₂ - Hidróxido de Cálcio | 150 - 500 | 9,0 - 11,0 | Coagulação de coloides. Águas residuárias com baixa alcalinidade e alta concentração de fósforo. | Usualmente utilizado como agente controlador do pH. Porém, os íons cálcio atuam também como agentes de neutralização das cargas elétricas superficiais, funcionando como um coagulante inorgânico. |
| Polímeros Aniônicos e não iônicos | 0,25 - 1,0 | Não muda | Aumenta a velocidade e sedimentação na floculação e aglomera os flocos para filtração. | Geração de "pontes" entre as partículas já coaguladas e a cadeia do polímero gerando flocos de maior diâmetro. |
| Polímeros Catiônicos | 2,0 - 5,0 | Não muda | Coagulação de coloides e ajuda a coagular com um metal. Auxiliar de floculação e de filtração. | Neutralização das cargas elétricas superficiais e incremento do tamanho dos flocos formados (via formação de pontes). Usualmente utilizado no tratamento de lamas orgânicas. |

Fonte: adaptado de Carvalho (2008)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização do efluente objeto de estudo

O sistema de recuperação de fibras, já existente na máquina de papel estudada, é feito por filtração. O volume de água branca gerada no processo passa pelo Filtro de Disco (Figura 2), recuperando parte das fibras e cargas minerais, clarificando a água branca para ser reutilizada. Este efluente, resultado do tratamento por filtração, é denominado água clara.

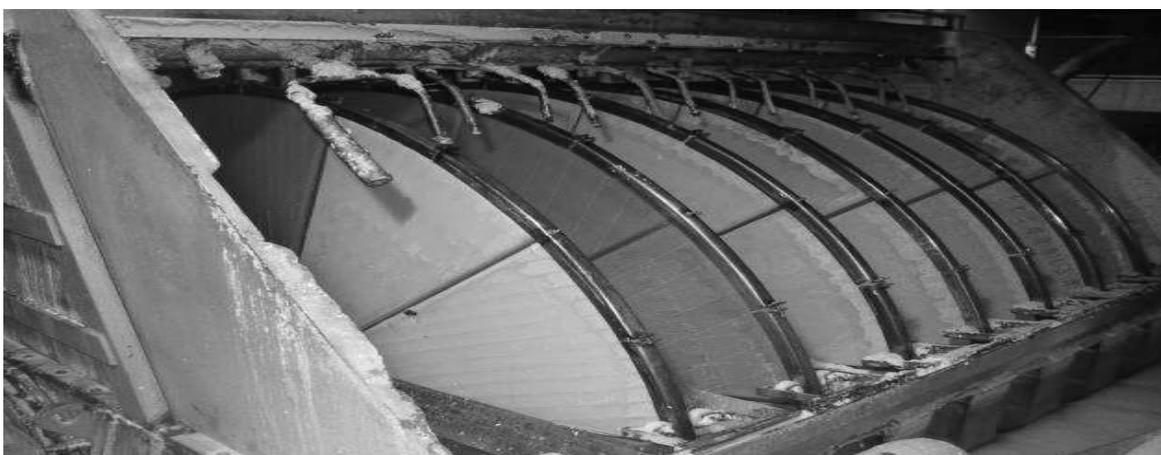


Figura 2. Filtro de disco da máquina de papel.
Fonte: Santa Maria Cia de Papel e Celulose (2010)

O efluente denominado água clara foi coletado na canaleta de saída do sistema de recuperação de fibras da máquina de papel (Figura 3), o qual era conduzido diretamente para a estação de tratamento de efluente (ETE) da empresa. A vazão média do efluente água clara destinado a ETE foi estimada pela empresa em aproximadamente 500 m³/dia e a concentração de sólidos suspensos no efluente é de 350 a 500 mg/L.

Foram realizadas coletas de efluente de acordo com a escala de produção dos dois diferentes tipos de papel estudados *print* e *gloss*, sendo estes os papéis de maior volume de produção e perda de fibras na indústria estudada.

No local da coleta, indicado como água clara na Figura 3, a temperatura na saída do efluente foi verificada e anotada, para que fosse possível reproduzir as mesmas condições em laboratório. O efluente foi coletado em galões de 25 litros, preservado e transportado para o local onde a caracterização e os ensaios foram realizados na sequência.

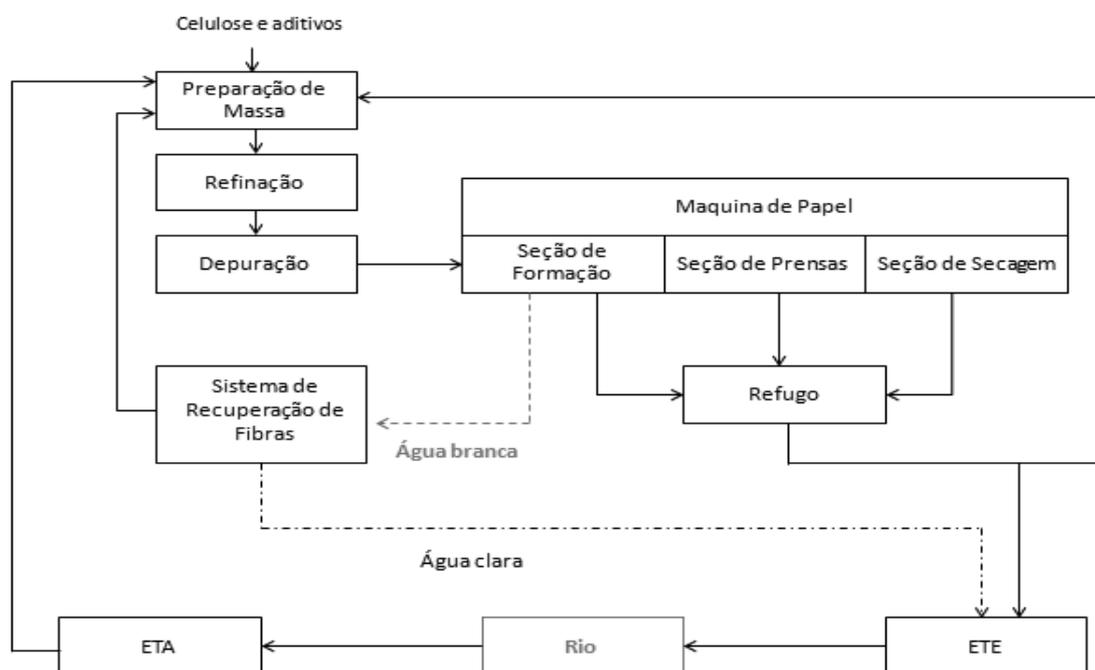


Figura 3. Diagrama simplificado do sistema de geração de água clara.

Fonte: Autor (2015)

4.2 Ensaios de flotação

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Saneamento Ambiental e Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste, *Campus* de Irati-PR.

Foi realizada a caracterização do efluente água clara bruto. Os parâmetros analisados foram: pH, temperatura, demanda química de oxigênio (DQO), turbidez, sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST) e cor aparente. Para os estudos em laboratório, as amostras foram analisadas pelos métodos estabelecidos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19 edition* (APHA, 1998).

O efluente foi submetido ao tratamento por meio de coagulação/floculação/flotação em equipamento flotateste, da marca Nova Ética (Figura 4), com operação em batelada, de acordo com a metodologia proposta por Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002), que se encontra em anexo.

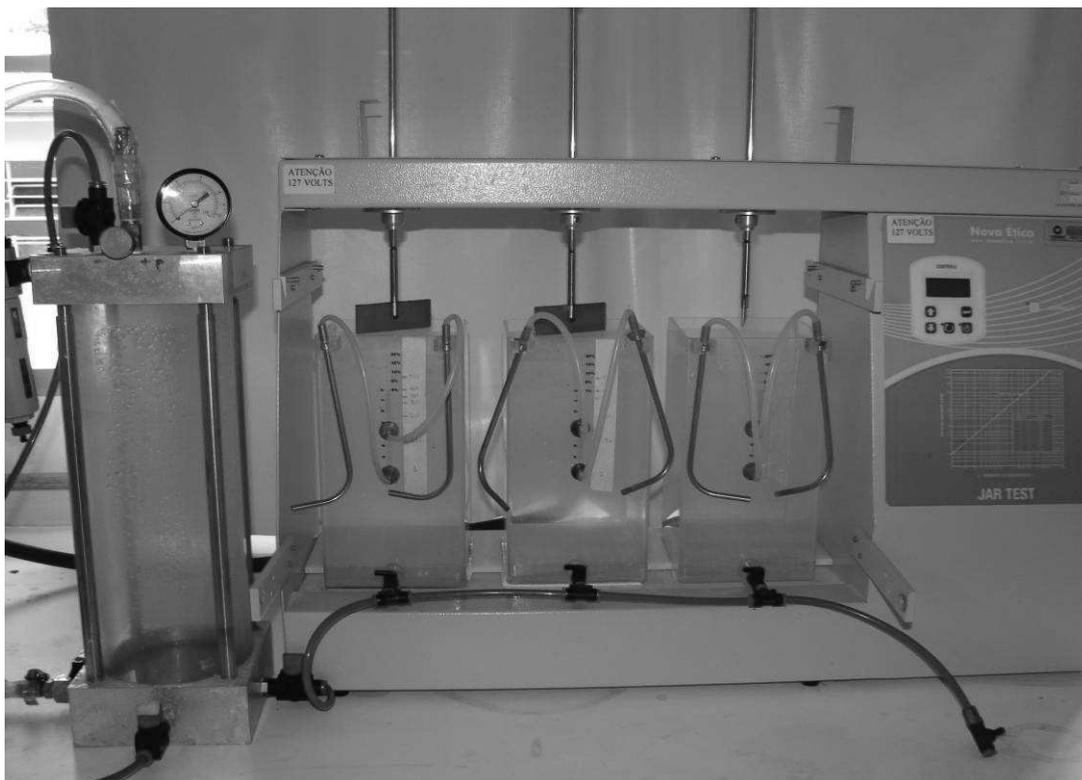


Figura 4. Equipamento flotatestes utilizado na pesquisa.
Fonte: Autor (2015)

O pH foi mantido de acordo com as características naturais do efluente coletado (7,8), para simplificar uma futura implantação do processo de FAD na indústria, não sendo necessário fazer a correção do pH. No momento da coleta, o efluente encontrava-se na temperatura de 37 °C, em laboratório essa mesma temperatura foi ajustada para a realização dos ensaios, utilizando aquecedor de água portátil. Os demais parâmetros foram investigados e adotados no decorrer da pesquisa.

Os parâmetros fixados para a realização de todos os ensaios de flotação estão listados abaixo na Tabela 5. As condições operacionais adotadas foram baseadas segundo valores encontrados na literatura (PENETRA, 1998; SANTOS, 2006; COSTANZI; DANIEL, 2002; PIOLTINE, 2009; QUARTAROLI, 2012) e previamente estudados em uma bateria preliminar de testes realizada em laboratório, visando investigar a viabilidade do uso de polímero catiônico como auxiliar de coagulação e floculação, sendo que o mesmo produto já é utilizado na indústria como auxiliar de retenção na tela de papel. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

Tabela 5. Configurações da flotação por ar dissolvido adotadas para os ensaios.

| Parâmetro | Configuração |
|--------------------------------|---------------------|
| Gradiente de mistura rápida | 500 s ⁻¹ |
| Tempo de mistura rápida | 60 s |
| Gradiente de Floculação | 50 s ⁻¹ |
| Tempo de floculação | 5 min |
| Percentual de recirculação (R) | 20% |
| Pressão de saturação | 5 bar |
| Tempo de saturação | 15 min |

Na Figura 5 encontra-se a grade de ensaios e condições operacionais adotadas na pesquisa.

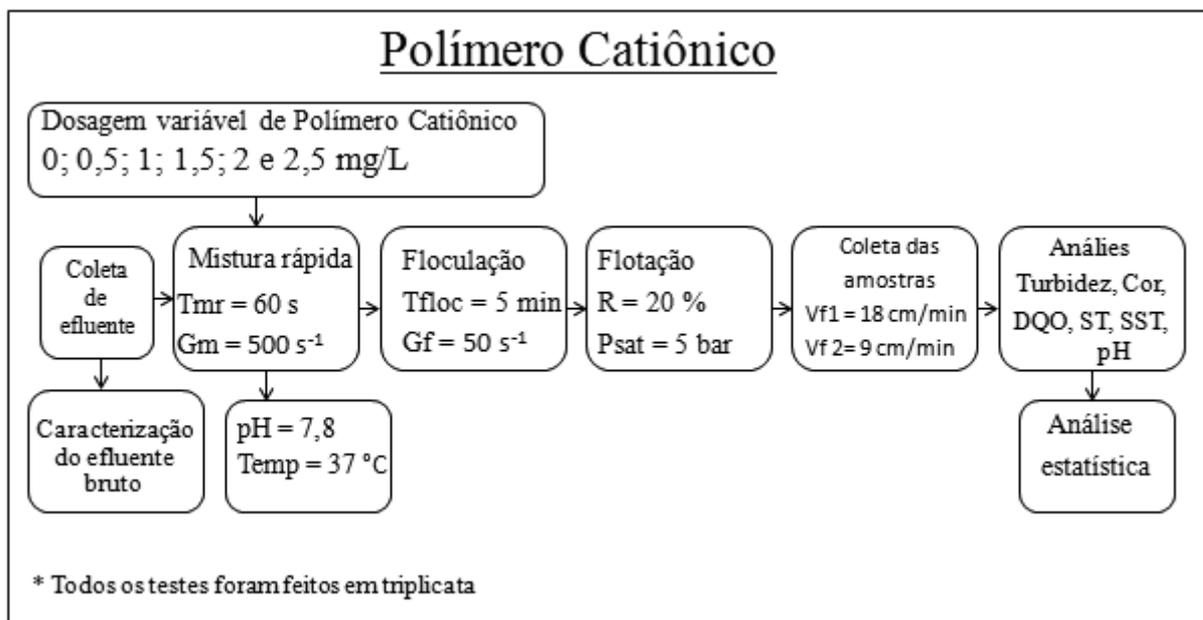


Figura 5. Procedimentos dos ensaios com o flotateste.

Testou-se uma faixa de dosagem de polímero catiônico (0 a 2,5 mg/L) para verificar o desempenho da flotação por ar dissolvido. Juntamente com a dosagem de coagulante,

testaram-se duas velocidades de flotação ($V_{f1} = 18$ cm/min e $V_{f2} = 9$ cm/min), normalmente usadas na literatura (LIMA; REALI, 1997; QUARTAROLI, 2014), bem como os valores de taxa de aplicação referentes a modelos comerciais de flotores encontrados no mercado, buscando assim verificar qual das configurações se comportaria melhor para esse tipo de efluente, buscando otimizar o processo.

Para avaliar a capacidade de remoção de fibras, carbonato de cálcio, amido entre outros produtos utilizados na formação do papel, utilizando a FAD, foram efetuados ensaios para determinação das concentrações de SST, DQO, ST, cor aparente e turbidez da água clara. No âmbito do estudo específico da recuperação de fibras do efluente da máquina de papel foi utilizado o procedimento para determinação da concentração de SST (SILVA, 2013).

A eficiência do tratamento foi avaliada com base na comparação dos mesmos parâmetros determinados na caracterização do efluente, antes e depois do tratamento feito por coagulação/floculação/flotação.

O polímero foi testado a uma diluição de 5%, visando facilitar seu manuseio e aplicação nos ensaios de flotatestes. O produto foi concedido pela indústria onde o estudo foi realizado. Suas características físico-químicas estão listadas na Tabela 6.

Tabela 6. Características físico-químicas do polímero catiônico.

| Polímero Catiônico | |
|---------------------------|---|
| Concentração | Policloreto de Dimetildialilamonio 60% Coagulante Inorgânico 30% |
| Estado Físico | Líquido |
| Cor | Levemente amarelado |
| pH | 3.0 – 6.0 a 10g/l (20 °C) |
| Densidade | 1,0 – 1,2 g/cm ³ (20 °C) |
| Solubilidade | Solúvel em água |

4.3 Análises estatísticas dos dados

O estudo foi feito em um arranjo Fatorial 6 x 2 x 2 - Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), constituído por três fatores (Figura 6). Foram testados dois tipos diferentes de efluente água clara de papel (*print* e *gloss*), variando-se 6 dosagens de polímero catiônico e duas velocidades de flotação 18 e 9 cm/min. Visando encontrar correlação entre variáveis dependentes e os três fatores estudados e se existe interação entre estes fatores

independentes, definiu-se que as variáveis resposta (dependentes) escolhidas foram: pH, cor, turbidez, ST, SST e DQO.

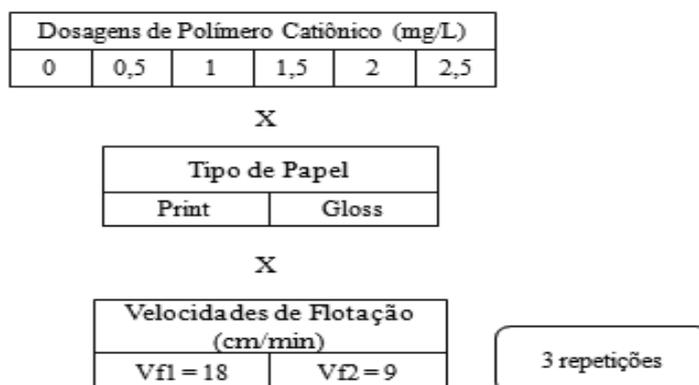


Figura 6. Esquema do Arranjo Fatorial 6 x 2 x 2.

As análises estatísticas e os gráficos foram gerados com auxílio do software Statistica® versão 7.0.

Os dados foram transformados (log) para aderirem a gaussianidade de resíduo, verificada pelo teste de shapiro – wilks, homogeneidade de variância, verificada pelo teste de bartlett. Adotou-se um nível de significância de 5% de probabilidade (ZAR, 1999).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do efluente água clara

As Tabelas 7 e 8 apresentam, respectivamente, a caracterização físico-química do efluente água clara gerado na fabricação do papel *print* e do *gloss* utilizados nos ensaios de flotação por ar dissolvido.

Tabela 7. Caracterização físico-química do efluente água clara tipo *print*.

| Parâmetros | Efluente Bruto |
|------------------------------|----------------|
| Cor aparente (uC) | 1.104 |
| Turbidez (uT) | 812 |
| DQO (mg/L) | 446 |
| SST (mg/L) | 545 |
| ST (mg/L) | 1.084 |
| Temperatura do efluente (°C) | 37 |
| pH | 7,8 |

Tabela 8. Caracterização físico-química do efluente água clara tipo *gloss*.

| Parâmetros | Efluente Bruto |
|------------------------------|----------------|
| Cor aparente (uC) | 1.760 |
| Turbidez (uT) | 544 |
| DQO (mg/L) | 570 |
| SST (mg/L) | 410 |
| ST (mg/L) | 1.050 |
| Temperatura do efluente (°C) | 37 |
| pH | 7,8 |

Segundo Romero (2001) água clara é a água de retorno da máquina de papel, após alguma forma de tratamento primário, com extração quase que total de sólidos, o teor de fibras geralmente fica em torno de 100 a 700 ppm, temperatura de 30 a 40° C e elevados valores de DQO, cor e turbidez, devido aos componentes utilizados na produção do papel, como por exemplo colas, amidos, carbonato de cálcio, corantes, etc. Portanto, as características físico-químicas do efluente água clara dos dois tipos diferentes de papel estudados se enquadram no padrão citado acima.

A cor de uma amostra de água é diretamente associada ao grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, devido à presença de sólidos dissolvidos,

principalmente material em estado coloidal orgânico e inorgânico (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011). Neste caso a origem da cor elevada pode advir de efluentes de indústrias de papel e celulose, contendo lignina, celulose, amido, carbonato de cálcio, etc.

Mesmo após passar pelo filtro de disco, o efluente estudado ainda apresenta elevada concentração de fibras, o que pode ser evidenciado nos valores de SST de 545mg/L e 410 mg/L para o *print* e *gloss*, respectivamente (Tabelas 7 e 8). Desta forma, ainda existe grande potencial de recuperação e reutilização de fibras no processo ao comparamos os valores com os encontrados nos ensaios realizados por Costanzi e Daniel (2002), onde a água clara bruta de máquina de papel apresentou concentração de SST de 112 mg/L, cor de 503 uC e turbidez de 565 uT. Neste estudo duas tecnologias visando recuperar fibras foram testadas, após ensaios utilizando cloreto férrico como coagulante, os autores consideraram que a FAD teve um melhor desempenho comparada a sedimentação.

Observou-se que a variação da dose de polímero empregada nos ensaios de flotação não interferiram significativamente no valor do pH, variando entre 7,5 e 7,9. Fato apreciável quando comparado aos demais coagulantes, que, ao alterarem o pH dos efluentes (geralmente para faixa ácida) demandam consumos elevados de produtos para controle do pH e, conseqüentemente, produzem maior quantidade de lodo, bem como elevam os custos do tratamento. Sendo também favorável para futuro reúso da água clara tratada, visto que a produção de papel utiliza colagem alcalina e trabalha com valores básicos de pH em sua produção.

Costanzi e Daniel (2002) concluíram que o pH natural do efluente total de máquina de papel (7,96) e da água clara (7,7) foi o que forneceu melhores resultados de remoção de turbidez, SST, DQO e cor aparente, com aplicação de cloreto férrico como coagulante, utilizando flotação por ar dissolvido visando reúso de fibras na indústria.

5.2 Eficiência de remoção dos parâmetros estudados

A Tabela 9 mostra a porcentagem das eficiências médias de remoção das principais variáveis resposta estudadas no tratamento da água clara no processo de flotação por ar dissolvido.

Tabela 9. Eficiência média de remoção (%) dos parâmetros cor, turbidez, DQO, SST e ST pelo processo de flotação por ar dissolvido empregado no tratamento do efluente água clara de máquina de papel.

| Dosagem | Tipo Papéis ¹ | Cor (%) | | Turbidez (%) | | DQO (%) | | SST (%) | | ST (%) | |
|---------|-----------------------------|---------|------|--------------|------|---------|------|---------|------|--------|------|
| | | Vf1 | Vf2 | Vf1 | Vf2 | Vf1 | Vf2 | Vf1 | Vf2 | Vf1 | Vf2 |
| 0 | 1 | 57,0 | 60,0 | 89,2 | 90,1 | - | - | 70,3 | 70,6 | 21,3 | 27,3 |
| 0,5 | 1 | 70,0 | 70,0 | 97,2 | 97,0 | - | - | 76,8 | 78,6 | 37,1 | 36,1 |
| 1 | 1 | 73,0 | 73,0 | 97,2 | 97,0 | - | - | 90,7 | 92,9 | 42,5 | 42,7 |
| 1,5 | 1 | 68,0 | 68,0 | 97,9 | 97,9 | - | - | 94,3 | 94,6 | 37,3 | 37,6 |
| 2 | 1 | 73,0 | 73,0 | 98,0 | 98,4 | - | - | 85,6 | 87,8 | 45,0 | 45,0 |
| 2,5 | 1 | 73,0 | 75,0 | 97,1 | 97,1 | - | - | 76,1 | 84,7 | 1,0 | 7,2 |
| 0 | 2 | 96,0 | 97,0 | 87,9 | 87,9 | 49,1 | 48,2 | 95,6 | 96,7 | 36,8 | 36,6 |
| 0,5 | 2 | 93,0 | 93,0 | 97,4 | 97,2 | 42,5 | 44,9 | 98,5 | 98,0 | 12,8 | 9,2 |
| 1 | 2 | 97,0 | 97,0 | 98,1 | 98,1 | 48,5 | 46,4 | 99,0 | 99,2 | 22,6 | 25,5 |
| 1,5 | 2 | 95,0 | 95,0 | 98,4 | 98,6 | 40,1 | 39,2 | 94,7 | 94,3 | 10,5 | 8,6 |
| 2 | 2 | 97,0 | 97,0 | 98,6 | 98,8 | 40,2 | 42,1 | 94,3 | 96,8 | 29,3 | 31,6 |
| 2,5 | 2 | 93,0 | 93,0 | 97,4 | 97,3 | 37,9 | 36,4 | 96,7 | 96,8 | - | - |

Onde: ¹ 1 *Print*; 2 *Gloss*; Vf1 = 18 cm/min; Vf2 = 9 cm/min

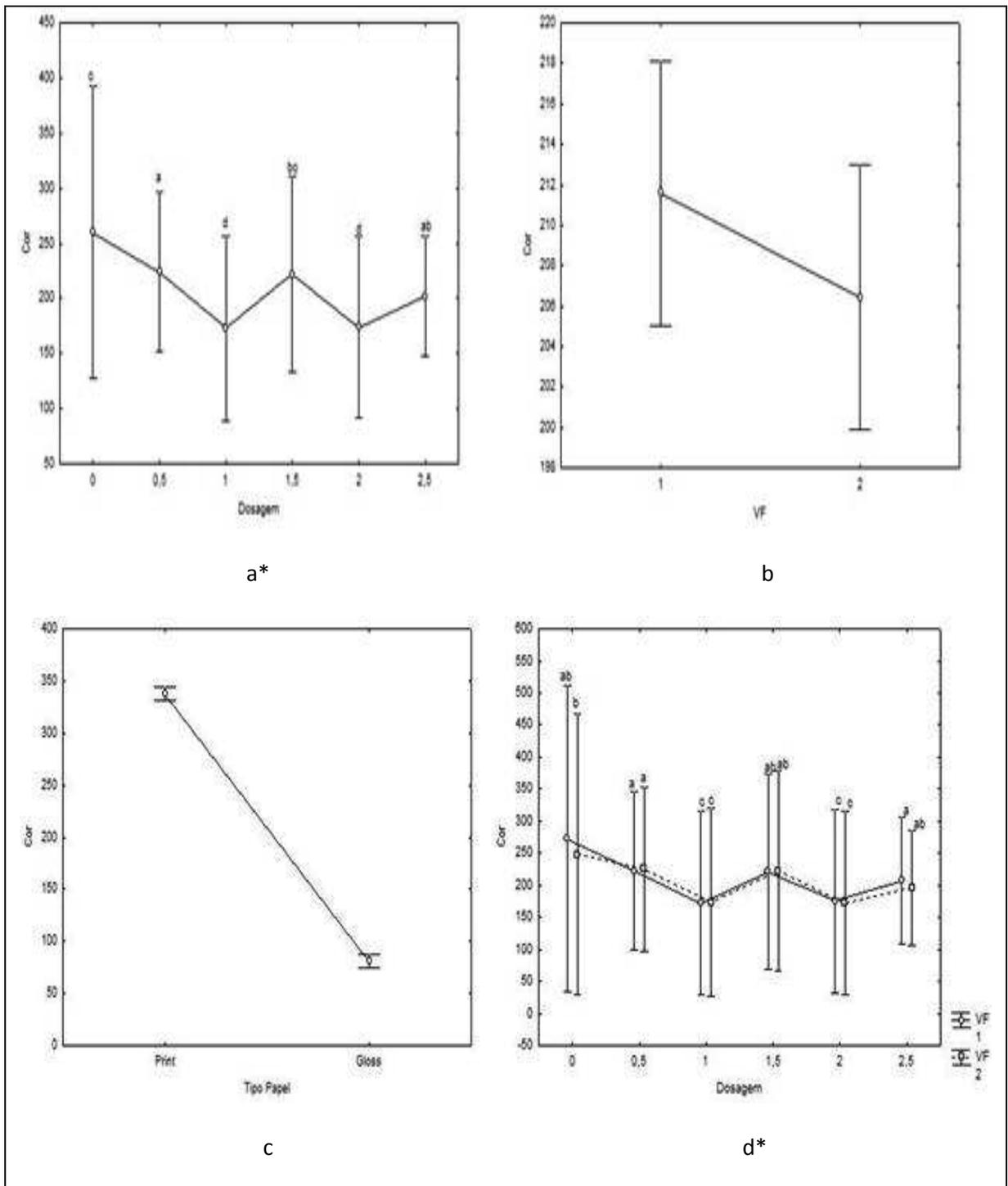
Analisando a Tabela 9 é possível observar que as velocidades de flotação 1 e 2 apresentaram desempenho semelhante na remoção dos parâmetros estudados. Após o tratamento por FAD, o efluente água clara do papel *gloss* obteve, em geral, percentual médio de remoção dos parâmetros estudados superior aos resultados do efluente água clara do papel *print*. Com relação aos tipos de efluentes de papel, o *print* tem maior teor de fibras e cargas na água da caixa de entrada e em todo o sistema.

No efluente água clara do papel *print* se perde mais fibras/cargas. Enquanto no *gloss* a concentração de fibras na caixa de entrada é 0,5 - 0,7% no *print* é de 0,7 a 1,4%. Fato este que foi confirmado na caracterização do efluente água clara (Tabelas 7 e 8), onde a concentração de SST é de 545 e 410 mg/L para o *print* e *gloss* respectivamente. Todos os papéis usam carbonato de cálcio como carga mineral, o *print* utiliza entre 20 e 25% e o *gloss* entre 17 e 22%.

5.3 Estudo de remoção dos parâmetros estudados

5.3.1 Cor

Os gráficos gerados pelo software Statistica®, com os dados relacionados a cor aparente estão reunidos na Figura 7.



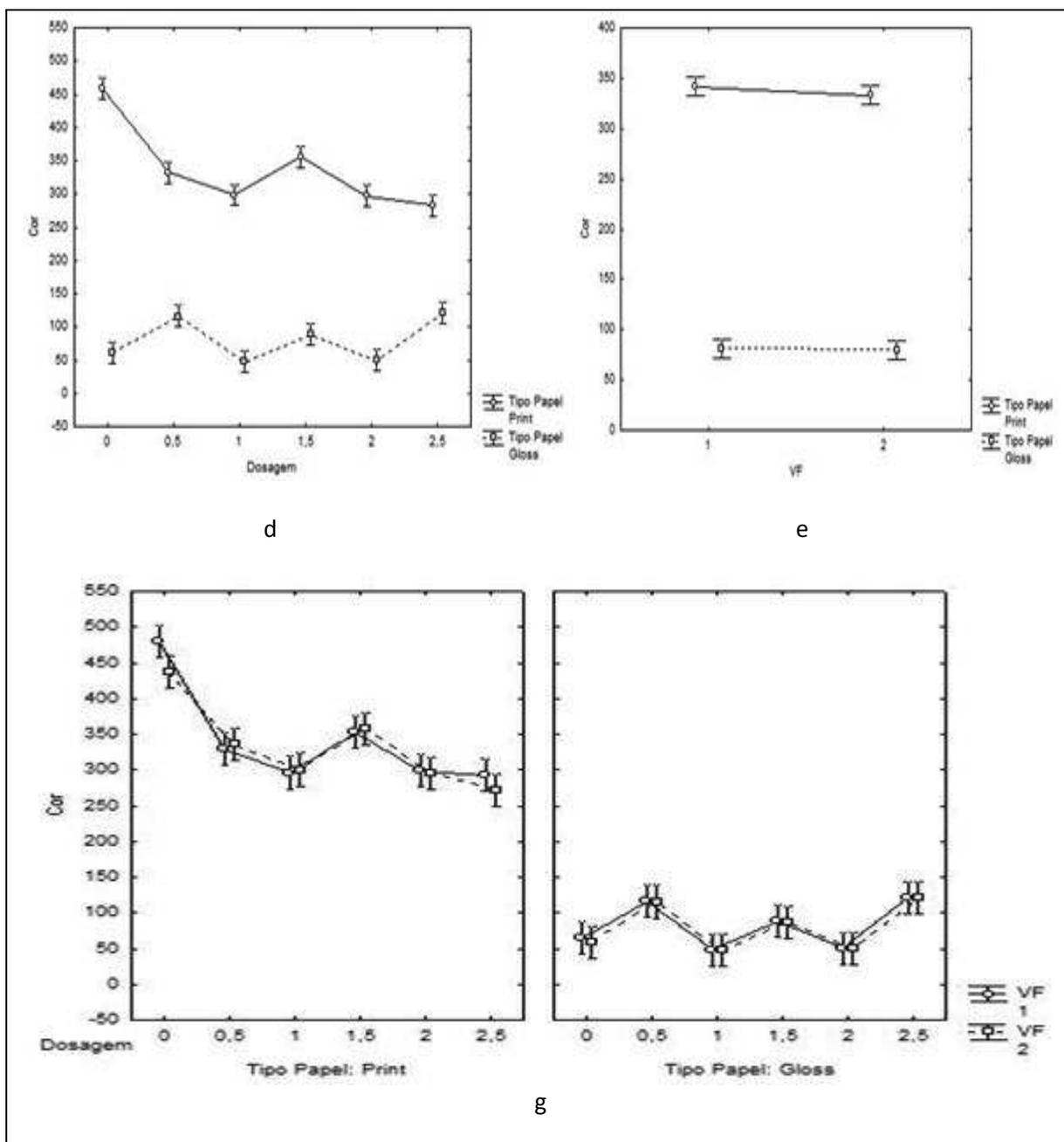


Figura 7. Gráficos para o parâmetro cor aparente (a) Dosagem F_{5-48} (35; $p= 0$) (b) Velocidade de flotação (Vf) F_{1-48} (1,24; $p= 0,27$) (c) Tipo de papel F_{1-48} (3104; $p= 0$) (d) Interação entre Dosagem x Vf F_{5-48} (0,88; $p= 0,49$) (e) Interação entre Dosagem x Tipo de papel F_{5-48} (47,7; $p= 0$) (f) Interação entre Vf x Tipo de papel F_{1-48} (0,51; $p= 0,478$) (g) Interação entre Dosagem x Vf x Tipo de papel F_{5-48} (0,61; $p= 0,69$).

*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

De acordo com as Figuras 7b e 7e é possível afirmar que não houve diferença estatística entre as velocidades de flotação testadas, no que se refere ao tipo de papel avaliado e a variação de dosagem do polímero catiônico (Figuras 7d e 7g). Levando em consideração a taxa de escoamento, a $V_{fl} = 18$ cm/min é mais indicada, pois o volume de efluente tratado, em relação ao tempo, seria maior.

As melhores dosagens, estatisticamente indicadas, para ambos os tipos de papel foram de 1 e 2 mg/L (Figuras 7a e 7d). Pensando na economia de polímero, é preferível optar pela menor dosagem, sendo que ambas tem resultados de remoção estatisticamente iguais.

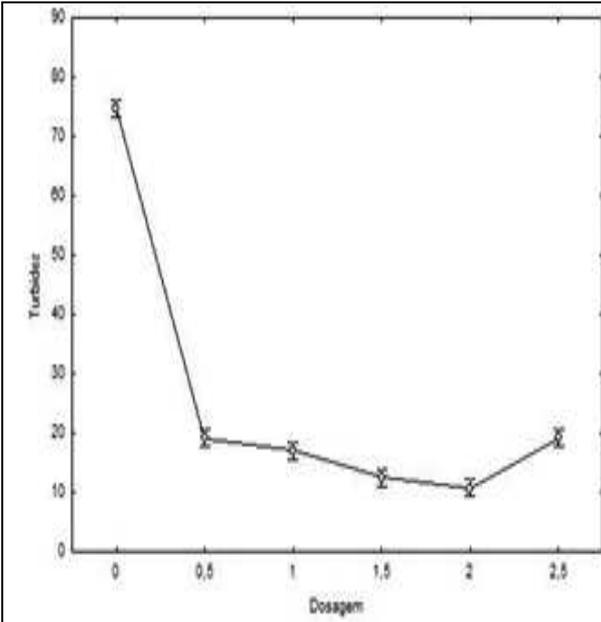
Como pode ser observado na Figura 7g o tratamento da água clara oriunda da fabricação do papel tipo *gloss* teve o melhor desempenho na remoção do parâmetro cor (97%) na dosagem de 1 mg/L para a V_{fl} , mesmo tendo valor inicial no efluente bruto maior (Tabelas 7 e 8), comparado com o tratamento da água clara obtida do papel *print* que alcançou 73% de remoção nas dosagens de 1, 2 e 2,5 mg/L para a V_{fl} (Tabela 9).

Estes resultados foram satisfatórios e semelhantes aos encontrados por Quartaroli (2012) que utilizou a FAD com velocidade de flotação igual a 9 cm/min e auxílio de polímero catiônico e PAC na coagulação, em que se obteve redução de 88% da cor presente no efluente da saída do decantador secundário de uma estação de efluentes de uma indústria de papel e celulose.

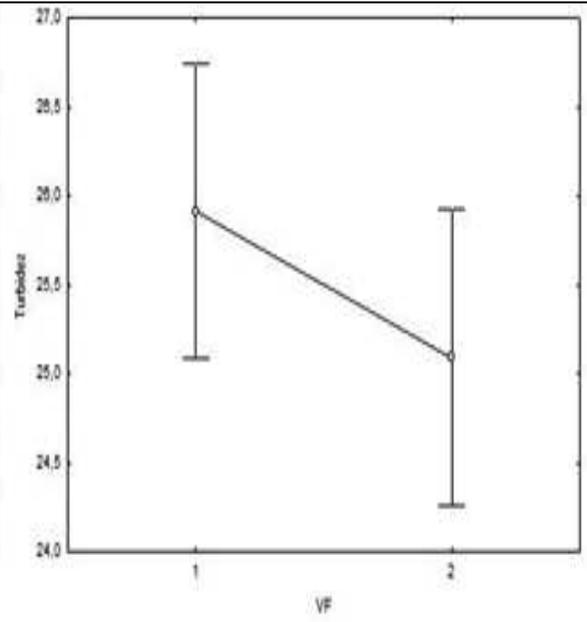
A clarificação por meio de flotação pode ser adotada quando a água bruta possui cor relativamente alta em relação à turbidez, pois facilita a remoção de flocos leves, geralmente, produzidos após a coagulação e a floculação (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011). Como visto nas Tabelas 7 e 8 onde a cor aparente do efluente água branca dos tipos de papel *print* e *gloss* são respectivamente 1.104 e 1.760 uC comparada com a turbidez de 812 uT para *print* e 544 uT para *gloss*.

5.3.2 Turbidez

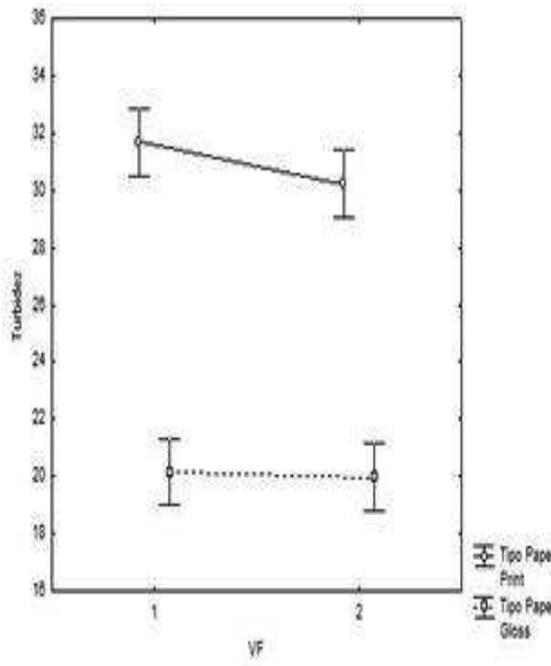
Os gráficos gerados pelo software Statistica®, com os dados relacionados a turbidez estão reunidos na Figura 8.



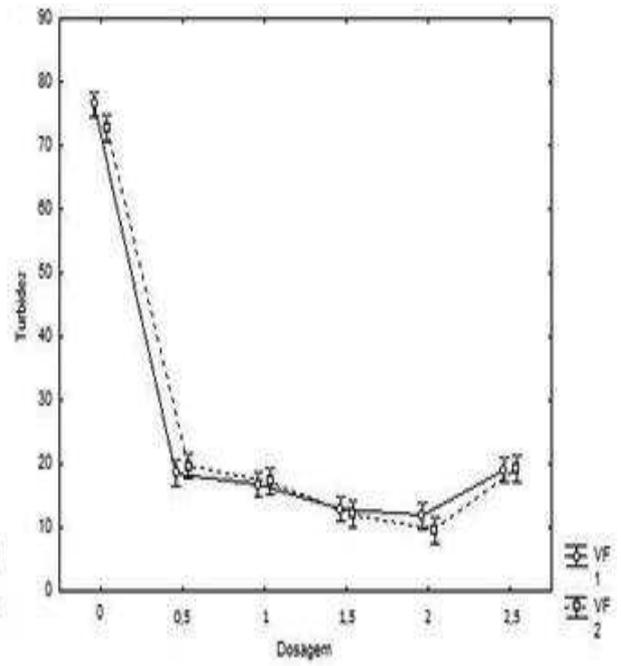
a



b



c



d

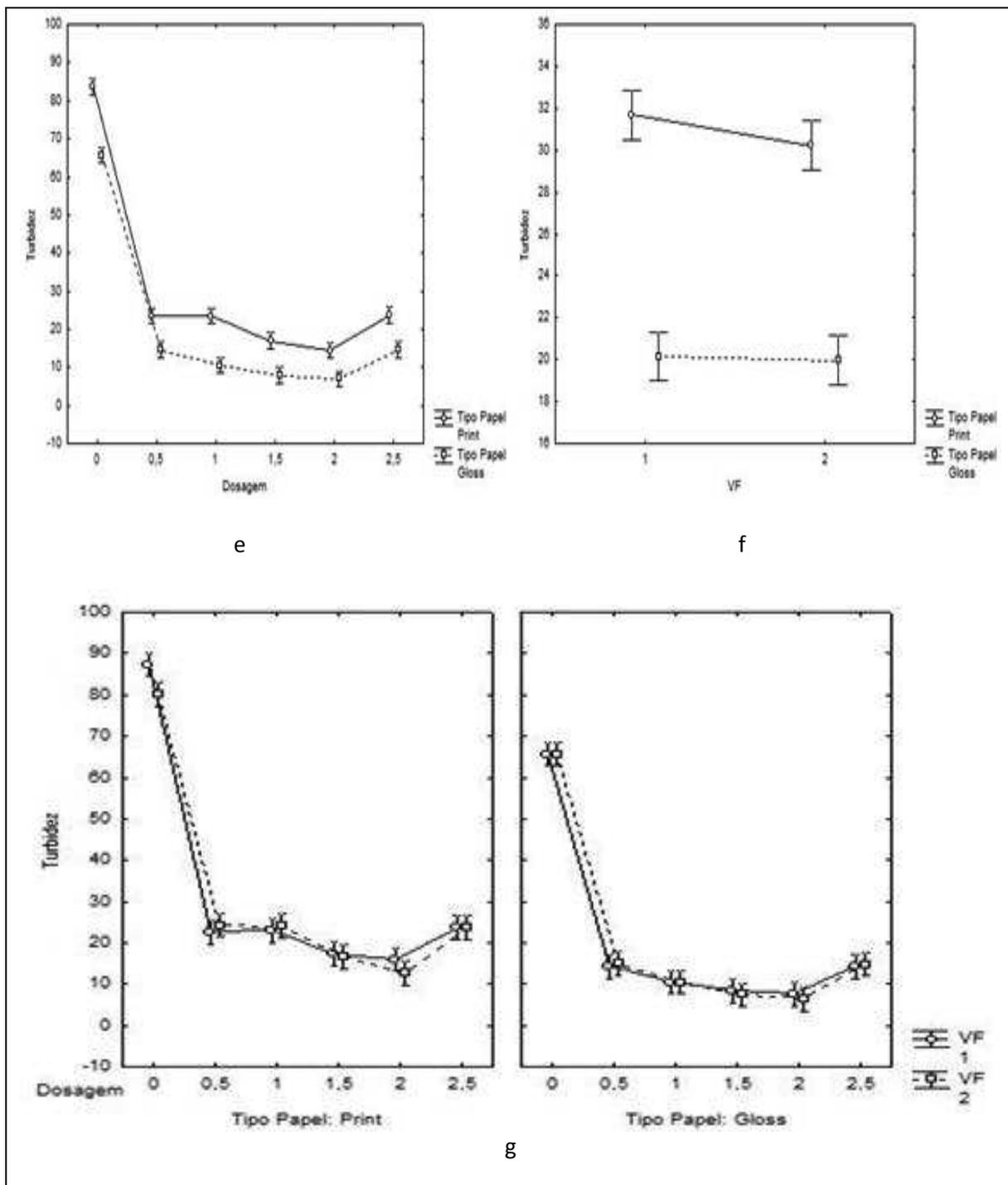


Figura 8. Gráficos para o parâmetro turbidez (a) Dosagem F_{5-48} (1152; $p=0$) (b) Velocidade de flotação (Vf) F_{1-48} (1,98; $p=0,16$) (c) Tipo de papel F_{1-48} (345; $p=0$) (d) Interação entre Dosagem x Vf F_{5-48} (1639; $p=0$) (e) Interação entre Dosagem x Tipo de papel F_{5-48} (7,64; $p=0,00002$) (f) Interação entre Vf x Tipo de papel F_{1-48} (1,12; $p=0,20$) (g) Interação entre Dosagem x Vf x Tipo de papel F_{5-48} (1,25; $p=0,29$).

Obteve-se 98% de remoção de turbidez nas dosagens de polímero catiônico de 1, 1,5 e 2,0 mg/L no tratamento da água clara gerada na produção de papel *gloss* (Figura 8e e 8g). Tais dosagens podem ser consideradas estatisticamente semelhantes às dosagens 0,5 e 2,5 mg/L com eficiência de remoção de 97% (Tabela 9). Não houve diferença estatística entre as velocidades de flotação estudadas.

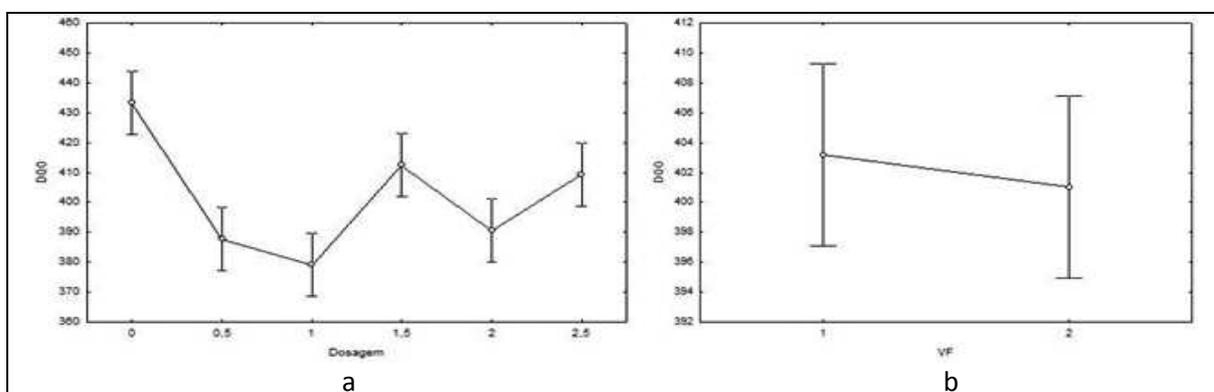
Para o tipo de papel *print* a dosagem de 2 mg/L atingiu eficiência de remoção de 98% (Tabela 9), sendo semelhante estatisticamente com as dosagens 0,5, 1, 1,5 e 2,5 com eficiência de 97% para ambas as velocidades de flotação (Figuras 8f e 8g).

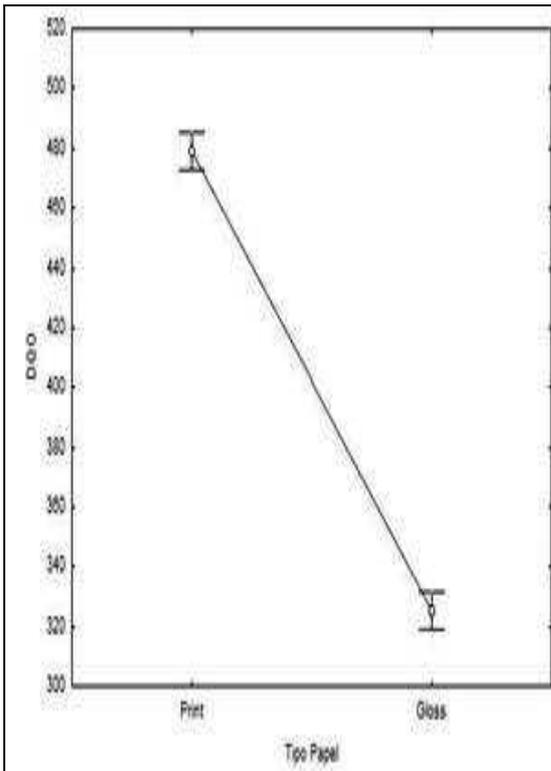
Quartaroli (2012), obteve redução de 90% da turbidez, utilizando flotação no pós-tratamento de efluentes de lodo ativado em uma indústria de papel e celulose, utilizando velocidade de flotação semelhante (9 cm/min) e com auxílio do coagulante PAC em conjunto com polímero catiônico.

Costanzi e Daniel (2002) analisaram o comportamento de remoção de turbidez do efluente água clara de uma máquina de papel tratado por FAD, com auxílio do coagulante cloreto férrico, os autores obtiveram boa eficiência de remoção de turbidez para pH natural, com o melhor valor remanescente de 5,78 uT, o qual se assemelha aos obtidos nos ensaios deste estudo, utilizando polímero catiônico, com valores de 6,2 uT para dosagem 2 mg/L no papel tipo *gloss* e 11 uT para 2 mg/L no papel tipo *print*.

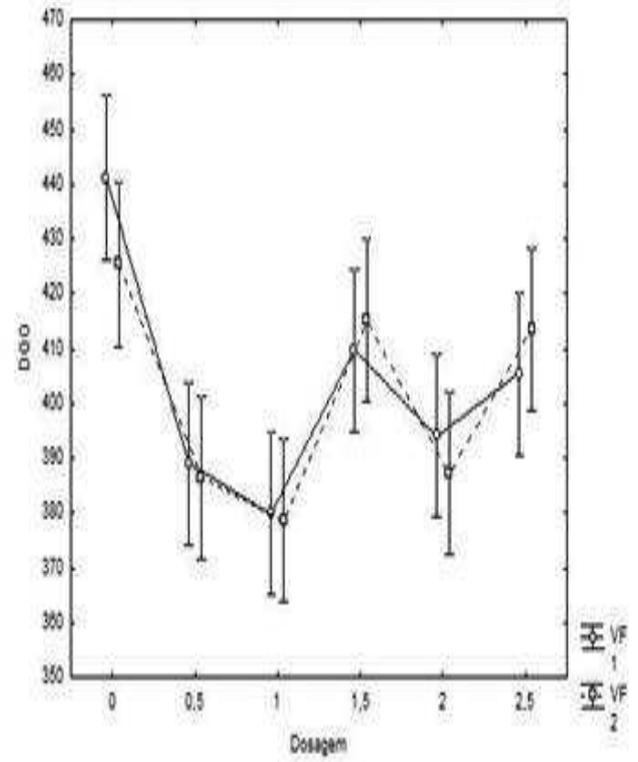
5.3.3 Demanda química de oxigênio (DQO)

Os gráficos gerados pelo software Statistica®, com os dados relacionados a DQO estão reunidos na Figura 9.

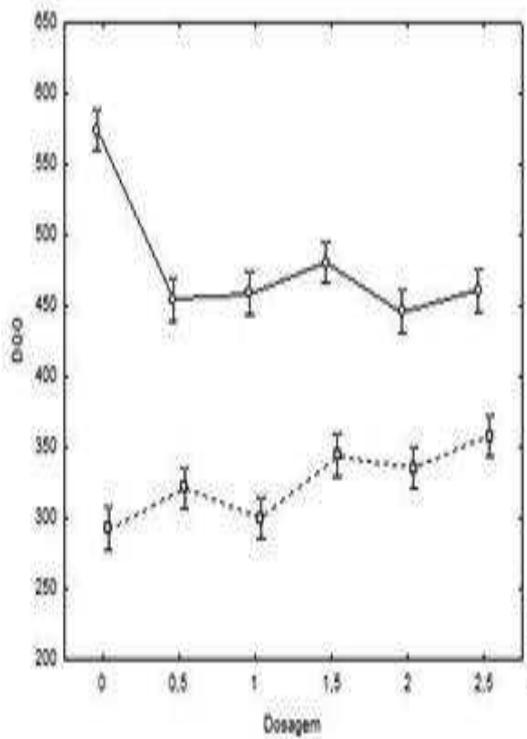




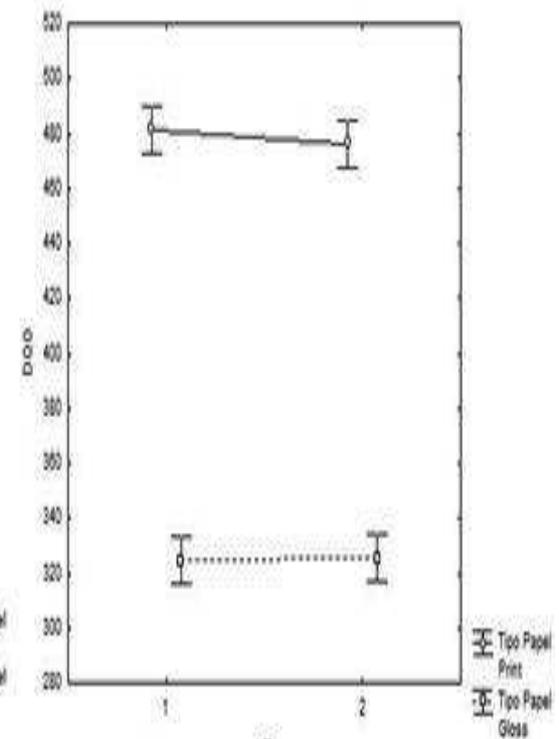
c



d



e



f

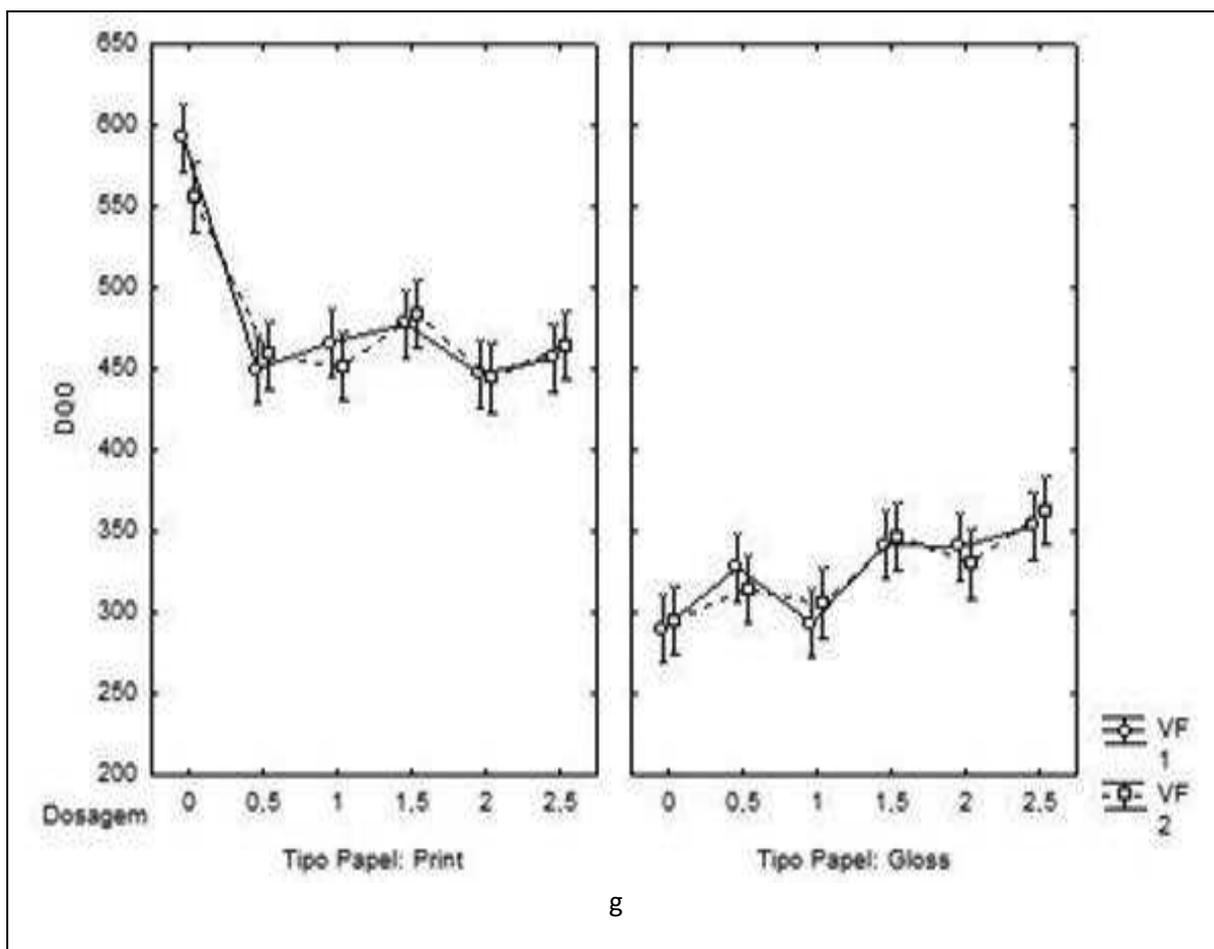


Figura 9. Gráficos para o parâmetro demanda química de oxigênio (DQO) (a) Dosagem F_{5-48} (14,51; $p=0$) (b) Velocidade de flotação (Vf) F_{1-48} (0,25; $p=0,61$) (c) Tipo de papel F_{1-48} (1292; $p=0$) (d) Interação entre Dosagem x Vf F_{5-48} (0,68; $p=0,63$) (e) Interação entre Dosagem x Tipo de papel F_{5-48} (39,1; $p=0$) (f) Interação entre Vf x Tipo de papel F_{1-48} (0,56; $p=0,45$) (g) Interação entre Dosagem x Vf x Tipo de papel F_{5-48} (1,26; $p=0,29$).

Não houve diferença estatística entre as velocidades de flotação testadas (Figuras 9b e 9d), independente da dosagem de polímero e do tipo de papel testados.

Não foi obtida remoção do parâmetro DQO para o tipo de papel *print*. As dosagens 0,5, 1, 1,5, 2 e 2,5 obtiveram resultados semelhantes estatisticamente (Figura 9d). Possivelmente, devido ao fato que a DQO se encontra na forma solúvel no efluente, confirmado por Belosinschi e Bobu (2007) ao relatarem que enquanto os sólidos suspensos são removidos facilmente nos sistemas de tratamento primário existentes nas máquinas de papel, boa parte do material dissolvido e coloidal permanece no efluente.

Tais resultados não devem acarretar problemas em relação à DQO remanescente, visto que depois de passar pelo tratamento primário de FAD, parte da água clarificada seria reutilizada no próprio sistema e outra parte seguiria para a estação de tratamento de efluente da empresa, onde será diluída e reduzida no sistema de tratamento secundário, composto por lodos ativados.

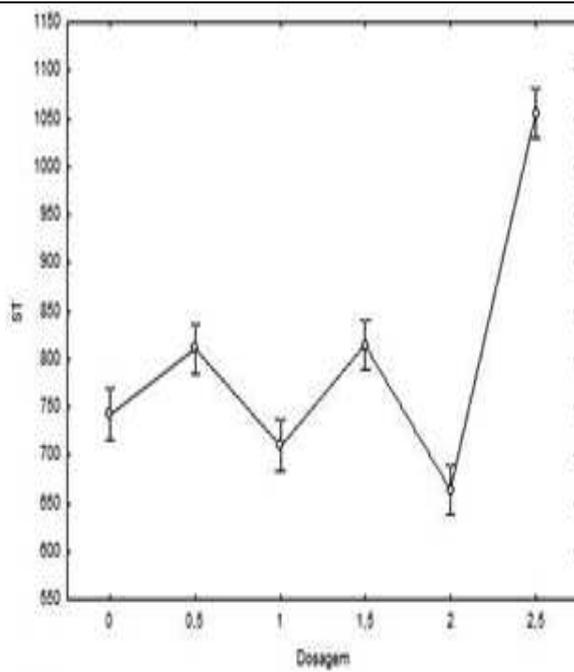
Quartaroli et al. (2014) observou que metade dos valores residuais dos ensaios com dosagem de 1000 mg/L de polímero catiônico aumentaram o valor remanescente de DQO, comprovando assim que o polímero contribuiu com o aumento de matéria orgânica e que parte das fibras podem ter sido solubilizadas, gerando principalmente matéria orgânica dissolvida, representada pelo aumento da DQO no efluente.

Obteve-se melhor desempenho na remoção de DQO do efluente proveniente da fabricação do papel *gloss*, atingindo-se remoção de 49% sem adição de polímero catiônico, 48,5% para dosagem de 1 mg/L e 44,9% para dosagem de 0,5 mg/L (Tabela 9), sendo consideradas estatisticamente semelhantes. Observa-se aqui que sem polímero catiônico a remoção foi a mesma quando se utilizou o polímero, portanto a coagulação não foi eficiente para remoção de DQO e sim apenas dos sólidos particulados. A DQO não foi sempre bem removida com eficiência por estar principalmente na fase solúvel. (COSTANZI; DANIEL, 2002).

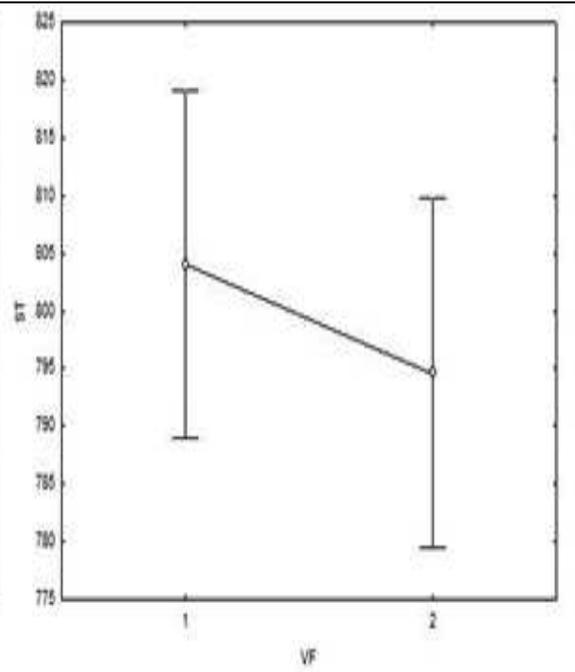
Os resultados são equivalentes aos encontrados por Woollen, Puhar e Kuhn (1995) que alcançaram de 30 a 40% de redução de DQO, utilizando um sistema de tratamento de efluente de máquina de papel constituído por FAD, combinado com filtro de areia e filtros de disco.

5.3.4 Sólidos Totais

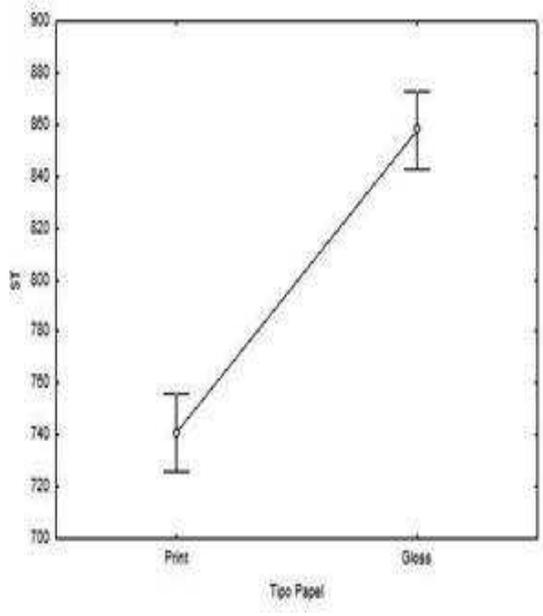
Os gráficos gerados pelo software Statistica®, com os dados relacionados a ST estão reunidos na Figura 10.



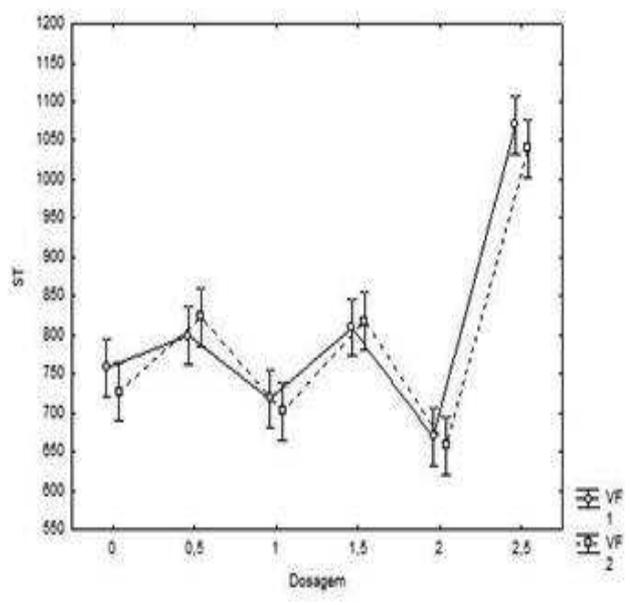
a



b



c



d

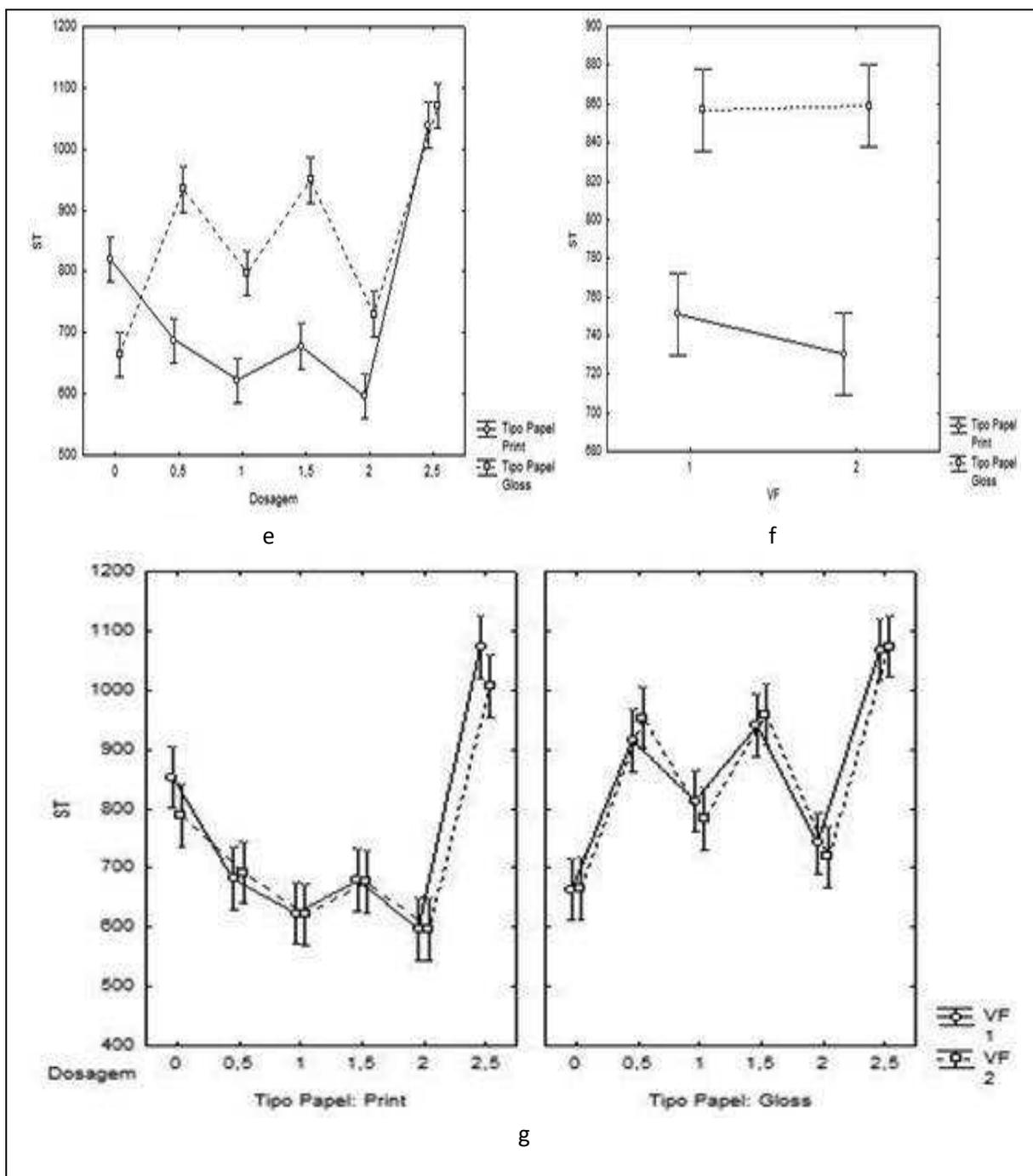


Figura 10. Gráficos para o parâmetro sólidos totais (ST) (a) Dosagem F_{5-48} (113; $p=0$) (b) Velocidade de flotação (Vf) F_{1-48} (0,78; $p=0,38$) (c) Tipo de papel F_{1-48} (122; $p=0$) (d) Interação entre Dosagem x Vf F_{5-48} (0,71; $p=0,61$) (e) Interação entre Dosagem x Tipo de papel F_{5-48} (37,3; $p=0$) (f) Interação entre Vf x Tipo de papel F_{1-48} (1,17; $p=0,28$) (g) Interação entre Dosagem x Vf x Tipo de papel F_{5-48} (0,68; $p=0,64$).

O desempenho das duas velocidades de flotação testadas neste experimento foram estatisticamente iguais em relação ao parâmetro ST, independente da dosagem utilizada ou do tipo de efluente de papel testado (Figuras 10b, 10d e 10f).

O efluente proveniente da fabricação do papel *print* apresentou um desempenho levemente superior na remoção de ST em comparação ao efluente do papel *gloss*, os quais obtiveram eficiências de remoção de 45% (2 mg/L) e 36,8% (sem adição de polímero), respectivamente (Tabela 9). A remoção de ST não foi tão alta sendo atribuída, basicamente, à remoção da fração particulada (SST).

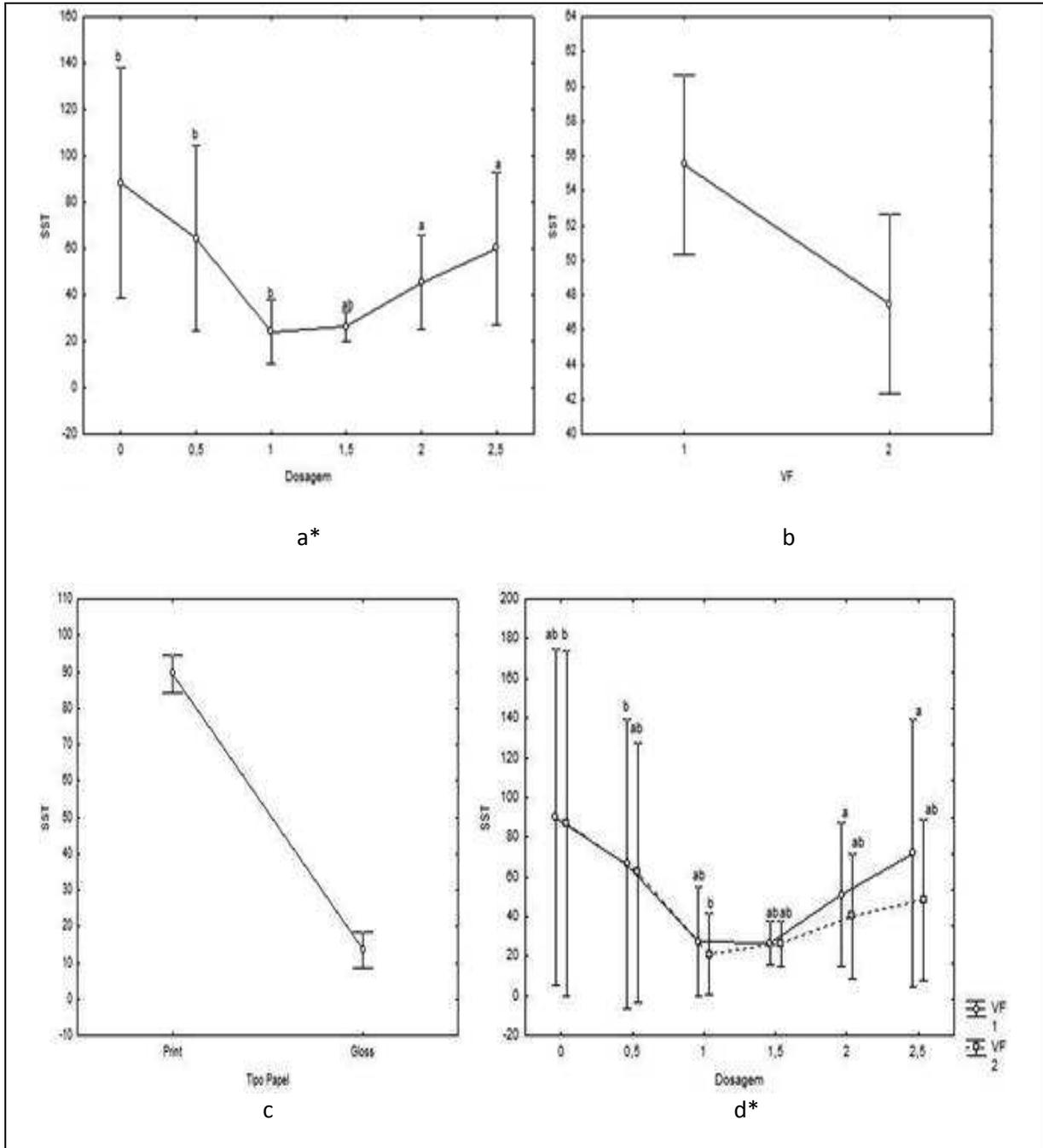
Os resultados podem ser atribuídos à diferença existente na composição dos efluentes resultantes da fabricação de dois tipos diferentes de papel, os quais são estatisticamente diferentes (Figura 10c). Tais oscilações qualitativas, que podem ser observadas nas Tabelas 7 e 8, são consideradas normais em efluentes industriais de papel e celulose, por depender de características de processo e da produção da indústria, visto que são usados produtos químicos diferentes e em dosagens diferentes na fabricação dos dois tipos de papel, dependendo da características desejadas e a finalidade do papel (COSTANZI; DANIEL, 2002). O papel tipo *print* caracteriza-se como um papel utilizado para imprimir e escrever, composto em sua grande maioria de fibras curtas e cargas minerais e amido. Enquanto o papel tipo *gloss* tem maior composição de fibras longas em combinação com fibras curtas para conferir resistência e carbonato de cálcio, pois é recomendado para embalagens.

Analisando-se a Figura 10g, para o tipo de papel *print*, pode-se afirmar que as melhores dosagens encontradas (0,5, 1, 1,5 e 2 mg/L) são estatisticamente semelhantes na remoção de ST do efluente, com valor máximo de remoção de 45% para a dosagem de 2 mg/L. Para o efluente do tipo de papel *gloss* o melhor desempenho, estatisticamente, foi para a dosagem 2 mg/L e sem adição de coagulante, atingindo 36,8% de eficiência máxima de remoção de ST (Tabela 9).

A flotação do efluente em pH natural (7,8) e sem adição de polímero, forneceu resultados bons, com ST remanescente de 636 mg/L. Este fato é interessante, pois somente a FAD é suficiente para melhorar substancialmente a qualidade do efluente, confirmado por Lima (1996) que obteve bons resultados utilizando FAD em efluente de máquina de papel, sem o auxílio de coagulante.

5.3.5 Sólidos Suspensos Totais

Os gráficos gerados pelo software Statistica®, com os dados relacionados a SST estão reunidos na Figura 11.



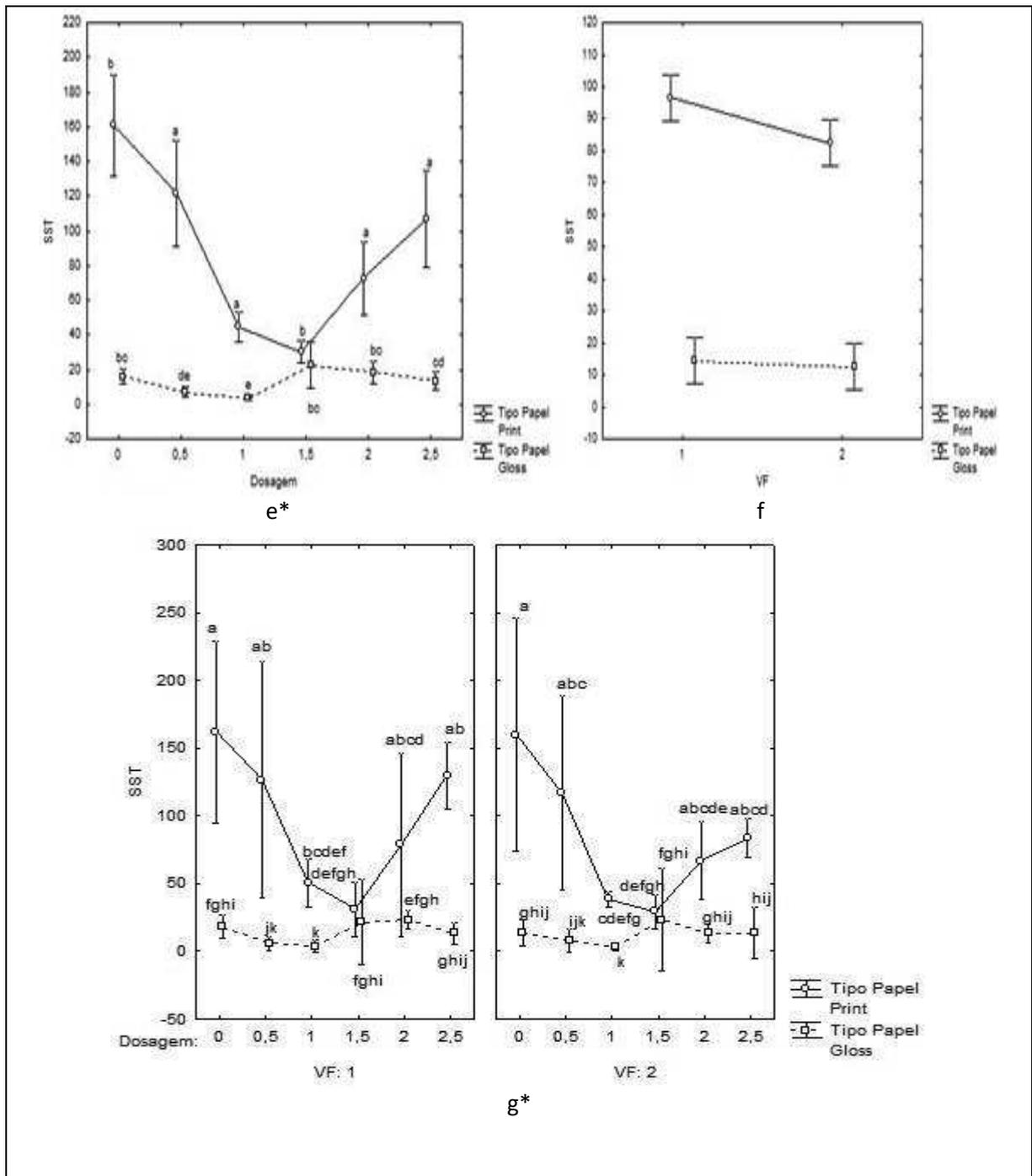


Figura 11. Gráficos para o parâmetro sólidos suspensos totais (SST) (a) Dosagem F_{5-48} (30,5; $p=0$) (b) Velocidade de flotação (Vf) F_{1-48} (4,9; $p=0,031$) (c) Tipo de papel F_{1-48} (439; $p=0$) (d) Interação entre Dosagem x Vf F_{5-48} (0,89; $p=0,49$) (e) Interação entre Dosagem x Tipo de papel F_{5-48} (32,7; $p=0$) (f) Interação entre Vf x Tipo de papel F_{1-48} (2,8; $p=0,09$) (g) Interação entre Dosagem x Vf x Tipo de papel F_{5-48} (0,98; $p=0,43$).

*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Com base nas Figuras 11b e 11f é possível afirmar que Vf1 e Vf2 não diferem estatisticamente entre si, para todos os fatores analisados.

O tratamento da água clara proveniente do papel *gloss* teve o melhor resultado geral na remoção de fibras (SST) (Figuras 11c e 11e), com o valor máximo de 99% para dosagem de 1 mg/L, seguida por 98% para a dosagem 0,5 mg/L, onde ambas podem ser consideradas estatisticamente semelhantes, para todas as demais dosagens testadas a eficiência ficou acima de 94% de remoção (Tabela 9). Demonstrando valores residuais de até 2 mg/L de SST restantes no efluente coletado, sendo altamente eficiente na remoção do parâmetro SST. Esses resultados são semelhantes aos testes efetuados por Woollen, Puhar e Kuhn (1995), no qual reportaram a remoção quase que completa de sólidos suspensos totais existentes em efluente de máquina de papel, utilizando uma seqüência de tratamento primário de flotação por ar dissolvido seguido por filtro de areia ou filtro de disco.

O tratamento da água clara gerada na produção de papel *print* também apresentou ótimos valores de remoção de SST, com 94,6% na dosagem 1,5 mg/L, sendo estatisticamente igual a dosagem 1 mg/L, com 92,9%, alcançando valor mínimo residual de 24 mg/L de SST restantes no efluente coletado para análise. O menor valor encontrado para remoção de SST, foi no caso da FAD sem adição de coagulante a eficiência foi de 70,6% (Tabela 9). Sendo estes valores aceitos dentro da faixa de 70-98%, descrita por Ben, Dorris e Pagé (2004), como típicos de remoção de sólidos suspensos utilizando FAD como tratamento primário, sendo geralmente necessário o uso de coagulantes e floculantes para atingir altas eficiências de remoção.

O efluente água clara do papel *gloss* apresentou melhor desempenho na remoção do parâmetro SST comparado ao efluente água clara do papel *print* (Figura 11c). Pode-se atribuir esse resultado a composição básica de cada papel, visto que o papel *gloss* possui fibras longas (2 a 5 milímetros) em sua composição, as quais podem ter contribuído para a formação de flocos mais densos e de fácil flotação. O papel *print* é composto basicamente por fibras curtas (0,5 a 2 milímetros), que devido ao seu tamanho a formação e flotação dos flocos pode ter menor eficiência. As partículas, que passam pelo processo de flotação precisam estar em uma faixa granulométrica ideal para apresentarem boas recuperações. Esta faixa ideal depende do material que será flotado, já que os materiais não têm características iguais (AMORIM, 2013).

Mehta et al. (2003), conduziram uma pesquisa para otimizar a remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica de efluente de máquina de papel, especificamente alcalino, e

chegaram a um valor de SST de 34 mg/L utilizando uma dosagem de 25 mg/L de polímero catiônico de alto peso molecular. Dixit, Maleike e Jackiwski (1991), relataram que a adição de polímero catiônico no sistema da máquina é uma tecnologia tipicamente utilizada nos sistemas de máquina de papel, com variadas percentagens de fibras recicladas. O polímero catiônico é efetivo na retenção de fibras, matéria orgânica e cargas minerais.

Com a possibilidade de um flotador compacto, de baixo custo operacional e boa eficiência energética, a FAD vem demonstrando ser especialmente adequada para aplicações em efluentes de celulose e papel devido a sua alta capacidade de carga hidráulica e sua capacidade avançada de desempenho, sendo aplicada especificamente na recuperação de sólidos suspensos, que contém fibras, finos e cargas (BEN; DORRIS; PAGÉ, 2004).

Os resultados obtidos neste estudo apontam para valores e eficiências de remoção SST próximas do que é estabelecido pela literatura (Tabela 10). Comprovando a eficiência do tratamento por flotação por ar dissolvido, visando a remoção de fibras, entendidas como SST.

Tabela 10. Comparação de valores e percentuais de remoção de SST obtidos na atual pesquisa com tratamentos por FAD, em relação às referências estabelecidas pela literatura.

| SST | Estudo em questão (2015) | Referências | | | | |
|-----------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | Constanzi e Daniel (2002) | Mehta, et al., (2003) | Silva (2013) | Ben, Dorris e Pagé (2004) | Lima e Reali (1997) |
| Remoção | 70 - 99% | - | - | 95-99% | 70-98% | 71-98% |
| Residual mínimo | 2 e 24 mg/L | 2 mg/L | 34 mg/L | - | - | - |
| Efluente | Água clara | Água clara | Efluente de máquina de papel | Tratamento primário | Tratamento primário | Efluente de máquina de papel |
| Coagulante | Polímero catiônico | Cloreto férrico | PAC + Polímero catiônico | Necessário uso de coagulante | Necessário uso de coagulante | PAC |

5.4 Configuração ótima

Coagulação e floculação são dois processos químicos associados com a clarificação de águas residuárias, em especial efluentes de máquina de papel. O auxílio de polímeros catiônicos de alto peso molecular colaboram com a formação de flocos densos e grandes, facilitando a propensão dos flocos contendo fibras a flutuar (WOODWARD, 1991). Como foi verificado nos ensaios onde o efluente tratado por FAD, com adição de polímero catiônico, levou a ótimas eficiências de remoção de sólidos suspensos e boa qualidade da água clarificada. A formação de flocos grandes e densos, ideais para a flotação é evidente na Figura 12.

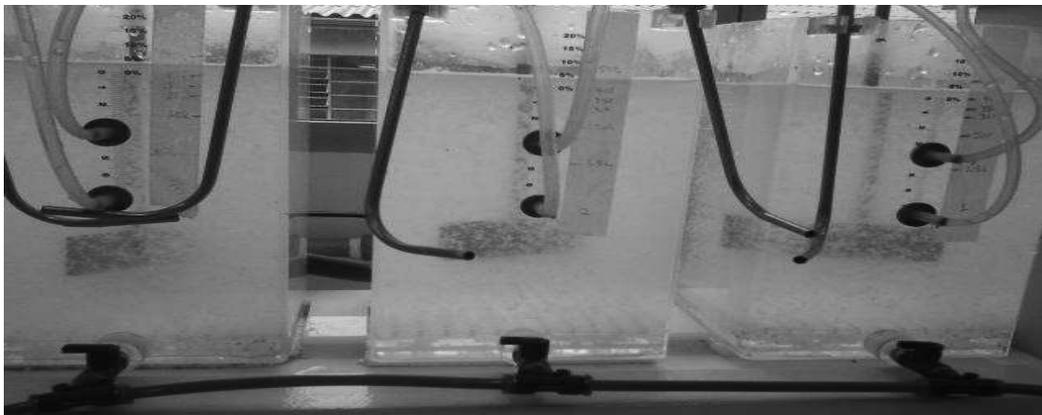


Figura 12. Formação de flocos após a aplicação do polímero catiônico.

A Figura 13 evidencia os resultados obtidos pela FAD com a dosagem de 1 mg/L de polímero catiônico para o efluente água clara proveniente do papel *print* e *gloss*.

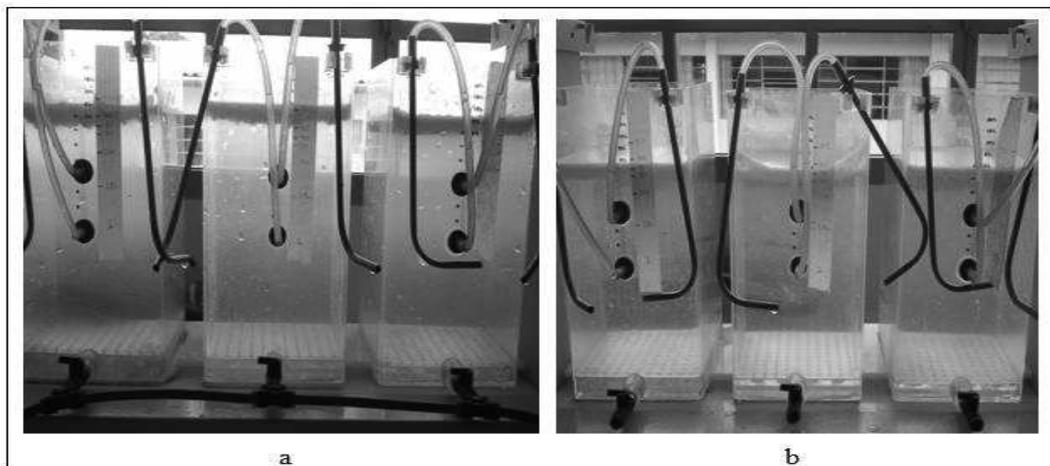


Figura 13. Efluente água clara do papel (a) *print* (b) *gloss* após a flotação com o auxílio de polímero catiônico.

A eficiência do tratamento foi elevada, podendo-se observar nas Figuras 13a e 13b a água clarificada e livre de sólidos suspensos, passível de reuso no sistema. Também é visível o sobrenadante formado após a flotação dos flocos, que contém fibras e cargas minerais, as quais podem ser coletadas e reutilizadas no processo de produção de papel.

A determinação da dosagem ótima foi dada com base nas análises estatísticas em conjunto com os gráficos e porcentagens de remoção obtidas pelo tratamento por FAD. Procurou-se obter uma dosagem que constituísse um conjunto que agrupasse a maior eficiência de remoção para todos os parâmetros estudados e o melhor custo benefício da dosagem.

No tratamento da água clara proveniente do papel *gloss* a dosagem ótima de polímero foi de 1 mg/L com remoções de 99%, 25,5%, 97%, 98% e 48,5% de SST, ST cor, turbidez e DQO, respectivamente.

No tratamento da água clara proveniente do papel *print* a dosagem ótima de polímero foi de 1 mg/L, alcançando valores de eficiência de remoção de 92,9%, 42,7%, 73%, 97% de SST, ST, cor, turbidez respectivamente, não ocorrendo remoção de DQO.

Em todos os parâmetros estudados não houve diferença estatística significativa entre as velocidades de flotação testadas. Sendo assim, em ambos os casos, podemos adotar a maior velocidade de flotação $V_{fl} = 18$ cm/min, que implica em reatores menores em escala industrial, tornando o sistema mais compacto.

A velocidade de flotação (ascensional) de 18 cm/min equivale a uma taxa de escoamento superficial de $10,8$ m³/m².h. Os valores usuais de taxa de escoamento superficial variam de 0,48 a 9,76 m³/m².h, recomendado por Aisse (2001). Costanzi e Daniel (2002) estudaram taxas de 2,91; 6,25 e 12,5 m³/m².h na aplicação da flotação por ar dissolvido como tratamento do efluente total e água clara da máquina de papel e Lima (1996) usou taxas de aplicação superficial de 60 a 120 m/dia (2,5 a 5 m³/m².h), na recuperação de fibras do efluente de uma indústria de papel e celulose por flotação por ar dissolvido.

Uma atenção especial deve ser dada à seleção de polímeros caso o lodo primário, resultante do sistema de recuperação de fibras, esteja sendo reutilizado no processo. Esta aplicação pode não só melhorar a formação de flocos e recuperação de fibras, mas também beneficiar a retenção na tela da máquina de papel (ACKERMANN; GOTTSCHING; PAKARINEN, 2000).

6. CONCLUSÕES

A caracterização dos efluentes água clara gerados pela fabricação dos dois tipos de papel evidenciou grande concentração de fibras passíveis de remoção, com valores de SST correspondentes a 545mg/L e 410 mg/L para o efluente *print* e *gloss*, respectivamente.

A flotação por ar dissolvido, com auxílio do polímero catiônico, melhorou as características do efluente água clara, sendo recomendado para tratamento primário, visando remover as fibras perdidas no processo produtivo.

Os sólidos suspensos totais, os quais representam as fibras contidas no efluente água clara, foram eficientemente removidos na FAD, chegando a 99% de remoção deste parâmetro.

O uso de polímero catiônico possibilitou a formação de flocos grandes e bem estruturados, facilitando a flotação do material suspenso. O polímero catiônico utilizado é indicado, pois a empresa já utiliza este produto no processo de retenção na formação da folha, sendo necessária uma pequena dosagem do produto, o qual obteve boa resposta no pH natural do efluente.

A configuração ótima determinada pelos ensaios em laboratório foi a dosagem de 1 mg/L de polímero catiônico e velocidade de flotação de 18 cm/min, para ambos os tipos de papel.

O tratamento por FAD da água clara proveniente do papel *gloss* obteve uma redução de 99% de SST, 25,5% de ST, 97% de cor, 98% de turbidez e 48,5% de DQO.

O tratamento por FAD da água clara proveniente do papel *print* alcançou valores de eficiência de remoção de 92,9% de SST, 42,7% de ST, 73% de cor, 97% de turbidez e não houve remoção de DQO.

Com base nas análises estatísticas e nos resultados de remoção dos parâmetros avaliados no estudo, em geral, podemos concluir que a flotação por ar dissolvido foi mais eficiente no tratamento da água clara do papel *gloss*. Porém os resultados para o tratamento do efluente do papel *print* também foram altamente satisfatórios.

Considerando que a indústria produz estes dois tipos de papel alternadamente, de acordo com a demanda, o tratamento dos dois efluentes produzidos na máquina de papel seriam viáveis com o auxílio do polímero catiônico, sendo que a dosagem ótima para ambos é a mesma de 1 mg/L.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Testar a tecnologia de flotação por ar dissolvido para o efluente água branca da máquina de papel.

Testar outros coagulantes e polímeros no tratamento.

Testar a combinação entre polímero e coagulante, visando reduzir custos de aplicação.

Variar outros parâmetros operacionais como porcentagem de recirculação, tempo de mistura rápida e mistura lenta na flotação por ar dissolvido.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2011 ano base 2010**. Brasília. 130p. 2011. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF11/ABRAF11-BR.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2014.

ACKERMANN, C.; GOTTSCHING, L.; PAKARINEN, H. **Papermaking potential of recycled fiber**. In: Göttching, L. and Pakarinen, H. (eds). Papermaking Science and Technology, Book 7, Recycled Fiber and Deinking; (Finland), 359-439. 2000.

ALEXANDERSSON, T.; **Water Reuse in Paper Mills, Measurements and Control Problems in Biological Treatment**, Lund University, Department of industrial electrical engineering, Licentiate Thesis, p. 8 – 11, 2003.

ALMEIDA, H.C. **Composição química de um resíduo alcalino da indústria de papel e celulose (DREGS)**.2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422007000700032&script=sci_arttext&tlng=pt> Acesso em: 28 out. 2014.

ALMEIDA, K. M. **Tratamento do efluente alcalino do branqueamento de polpa e celulose pelo processo de separação por membranas.**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,RS. 139 p, 2002.

AISSE, M. M.; JÜRGENSEN, D.; REALI, M. A. P.; PENETRA, R. G.; FLORENCIO, L.; ALEM SOBRINHO, P. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistema de flotação**. In: Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Vol. 2. PROSAB, Belo Horizonte-MG, 2001.

AMARAL, K. J. **Uso de água em indústria de papel e celulose sob a ótica da gestão de recursos hídricos**. 2008. Disponível em: <http://www.wp.coc.ufrj.br/teses/doutorado/rh/2008/Teses/AMARAL_KH_08_t_D_int.pdf>. Acesso em: 30 out. 2014.

AMORIM, I. B. S. F. **INFLUÊNCIA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NA FLOTAÇÃO**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás, Catalão - Go, 55 f. 2013.

ANDRIONI, J. L. L. **Fabricação de Papel, Formação da Folha**, volume II, Curitiba, cap 6 . 2006.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater**, 19 ed., Washington, 1998.

BELOSINSCHI, D.; BOBU, E. Process water of papermaking: model building and characterization, **Environ. Eng. Manag. J.** 6(4) 261-268. 2007.

BEN, Y.; DORRIS, G.M.; HILL, G.; ALLEN, J. Contaminant removal from deinking process water, Part I: mill benchmarking. **Pulp Pap. Can.** 104, 42. 2003.

BEN, Y.; DORRIS, G.M.; PAGÉ, N. Characterization of dissolved air flotation rejects. **Pulp & Paper Canada** 105(11): T246-251 Nov., 2004.

BRACELPA - Associação Brasileira de Celulose e Papel, **Relatório de dados do setor 2013** Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2014.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 15 jun. 2014.

BRYANT, C.W.; AVENELL, J.J.; BARKLEY, W.A.; THUT, R.N. The removal of chlorinated organics from conventional pulp and paper wastewater treatment systems. **Water Science Technology**, v. 26, n.1-2, p. 417-423, 1992.

CARVALHO, M. J. H. **Uso de Coagulantes Naturais no Processo de Obtenção de Água Potável**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2008.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (Df) (Org.). **Eficiência Energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados:- celulose e papel: série documentos técnicos**, 20. Brasília: Qualytá, 148 p. 2013.

CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Alterado pela Resolução CONAMA 397/2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama>>. Acesso em: 04set. 2014.

CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 9 p. Disponível em <http://www.legislacao.mutua.com.br/pdf/diversos_normativos/conama/2011_CONAMA_RES_430.pdf> Acesso em: 18 julh. 2014.

COSTANZI, R. N.; DANIEL, L. A. Estudo do tratamento de efluentes de uma fábrica de papel para imprimir visando o reuso por flotação e sedimentação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Trabalhos premiados. v. 7, n. 3 e 4, p. 156-160, 2002.

COSTANZI, R. N.; REALI, M. A. P.; DANIEL, L. A. Tratamento de efluentes de fábrica de papel por processos físico-químicos empregando flotação por ar dissolvido e ozônio. In: XXVII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. **Anais...** Porto Alegre, 2000.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de Água e Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos: Ldibe, 454 p. 2011.

DI BERNARDO, L.; CENTURIONE FILHO, P. L. Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1;2, p. 39-44, 2003.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de Tratabilidade de Água E Dos Resíduos Gerados Em Estações de Tratamento De Água**. São Carlos: Rima, 233 p. 2002.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. ABES, v.1, Rio de Janeiro. 1993.

DIXIT, M. K.; MALEIKE, T. A.; JACKIWSKI, C. W. Retention Strategies for Alkaline Fine Papermaking With Secondary Fiber: A Case History, **Tappi Journal**, 74(4):107. 1991.

DRUMMONT, D. M. D.; **Otimização para o posicionamento dos equipamentos do circuito de massa na fabricação de papel Tissue**, UNICAMP, Faculdade de Engenharia Química, Dissertação de Mestrado, Campinas, p. 31 - 32. 2004.

FOELKEL, C. Ecoeficiência na gestão da perda de fibras de celulose e do refugo gerado na fabricação de papel. **Eucalyptus Online Books & Newsletter**, 2007.

FOELKEL, C. **Oportunidades para ecoeficácia, ecoeficiência e produção mais limpa na produção de celulose Kraft de Eucalipto**, Eucalytpus Online Books & Newsletter, 2008.

FONSECA, J. A. V. M.; BARBOSA, M.; PINTO, N. O.; SALAN, R. S.; SOBRINHO, G. D.; BRITO, N. N.; CONEGLIAN, C. M. R.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. **Tratamentos de efluentes líquidos de indústria de papel e celulose**. III Fórum de Estudos Contábeis, Rio Claro, 01 fev. 2003. p. 1-9, 2003.

GRAVES, J.W.; JOYCE, T.W. A critical review of the ability of biological treatment systems to remove chlorinated organics discharged by the paper industry. **Water SA**, v. 20, n. 2, p.155-160, 1994.

IBÁ - Indústria brasileira de árvores. **Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2013**. Brasília: Ibá, 2014. 100 p. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/shared/iba_2014_pt.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2014.

KAYA, M.; KURAMA, H. **The role of flotation in waste recycling/recovery**. VIII Balkan Mineral Processing Conference Proceedings, Belgrade, Yugoslavia, Vol: 2, 729-736. 1999.

LACORTE, S.; LATORRE, A.; BARCELÓ, D.; RIGOL, A.; MALMQVIST, A.; ELANDER, T. Organic compounds in paper-mill process water and effluents. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 22, n.10. 2003.

LAVALÉE, H. C.; NADREAU, J. Dissolved air flotation system use increases for secondary clarification. **Pulp and Paper**. p. 99-100. Jan. 1997.

LIMA, M. R. A. **Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento das águas residuárias de uma indústria de papel visando a recuperação de fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos, SP. 102p, 1996.

LIMA, N. R. **Controle Ambiental no Setor de Celulose e Papel**. Apresentação da Comissão de Meio Ambiente da ABTCP: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2007.

LIMA, M. R. A.; REALI, M. A. P. Tratamento físico-químico das água residuárias de uma indústria de papel utilizando-se a flotação por ar dissolvido. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997, Foz do Iguaçu. **Anais**. Foz do Iguaçu: ABES,. p. 49 - 61. 1997.

MEDEIROS, D. R. **Tratamento de efluentes do branqueamento da polpa celulósica por processos oxidativos avançados baseados em ozônio.** Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos, SP. 223 p, 2008.

MEHTA, A.; SAIN, M.; NI, Y.; MORNEAU, D. Chemical Additive Optimization Program: Short-Cycle Clarification of Deinking Mill Alkaline — Water Loop. **Pulp & Paper Canada** 105(3): T67-70. Montreal, QC, January 28-30. 2003.

MIELI, J. C. A. **Sistemas de avaliação ambiental na indústria de celulose e papel.** Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal)Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2007.

NAVARRO, R. M. S. **Estudo dos diferentes tipos de processos de branqueamento de celulose objetivando a comparação entre seus métodos e a geração do potencial de poluentes em seus respectivos efluentes,** UNICAMP, Faculdade de Engenharia Química,Dissertação, Campinas, p. 6,7. 2004.

NUNES, D. C. L. **CONSERVAÇÃO DE ÁGUA EM MÁQUINA DE FABRICAÇÃO DE PAPEL:** O caso da Bahia Sul Papel e Celulose S.A.. 2007. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Engenharia da Energia, Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

PENETRA, R. G. **Pós-tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 140 p. 1998.

PINHEIRO, R. M.; VIEIRA. C. M. F.; SÁNCHEZ. R.; MONTEIRO, S. N.; **Caracterização de resíduos de papel,** 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, junho, p.10, 2007.

PIOLTINE, A. **Avaliação do desempenho de bomba multifásica na geração de microbolhas de ar para o processo de flotação por ar dissolvido aplicado ao pré-tratamento de efluente de indústria têxtil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos,SP. 107 p, 2009.

PROSAB – Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (coordenador). Belo Horizonte- MG, 2001.

QUARTAROLI, L.; KURITZA, J. C.; CAVALLINI, G. S.; VIDAL, C. M. S.; SOUZA, J. B. Aplicação de polímeros aniônico e catiônico na flotação por ar dissolvido como forma de pós-tratamento de efluente de indústria de papel e celulose. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 2, n. 101, p.57-67, mar. 2014.

QUARTAROLI, L.; **Aplicação da flotação por ar dissolvido como pós-tratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose** (Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2012.

REALI, M. A. P. **Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de Flotação por Ar Dissolvido e Filtração com taxa declinante.** Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos,SP. 1991.

REALI, M. A. P.; MARCHETTO, M. Clarificação por flotação de água bruta com cor moderadamente elevada. In: XXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** ABES. 1997.

ROMERO, S. R. Recuperação de fibras e clarificação de águas. In: **Seminário – Fabricação de papel tissue.** ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Canoinhas, SC. 27 e 28 de Junho de 2001.

RUSSO, M. A. T. **Tratamento de resíduos sólidos**, Universidade de Coimbra, Faculdade de ciências e tecnologia, p. 62 – 64, 2003.

SANTA MARIA CIA DE PAPEL E CELULOSE . **Recuperação de Fibras Filtro de Discos.** 2. ed. Guarapuava, PR. 26 p. 2010.

SANTOS FILHO, F. **Tecnologia de tratamento de água para a indústria.** Nobel. São Paulo. 1973.

SANTOS, H. R. **Coagulação/precipitação de efluentes de reator anaeróbio de leito expandido e de sistema de lodo ativado precedido de reator UASB, com remoção de partículas por sedimentação ou flotação.** 331 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2006.

SILVA, C. M. Utilização de membranas sintéticas na indústria de celulose e papel. **O Papel**, São Paulo, p56, jan. 2000.

SILVA, H. F. S. **Estudo do tratamento de águas residuais da fábrica 1 da Renova.** 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Química, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2013.

SILVEIRA, D. S. A. **Avaliação da eficiência da ozonização combinada com tratamento por lodos ativados de efluentes de fábricas de celulose Kraft branqueada.** Dissertação de Mestrado. M Sc. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2009.

TAMBOSI, L.J. **Remediação de Efluente da Indústria de Papel e Celulose por Processos Oxidativos Avançados e Coagulação Férrica.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2005.

THOMPSON, G.; SWAIN, J.; KAY, M.; FORSTER, C.F. The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. **Bioresource Technology**, v. 77, p. 275-286, 2001.

WOODWARD, T. W. Chemical Processing Aids Short Course Proceedings, **Deinking Chemistry**, TAPPI Press, Atlanta, P. 85. 1991

WOOLLEN, P.S.; PUHAR, E.; KUHN, D. The Impact of Water Clarification on Deinking Systems, **Wastepaper VI** Conference Proceedings, 1995. ZAR, J. H. **Biostatistical analysis**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

ANEXOS

O equipamento flotateste (Figura 14) é constituído de uma câmara de pressurização, e de três jarros de coagulação/floculação/flotação, em acrílico transparente com dimensões de 115 x 115 mm² e com capacidade de 2 litros cada. A base do jarro é composta por uma placa constituída por 121 orifícios de 2 mm de diâmetro, os quais são responsáveis pela condução de água saturada com ar e tem por objetivo distribuí-la de forma uniforme e rápida.



Figura 14. Equipamento flotateste utilizado nos ensaios.

As etapas de coagulação, floculação e flotação são todas realizadas nos jarros de flotação. O equipamento contém agitadores de aço inox com paleta de 25 x 75 mm², portanto, a relação entre a rotação do equipamento e o gradiente de velocidade é conhecida.

O sistema de condução de água saturada com ar é constituído por mangueiras de poliuretano, as quais resistem a alta pressão, registros de esfera e tês de conexão rápida e sistemas pneumáticos responsáveis pela entrada de água saturada (recirculação) nos jarros.

O primeiro passo para a realização do ensaio de coagulação, floculação e flotação é a saturação da água de recirculação com ar, dissolvendo-o em pressão superior de 5 bar, e a caracterização do efluente em estudo quanto aos parâmetros desejados para investigação.

Segundo Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002), a pressurização é realizada na seguinte sequência:

Passo 1: encher a câmara com água clarificada mantendo o registro 1 aberto e os registros 2, 5 e 6 fechados. Quando atingir o nível indicado 7, fechar o registro 1 (Figura 15).

Passo 2: ligar o compressor de ar e regular a pressão na câmara de saturação utilizando o registro principal do sistema. Para isso, é necessário girar e abrir gradativa e totalmente o registro 2 no sentido horário (Figura 15).

Passo 3: para mantê-lo inalterado, é necessário alguns ajustes de acordo com as oscilações de pressão. Utilizar o registro 3 para regulagem mais precisa e o manômetro 4; saturar a água pelo tempo desejado, aproximadamente 15 minutos (Figura 15).

Passo 4: ao final do tempo de saturação, fechar simultaneamente o registro 2 e abrir o 5; este último tem por função manter a pressão inalterada no interior da câmara durante a recirculação da água saturada (Figura 15).

Passo 5: levantar as hastes dos agitadores e encher gradativamente, até a marca de 2 litros (NA - Figura 17), os 3 jarros com pequenas porções do efluente de estudo previamente aquecidas a 37 °C (com o auxílio de aquecedores de água). A fixação da temperatura é importante, pois ensaios com um mesmo efluente sob condições diferentes de temperatura podem conduzir a resultados diferentes. Neste caso o efluente foi aquecido para recriar as situações reais da indústria, repetindo a mesma temperatura de quando foi coletado.

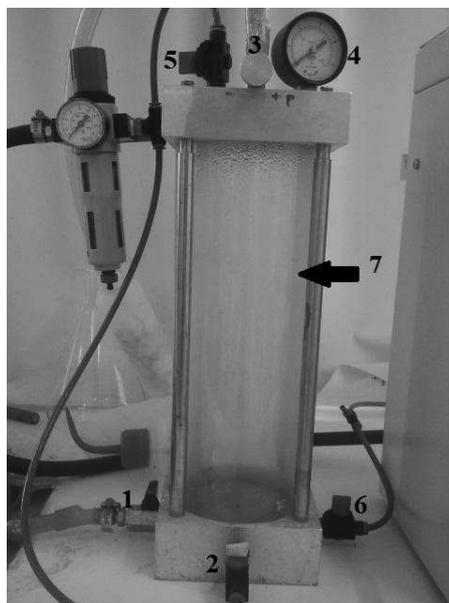


Figura 15. Câmara de saturação e válvulas.

Passo 6: é extremamente importante eliminar as bolhas e pequenas bolsas de ar que possam existir na base do jarro de flotação, pois a permanência das mesmas afetará a distribuição da água saturada com ar durante a recirculação. Isto pode ser feito quando o volume de cada jarro atingir um quarto do volume total, inclinando-se o jarro para que ocorra a expulsão do ar. Também é aconselhável, com o auxílio de um bastão de acrílico, retirar as bolhas de ar formadas na parte inferior do jarro, na placa perfurada, com leves batidas.

Passo 7: conectar a mangueira de condução e distribuição de água saturada utilizando os registros têm número 8 (Figura 16), preenchendo-a com água saturada com ar e abrindo o registro número 6 (Figura 15).

Passo 8: efetuar o descarte de pequena parcela de água saturada pelo registro número 9 (Figura 16) para manter a mangueira de distribuição pressurizada até a entrada de todos os jarros de flotação.

Para realizar o ensaio de coagulação, floculação e flotação, o procedimento é o seguinte:

Passo 9: ligar o equipamento e ajustar a rotação para cerca de 100 rpm.

Passo 10: adicionar, conforme a necessidade, alcalinizante ou acidificante utilizando os recipientes apropriados posicionados na parte superior do aparelho. Neste estudo não foi realizada a correção do pH, pois o pH natural do efluente foi mantido, visando facilitar o emprego em maiores escalas futuramente.

Passo 11: dosar o coagulante utilizando pipetas eletrônicas.

Passo 12: ajustar a rotação do equipamento correspondente ao gradiente de velocidade médio de mistura rápida e adicionar os coagulantes, simultaneamente.

Passo 13: acionar o cronômetro simultaneamente à adição do coagulante.

Passo 14: reduzir a rotação do equipamento para o valor correspondente ao gradiente de velocidade médio de floculação, depois de finalizado o tempo de mistura rápida.

Passo 15: depois do tempo de mistura lenta estar completo, desligar a agitação, suspender as hastes dos agitadores e abrir os registros têm 8 dos jarros de flotação (Figura 16) imediatamente, na seguinte sequência: primeiro o registro do meio e logo em seguida os demais. Observar a flotação do efluente até a taxa de recirculação (R) prevista (Figura 17), terminada a recirculação fechar os registros dos jarros de acrílico e acionar o cronômetro.



Figura 16. Sistema de mangueira, tês e jarros.

A quantidade de água da recirculação a ser introduzida em um jarro é calculada em função do volume do mesmo (2.000 mL). Se a taxa (R) é de 20%, indicada na Figura 17, será introduzido um volume de 400 ml de água saturada com ar. Sabendo-se a área de um jarro ($11,5 \times 11,5 \text{ cm}^2$), pode ser calculada a altura ($h_{R=20\%}$) correspondente ao volume de água a ser introduzido: $h_{R=20\%} = (400 / \text{área}) = 3,02 \text{ cm}$. Essa altura pode ser identificada na face frontal do jarro, acima do nível de água (NA) (Figura 17), correspondente ao volume de 2.000 ml. O cálculo para outras taxas segue o mesmo procedimento: recomenda-se a taxa mínima de recirculação de água saturada com ar igual a 5%.

No ensaio de flotação, o ponto de coleta (PC) é o indicado na Figura 17, situado a 12 cm da base do jarro, correspondente a primeira mangueira de coleta, de cima para baixo.

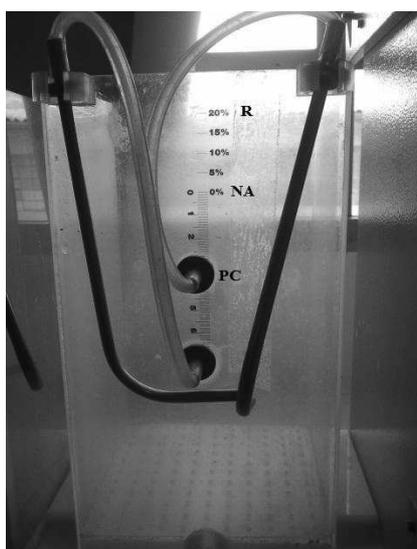


Figura 17. Jarro de flotação.

O tempo de coleta (T_c) correspondente às velocidades ascensionais (VA) desejadas pode ser calculado pela seguinte equação:

$$T_c (\text{min}) = \frac{12 (\text{cm})}{VA \left(\frac{\text{cm}}{\text{min}}\right)}$$

No caso de estudo foram determinadas duas velocidades ascensionais VA_1 e VA_2 , de acordo com o que foi registrado na literatura e compatível com as taxas de aplicação de equipamentos de flotação disponíveis no mercado.

Assim determinadas as velocidade ascensionais, realiza-se o seguinte cálculo: $VA_1 = 18 \text{ cm/min}$ resulta em $T_{c2} = 0,66$ minutos (40 segundos). $VA_2 = 9 \text{ cm/min}$ resulta em $T_{c1} = 1,33$ minutos (1 minuto e 20 segundos). Como o tempo de coleta de amostra de água flotada deve ser de 20 segundos, inicia-se a coleta para VA_1 com 1 minuto e 10 segundos e termina-se com 1 minuto e 30 segundos. Para VA_2 a coleta começa com 30 segundos e termina com 50 segundos. Lembrando que é necessário efetuar descarte de 2 segundos, antes de cada coleta.

Passo 16: descartar a água por 2 segundos e iniciar a coleta das amostras utilizando o suporte coletor com o movimento indicado na figura x para o tempo de coleta (T_c) correspondente às velocidades ascensionais (VA) desejadas.

Passo 17: efetuar leitura dos parâmetros (SST, ST, DQO, cor aparente, turbidez e pH) de acordo com os métodos previstos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 19 ed. (APHA, 1998), e se possível preservar as amostras.