

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS LONDRINA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

HÁDEL CAMILO MARTINS

**ESTUDO SOBRE OS PROCESSOS DE COAGULAÇÃO,
FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO EM EFLUENTES ORIUNDOS DE
USINA CANAVIEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2014

HÁDEL CAMILO MARTINS

**ESTUDO SOBRE OS PROCESSOS DE COAGULAÇÃO,
FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO EM EFLUENTES ORIUNDOS DE
USINA CANAVIEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro

Coorientador: Prof. Dr. Ajadir Fazolo

Coorientador: Prof. Me. Bruno Freitas

LONDRINA

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Estudo Sobre os Processos de Coagulação, Flocculação e Decantação em Efluentes Oriundos de Usina Canavieira

por

Hádel Camilo Martins

Monografia apresentada no dia 26 de março de 2014 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____
(aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Dr. Ajadir Fazolo
(UTFPR)

Prof. Dra. Edilaine Regina Pereira
(UTFPR)

Profa. Dra. Joseane Debora Peruço Theodoro
(UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Joseane Debora Peruço Theodoro
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

AGRADECIMENTOS

Torna-se extremamente difícil agradecer a todas aquelas pessoas que de algum modo, nos pequenos detalhes, fizeram e fazem parte da história deste estudo e da minha vida, por isso primeiramente vou agradecer a Deus. Responsável por fornecer força e coragem para encarar a longa jornada universitária que se encerra com este Trabalho de Conclusão de Curso e iluminar a vida e o coração de cada uma das pessoas responsáveis pelo pleno desenvolvimento desta tarefa. E, agora que já agradeço a Deus, posso agradecer do fundo do meu coração a todos aqueles que colaboraram de qualquer forma para a elaboração deste trabalho. Que Deus continue sempre a iluminar e abençoar o coração de vocês.

Agradeço aos meus orientadores pelo conhecimento, paciência, dedicação, pelos trabalhosos e alegres momentos em que passamos juntos no laboratório e principalmente por atenderem a todos os chamados de seu orientando. Também gostaria de agradecer as minhas orientadoras não oficiais, muito obrigado pelo precioso tempo dedicado Srta. Nariane Bernardo e Srta. Narrayana Yassu.

Agradeço a Empresa responsável pelo fornecimento do material do estudo, sem eles não seria possível a elaboração deste trabalho.

Agradeço a Empresa Evolua Ambiental e a Srta. Nayla Libos pelo apoio e colaboração, concedendo-me todo tipo de ajuda necessária para a finalização deste trabalho. Sinto-me honrado pela oportunidade de fazer parte de um estabelecimento como este.

Agradeço aos meus pais, Armando Camilo Martins e Jaqueline Gesualdi Benedito Martins, pelo apoio, amor incondicional e dedicação ao longo dos meus 23 anos de vida, principalmente agora, na reta final do curso. Dna. Jaqueline, vivi uma semana de rei ao seu lado enquanto estive aqui!

Agradeço ao meu irmão, Sr. Heitor Camilo Martins, topetudo, poço de amor e carinho. No decorrer da vida, nas horas de aperto, mesmo sendo o caçula, é sempre bom contar com seus conselhos, ruins mais muito engraçados.

Agora, de forma geral, agradeço a minha família, pessoas com quem posso contar sempre, não importa a situação: mudanças, limpeza da casa, cafés da tarde, conselhos para exames de vista, trabalhos e churrasco na oficina do muito amado

vô Ernesto Benedito e, principalmente, nos puxões de orelha que contribuíram muito na minha criação.

Já que falei em família, gostaria de agradecer a Família Taiatele pelo imenso apoio e colaboração. Se não fosse pela força, abrigo e exílio concedidos pelo Sr. Ivan Jr., não sei o que seria deste trabalho. Ao Sr. Maloca e a Sra. Marli, foi muito bom ser seu neto por alguns dias, logo eu volto passar mais uma temporada em Jataizinho.

Também gostaria muito de agradecer a Srta. Caroline Leal, pessoa a quem dedico muito respeito e admiração. Foi muito bom poder contar com você no decorrer desta jornada, espero que esta amizade, carinho e respeito ainda perdurem por muitos e muitos anos.

Não poderia deixar de agradecer aos amigos e frequentadores assíduos da Mansão 303, sem eles nada seria tão divertido. Mesmo me atrapalhando em momentos em que eu não poderia ser atrapalhado e às vezes em momentos em que eu queria ser atrapalhado, foi muito bom contar com a presença de todos os feras lá. Vale lembrar que muito provavelmente não estaria escrevendo isso se não desse tempo de terminar.

Por fim, tenho absoluta convicção de que ninguém ficará magoado ou se sentirá menosprezado com a minha dedicatória, pois sei que todos aqueles que me conhecem sabem da importância e representatividade desta pessoa na minha vida. Não poderia deixar de dedicar este trabalho à outra pessoa, se não *in memoriam* do saudoso trocador de relógios, do saudoso tocador de sanfona, homem que aprendeu a ler e escrever sozinho, meu saudoso avô Anibal Camilo Martins, grande homem, e que, assim como meu pai, são meus espelhos de vida e caráter.

RESUMO

MARTINS, Hádél C. **Estudo Sobre os Processos de Coagulação, Floculação e Decantação em Efluentes Oriundos de Usina Canavieira.** 2014. 56p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

O principal resíduo do processamento da cana-de-açúcar na indústria sucroalcooleira é a vinhaça. Trata-se de um efluente com características 100 vezes mais poluidoras que o esgoto doméstico e gerado em grandes volumes, a uma razão de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido. Devido à grande quantidade de vinhaça gerada pelas destilarias e as perspectivas favoráveis à produção do etanol no cenário brasileiro, vários projetos tem sido propostos para a diminuição dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado deste efluente. O presente trabalho tem como objetivo promover o tratamento da vinhaça de forma que os impactos causados pelo seu descarte inapropriado sejam minimizados, possibilitando até o reúso deste efluente. Neste contexto, optou-se pelo tratamento da vinhaça por meio dos processos físico-químicos de coagulação, floculação e decantação em jar test, utilizando como coagulantes não-naturais o Cloreto Férrico e o Sulfato de Alumínio, e como coagulante natural o Tanfloc SG. Foram feitos testes de pH, cor, turbidez, sólidos e sólidos voláteis. Os resultados mostram que os coagulantes não-naturais não obtiveram êxito no processo de tratamento da vinhaça, diferentemente do que aconteceu com o Tanfloc SG. O coagulante natural utilizado chegou a índices de 90% de remoção de cor e 98% de remoção de turbidez.

Palavras-chave: Indústria sucroalcooleira. Vinhaça. Tratamento físico-químico. Coagulante. Remoção de sólidos.

ABSTRACT

MARTINS, Hádél C. Study About Coagulation, Flocculation and Decanting Processes on Effluents from Sugarcane Usine. 2014. 56p. Completion of course work – Federal Technological University of Parana, Londrina, 2014.

The main residue from processing sugarcane at sugar-alcohol industry is the vinasse. It consists of an effluent with characteristics 100 times more pollutant than domestic sewage and it is generated in huge volumes, at a ratio of 10 to 15 liters of vinasse per liter of ethanol produced. Due to the huge amounts of vinasse generated at distilleries and due to favorable perspectives of ethanol production at Brazilian scenario, several projects have been proposed in order to decrease environmental impacts caused by inadequate discard of this effluent. The current study aims to promote vinasse treatment so that the impacts caused by inappropriate discard be minimised, thus even enabling reuse of this effluent. In this context, vinasse treatment by means of physicochemical processes of coagulation, flocculation and decantation in jar test was chosen, utilising unnatural coagulants – ferric chloride and aluminium sulfate – and natural coagulant – Tanfloc SG. Tests of pH, colour, turbidity, solids and volatiles solids were made. Results showed that unnatural coagulants did not succeed on vinasse treatment, unlike what has happened with Tanfloc SG. The natural coagulante utilised reached rates of 90% off colour removal and 98% of turbidity removal.

Key-words: Sugar-alcohol industry. Vinasse. Physicochemical treatment. Coagulant. Solids removal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Projeção da produção, área e produtividade brasileira indústria sucroalcooleira até o ano de 2023.	18
Figura 2: Fluxograma da produção de etanol.....	19
Figura 3: Estrutura química do tanato.	28
Figura 4: Esquematização do processo de sedimentação: (a) antes da sedimentação (b) após sedimentação.....	29
Figura 5: Galões onde utilizados para estocagem de vinhaça.	30
Figura 6: Técnico realizando a coleta da vinhaça	31
Figura 7: Jar test e soluções coagulantes.	33
Figura 8: Jarro do jar test com mangueira de coleta de dados.....	35
Figura 9: Vinhaça com pH 7,30 (esq.) e vinhaça com pH 3,45 (dir.)	36
Figura 10: Variação do pH em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH.....	39
Figura 11: Variação do pH em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH.....	40
Figura 12: Variação do percentual de remoção da cor em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH	42
Figura 13: Variação do percentual de remoção da cor em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH	43
Figura 14: Variação da remoção da cor em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH	44
Figura 15: Variação da remoção da cor em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH	44
Figura 16: Variação do percentual de remoção da turbidez em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH	47
Figura 17: Variação do percentual de remoção da turbidez em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH	48
Figura 18: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH	49
Figura 19: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH	50

Figura 20: Variação do percentual de remoção de sólidos em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH	51
Figura 21: Variação do percentual de remoção do sólidos em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH	52
Figura 22: Variação da remoção percentual de sólidos voláteis em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH	53
Figura 23: Variação da remoção percentual de sólidos voláteis em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análise de Remoção da Cor para Vinhaça com Ajuste de pH	41
Tabela 2: Análise de Remoção da Turbidez para Vinhaça Sem Ajuste de pH.....	41
Tabela 3: Análise de Remoção da Turbidez para Vinhaça com Ajuste de pH	46
Tabela 4: Análise de Remoção da Turbidez para Vinhaça Sem Ajuste de pH.....	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. JUSTIFICATIVA.....	14
3. OBJETIVOS.....	15
3.1. OBJETIVO GERAL	15
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
4.1. ECONOMIA E MEIO AMBIENTE	16
4.2 A INDÚSTRIA CANAVIEIRA NO BRASIL.....	17
4.3 CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE.....	18
4.3.1 Características Físicas do Efluente	20
4.3.2 Características Químicas do Efluente	22
4.4 EFLUENTE RESIDUAL.....	23
4.5. PROCESSO DE TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DO EFLUENTE.....	24
4.5.1 Coagulação e Floculação	24
4.5.2 Coagulantes	25
4.6 DECANTAÇÃO	29
5. MATERIAIS E METODOS	30
5.1 COLETA.....	30
5.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO.....	31
5.2.1 AJUSTE DO pH E PREPARO DAS SOLUÇÕES COAGULANTES.....	32
5.2.2 TESTES INICIAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS MELHORES FAIXAS DE REMOÇÃO PARA OS DIFERENTES COAGULANTES	32
5.2.3 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DOS DADOS QUANTITATIVOS DE REMOÇÃO	34
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6.1 TESTES INICIAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS MELHORES FAIXAS DE REMOÇÃO PARA OS DIFERENTES COAGULANTES	36
6.2 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DOS DADOS QUANTITATIVOS DE REMOÇÃO .	37
6.2.1 COAGULANTES INORGÂNICOS.....	37

6.2.2 COAGULANTE NATURAL	38
7 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS.....	56
Anexo A.....	62

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico traz consigo uma série de benefícios e reverses em cadeia. Dentre os benefícios é possível identificar o crescimento dos centros urbanos e a decorrente geração de emprego e renda, porém, é este mesmo crescimento que ocasiona impactos ambientais provenientes de ações antrópicas intensas, irresponsáveis e não planejadas (THEODORO, 2012).

A fim de subsidiar o crescimento econômico, e conseqüentemente produtivo, é necessário o fomento desses processos por meio do aumento do uso de matérias-primas, o que pode ser considerado mais um revés do desenvolvimento econômico. Segundo Siqueira (2009) é o preço a ser pago por tamanha despreocupação, superexploração, má distribuição, poluição, desmatamento e desperdício – fatores que afetam diretamente a qualidade do meio ambiente.

A partir de um contexto de impactos mundiais incessantes, iniciou-se a busca pelo desenvolvimento de ações cujo propósito era reduzir ou eliminar as alterações de caráter irreversível no meio ambiente.

No cenário brasileiro destaca-se a adoção do etanol como força motriz, sendo o etanol, um combustível capaz de ser produzido no país por indústrias sucroalcooleiras, ou de outros insumos agrícolas, e que além de ser uma matriz energética renovável e limpa (AZEVEDO, SANTOS e MAGALHÃES, 2012), foi responsável por reduzir as dependências nacionais do petróleo importado (SCHUCHARDT et al., 2001). Segundo Teixeira (2013), o Brasil chegou a ser autossuficiente em petróleo, porém, devido a um consumo mais acelerado que o ritmo de produção de petróleo esta autossuficiência foi perdida, existem previsões para que seja reestabelecida em entre 2015 e 2016.

Devido as proporções continentais, clima e solo adequados para a produção da cana-de-açúcar, Chagas (2009) afirma que o Brasil é um país que possui grande propensão para a produção de biocombustíveis como o etanol. Já Laime et al. (2011), avalia a importância do setor sucroalcooleiro no cenário nacional (3,5% PIB), o potencial de crescimento do setor e volume de vinhaça produzida - 250 bilhões de litros em 2010 segundo Oliveira (2011). As variáveis apresentadas por Chagas (2009) e Laime et al. (2011) expressam a importância e viabilidade da busca por novas tecnologias para uma produção ecologicamente mais correta no país.

O etanol é visto como um meio para reduzir os impactos globais, pois se trata de um combustível que produz menor quantidade de CO₂ e, além disso, ainda sequestra parte do CO₂ durante o processo de desenvolvimento da cana-de-açúcar (SCHUCHARDT et al., 2001). No entanto, mesmo sendo considerada uma fonte mais limpa de energia, o processo produtivo do etanol gera a vinhaça, um material bastante hostil, comparativamente, 100 vezes mais poluente que o esgoto doméstico e que muitas vezes é lançado diretamente no meio ambiente, levando à contaminação das águas (LAIME et al., 2011).

Em decorrência desta grande carga poluidora da vinhaça foram desenvolvidos estudos referentes a destinação deste efluente, como aborda Neto (2009), em relação ao reúso da água em refinarias de álcool, de forma que a produção deste efluente fosse minimizada. Como consequência disto, a utilização de tratamentos biológicos (CABELLO et al, 2009), coagulantes químicos e até coagulantes poliméricos naturais (RODRIGUES, 2011), surgem como alternativas para a produção uma água residuária menos agressiva ao meio ambiente e que ocasionalmente poderia voltar ao processo produtivo.

Desta forma, o presente trabalho tem por princípio avaliar o desempenho de diferentes coagulantes, naturais e não-naturais, na remoção sólidos presentes na vinhaça. 'O trabalho será apresentado em 7 capítulos: o capítulo 1 apresenta brevemente o conteúdo geral do trabalho. O capítulo 2 apresentará os objetivos gerais e específicos. No capítulo 3 justificou-se o porquê da escolha do tema e a importância de mais estudos na área. O referencial teórico, capítulo 4, consiste na ênfase dos principais conceitos para o pleno entendimento do trabalho. No capítulo 5 encontrar-se-á o tópico denominado materiais e métodos, responsável por descrever quais os procedimentos metodológicos adotado para a obtenção e análise dos dados. O capítulo 6 apresenta os resultados e discussões obtidos através da metodologia aplicada, descrita no item anterior. E, por fim, no capítulo 6 a conclusão, local dedicado ao fechamento das ideias discutidas neste trabalho.

2. JUSTIFICATIVA

Um tema que vem sendo muito discutido atualmente é o da sustentabilidade ambiental, conseqüentemente, chega-se no assunto: qualidade da água. Isso acontece devido à importância que essa substância exerce nos mais variados ciclos do planeta. Sendo assim, manter a qualidade da água significa preservar e manter o equilíbrio dos ciclos biológicos, geológicos e químicos da terra.

Não é só o meio ambiente que necessita das propriedades físico-químicas da água, ela também é um bem indispensável em grande parte dos processos industriais. Contudo, não há uma preocupação em relação ao saneamento de recursos hídricos por parte de algumas entidades, o que faz com que os efluentes atraiam a atenção da sociedade.

Tendo em vista a necessidade do uso da água nos processos naturais e antropológicos, surge a obrigação de se encontrar meios eficazes para o tratamento e manutenção desse recurso. Atualmente, para o tratamento de efluentes um dos processos utilizados é o de coagulação, floculação e decantação. Esse processo faz parte de uma operação responsável pela desestabilização das partículas coloidais em um sistema aquoso, preparando-as para a sua remoção nas etapas subsequentes do processo de tratamento.

Levando em conta a sustentabilidade econômica e as questões históricas do país, surge, em meados dos anos 70, a necessidade de se obter fontes alternativas de energia devido à crise do petróleo. Com o intuito de diminuir a dependência desse recurso, o governo brasileiro gera medidas que visam estimular o aparecimento de matrizes energéticas nacionais. Desde então, o etanol vem ganhando cada vez mais importância no cenário energético brasileiro.

Com a maior demanda por etanol, a quantidade de resíduos provenientes do seu processo de fabricação aumentou, conseqüentemente, a preocupação com a destinação correta para esse material também. Desta forma, surge a oportunidade de se fazer um estudo dos processos de coagulação/floculação/decantação em efluentes de usinas canavieiras.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Estudar o tratamento da água residual proveniente da indústria canavieira através do processo de coagulação, floculação e decantação, o qual utilizou como coagulantes não-naturais o cloreto férrico e sulfato de alumínio e o Tanfloc SG como coagulante natural.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a água residuária;
- Avaliar a eficiência do processo de coagulação, floculação e decantação;
- Comparar o desempenho dos coagulantes químicos (cloreto férrico e sulfato de alumínio) e do coagulante natural (Tanfloc SG).

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. ECONOMIA E MEIO AMBIENTE

Segundo a Política Nacional do Meio Ambiente, estabelecida pela Lei nº 6.938/81, o meio ambiente consiste em um conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas (BRASIL, 1981). Para que ocorra o desenvolvimento econômico, deve-se haver a exploração desse meio. Desta forma, o uso sustentável do meio ambiente é tratado como um entrave para o acelerado crescimento global (CAVALCANTI, 2002). O que deve existir, de acordo com Costa e Ignácio (2011), é uma relação de equilíbrio entre o consumismo e o meio ambiente.

Muitas vezes, a busca por maiores lucros faz como que exista um descaso com o meio ambiente. Em decorrência desse processo, fica estagnada a procura por alternativas ambientalmente mais vantajosas. Young (2007) demonstra que crescimento econômico e qualidade ambiental podem ser complementares em um ciclo de desenvolvimento sustentável, ao contrário da visão tradicional, que sugere que políticas ambientais são entraves para o setor produtivo. Para Young (2007, p. 88):

“Apesar de a relação entre crescimento e conservação ambiental ter sido, historicamente, caracterizada pelo antagonismo, estudos recentes sobre competitividade e regulação ambiental mostram que empresas podem lucrar com posturas “verdes”, em razão de ganhos de eficiência e de mercado, maior capacidade de captação de capital e redução na percepção de riscos. Mas essa relação virtuosa só será atingida se mecanismos adequados de regulação forem estabelecidos, abandonando a excessiva rigidez das atuais práticas de política ambiental e adotando instrumentos mais flexíveis que favoreçam a mudança de comportamento empresarial.”

A respeito do ponto supracitado, nota-se a necessidade de uma maior maleabilidade das práticas de política ambiental. A falta dessa flexibilidade impede a ocorrência de atitudes sustentáveis por conta da inviabilidade burocrática que certas atividades demandam, o que acaba estagnando o sistema.

4.2 A INDÚSTRIA CANAVIEIRA NO BRASIL

Na Região Centro-Sul do Brasil são encontradas 330 usinas canavieiras, que são responsáveis pelo processamento de 90% de toda a cana do país (REHDER, 2013). De acordo com Sampaio e Vieira (2009) praticamente todo o restante das usinas canavieiras estão localizadas na região Nordeste do Brasil. Visto à importância da indústria canavieira, e preocupando-se com os aspectos impactantes do setor sucroalcooleiro, surgiu o interesse em se fazer estudos sobre o tratamento de efluentes provenientes da indústria canavieira, ramo industrial que vem ganhando cada vez mais força no cenário econômico nacional.

Historicamente, contextualizando o que levou a indústria canavieira ao destaque que tem hoje no cenário nacional e servindo de exemplo para a citação de Young (2007), a respeito da adoção de “posturas verdes”. Lobão (2008, p. 3) demonstra como crescimento econômico e qualidade ambiental podem ser complementares:

“Nos dois choques do petróleo, em 1973 e 1979, o Brasil sofreu o impacto da elevação dos preços, principalmente porque havia uma forte dependência, materializada na importação de 80% do óleo bruto então consumido no País. A partir do novo patamar de preços e das necessidades de crescimento econômico e desenvolvimento industrial, o País adotou duas grandes estratégias para contornar a crise: investimentos para aumento da produção doméstica de petróleo e a implementação do Proálcool, o maior e mais bem-sucedido programa de substituição de combustíveis derivados de petróleo do mundo. Hoje, a matriz energética brasileira é a que conta com a maior participação de energias renováveis - um exemplo de sustentabilidade.”

Uma das medidas tomadas pelo governo brasileiro foi a criação do Proálcool, como já frisado anteriormente. O sucesso do programa foi tão grande que atualmente o etanol ainda exerce grande papel no cenário energético nacional. Nitsch (1991), quase duas décadas antes de Lobão (2008) já era capaz de prever tamanho destaque. Segundo Nitsch (1991), o programa teve tanto destaque que pouco mais de uma década depois da sua criação, oficializada pelo Decreto nº 76.593 de 1975, 44% dos automóveis de passeio já eram movidos a etanol e o restante, os outros 56% com uma mistura de gasolina e álcool a 20%.

Desta forma, pode-se dizer que o Proálcool, vem incitando a produção de etanol até os dias de hoje. A tendência é que a produção de álcool aumente cada vez mais com o passar dos anos, como mostra a Figura 1: Projeção da produção, área e produtividade brasileira indústria sucroalcooleira até o ano de 2023.(OUTLOOK FIESP 2023, 2013).

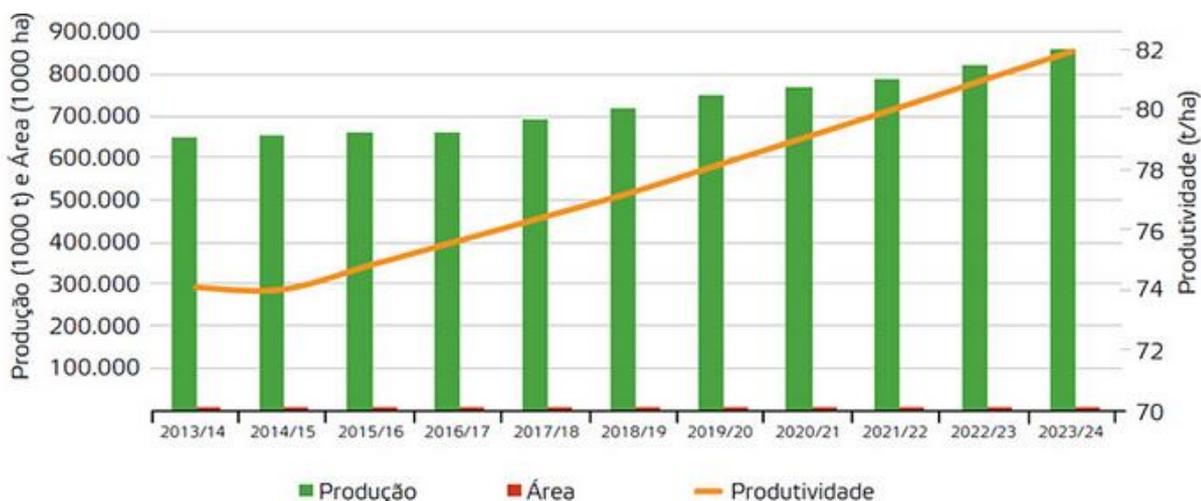


Figura 1: Projeção da produção, área e produtividade brasileira indústria sucroalcooleira até o ano de 2023.

Forte: Modificado Outlook FIESP 2023 (2013), p 38.

O gráfico a cima, elaborada por Outlook FIESP 2023 (2013), além de mensurar a área de plantio faz uma projeção do aumento produção e da produtividade da cana de açúcar até o ano de 2023. Como pode ser observado, a tendência para a próxima década é de que a produção de cana de açúcar quase triplique, essa crescente produção demandará ainda mais cuidado, pois o descarte de efluentes aumentará proporcionalmente a quantidade de cana de açúcar processada.

4.3 CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE

O principal efluente gerado no processamento da cana-de-açúcar é denominado vinhaça, mas também pode ser conhecido como vinhoto, restilo, calda ou garapão. Sua composição varia de acordo com a natureza da matéria prima, tipo de levedura utilizado no processamento e operação dos aparelhos de destilação (FARIA et al., 2011).

A Figura 2 trata-se de um fluxograma que representa simplificada o processo produtivo de uma indústria sucroalcooleira, a partir desse fluxograma pode-se observar qual a origem da vinhaça no processo de beneficiamento da cana-de-açúcar.

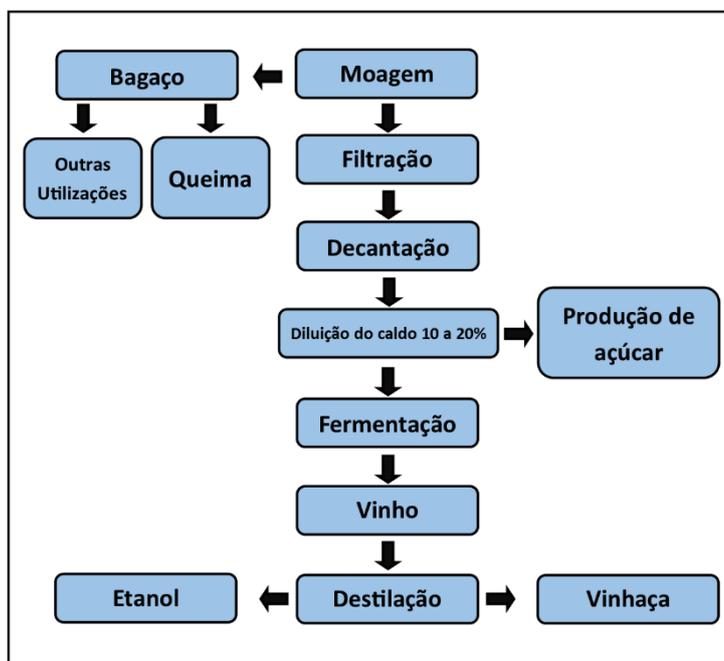


Figura 2: Fluxograma da produção de etanol
Fonte: Autoria própria, 2014.

A vinhaça, como é mais conhecida, tem como seu principal componente matéria orgânica, basicamente sobre a forma de ácidos orgânicos e, em menores quantidades, composta por cátions como o K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , sendo que sua riqueza nutricional dá-se principalmente pela origem do mosto, tipo de levedura utilizado para a produção do etanol (ROSSETTO, 1987 apud Silva et al., 2007)¹.

Além do potencial poluidor característico do efluente residual do processamento da cana-de-açúcar, outro agravante é a quantidade de efluente gerado na indústria sucroalcooleira. Segundo o Termo de Referência para o Workshop Tecnológico (2007) são gerados cerca de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido. Estima-se que só no ano de 2007 foram gerados mais de 190 bilhões de litros de vinhaça no Brasil.

Os efluentes são caracterizados para que possam ser tratados conforme a necessidade, neste caso, a etapa de caracterização do efluente é imprescindível

¹ Rossetto, A. J. Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: Paranhos, S.B. (ed.). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987, v.2, p.435-504.

para que o resíduo líquido em questão possa ser lançado dentro dos padrões estabelecidos. Sendo assim, os efluentes são caracterizados em decorrência das suas características físicas, químicas e biológicas. Nos itens a seguir, estão descritas as características referentes ao efluente da cana-de-açúcar (vinhaça).

4.3.1 Características Físicas do Efluente

4.3.1.1 Cor Aparente e Cor Verdadeira

Para Libânio (2010) a cor, característica física do resíduo, consiste no processo de reflexão da luz em partículas minúsculas, finamente dispersas e de caráter predominantemente orgânico.

De acordo com Moraes (2007) a determinação da cor aparente de um efluente líquido apresenta interferência da turbidez, pois esta absorve parte da radiação eletromagnética da amostra. Diferentemente, a cor verdadeira deve ser obtida após o processo de retirada dos sólidos suspensos por meio da filtração ou centrifugação, culminando na remoção das partículas causadoras da turbidez (diâmetro superior a 1,2 μm), possibilitando a medição da cor levando em conta apenas as partículas coloidais e dissolvidas.

Nos resultados obtidos por Lima et al. (2012) observou-se que os teores de cor encontrados na vinhaça *in natura* mostraram-se maiores ou iguais a 30000 mg Pt/L. Comparando os níveis de cor da vinhaça aos níveis de cor permitidos para o lançamento de efluentes pela Resolução CONAMA 357/05, até 75 mg Pt/L, pode-se entender que existe uma enorme quantidade de material dissolvido no efluente proveniente das indústrias sucroalcooleiras. Devido à origem orgânica da vinhaça, a maior parte das partículas também são de origem orgânica (CABELLO et al, 2009).

4.3.1.2 Turbidez

A Turbidez, assim como a cor, é causada principalmente pela presença de partículas em suspensão e em estado coloidal no efluente. Seus principais causadores são: areia, argila e micro-organismos em geral (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Para Libânio (2010), a turbidez, sólidos suspensos e contagem de partículas, de forma geral, consistem em um parâmetro único, pois representam significados semelhantes em termos de qualidade da água – porém, a turbidez adquiriu primazia como parâmetro de monitoramento devido à simplicidade e rapidez da sua determinação.

A Resolução CONAMA 357/05 determina como padrão limite para o lançamento de efluente turbidez de até 100 NTU. Ao passo que para a vinhaça, Lima et al.(2012) encontrou valores maiores a 5000 Unidades de Turbidez Formazina (FTU, unidade equivalente a NTU) e, Santiago et al. (2009) obteve valores de turbidez variando entre 2692 FTU e 15116 FTU. Ou seja, em alguns casos a vinhaça pode estar até 150 vezes a cima dos limites permitido por lei em relação ao lançamento de efluentes.

4.3.1.3 Sólidos e Sólidos Voláteis

De acordo com APHA (1998), todas as matérias suspensas ou dissolvidas em água podem ser caracterizadas como Resíduos ou Sólidos. Sendo assim, pelo que Libânio (2010) entende por sólidos, existe uma correlação entre a quantidade de sólidos totais encontradas em uma amostra líquida e a sua turbidez.

Os sólidos totais presentes em uma substância líquida pode ser classificados de duas formas: Sólidos Fixos e Sólidos Voláteis. O termo “Sólidos Fixos” é aplicado ao resto total, em suspensão ou dissolvido após aquecimento e sacagem por períodos e temperaturas preestabelecidas (por exemplo, 100 °C por um período de 12 horas). Em decorrência da ignição parte dos sólidos se volatiliza, a

diferença entre a massa de sólidos e a massa final pode ser denominada “Sólidos Voláteis” (APHA, 1998).

4.3.2 Características Químicas do Efluente

4.3.2.1 pH

O potencial hidrogeniônico (pH) expressa a intensidade de uma condição ácida ou alcalina. Substâncias alcalinas ($\text{pH} > 7,0$) tendem a formar incrustações, enquanto os ácidos, os quais são aqueles que possuem valores baixos de pH ($\text{pH} < 7,0$), tendem a ser corrosivos (CARVALHO, 2008). Desta forma, a alcalinidade pode ser entendida como a capacidade da água em neutralizar ácidos, e a acidez, como a de neutralizar bases (MORAES, 2007).

O pH deve ser um dos parâmetros observados com maior frequência em uma rotina operacional de tratamento, pois sua variação interfere em determinados processos unitários de tratamento (LIBÂNIO, 2010), como por exemplo, a coagulação química. A alta alcalinidade pode exigir a adição de um acidulante para o ajuste do pH, deve-se atentar para a quantidade de acidulante adicionado, pois caso a alcalinidade ou a acidez forem altos, provavelmente haverá problemas de coagulação na solução (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Lima et al. (2012) encontrou em suas análises de vinhaça *in natura* um pH estável de 4,40 em todas as três amostras em que trabalhou. Nas pesquisas de Lima et al. (2012) os resultados foram bem próximos, chegando à valores de 4,34 e 4,40. Previtali (2011) obteve em sua pesquisa o valor médio de 4,15 para o pH. Deste modo, podemos constatar que o pH característico da vinhaça além de ser alcalino não possui grandes variações. A Mostrando-se um fator positivo para a utilização do processo de coagulação.

4.4 EFLUENTE RESIDUAL

A partir do momento em que entrou em vigor a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei 9.433/97, que regula a utilização dos recursos hídricos, as empresas que demandam grande quantidade de água foram obrigadas a encontrar soluções para reduzir seu consumo. Dessa forma, o tratamento por meio do processo de coagulação, floculação e decantação pode ser uma alternativa interessante para a racionalização da água através do reúso, uma vez que dependendo da qualidade do efluente final, este pode voltar ao processo produtivo.

Segundo Camhi (1979, apud, Termo de Referência para o Workshop Tecnológico. 2007)² o lodo oriundo da vinhaça pode ser aplicado em variadas atividades, como: Fonte de nutrientes para alimentação animal; fermentação aeróbia para a produção de proteínas unicelulares; fermentação anaeróbia para a produção de biogás e; nas lavouras para fins de fertilização.

Para fins de transporte, fator extremamente relevante para o uso da vinhaça para fertirrigação, Faria et al.(2011) frisa que o aumento da concentração da vinhaça diminui os custos com o transporte até a lavoura – para aplicação de até 30 °Brix (unidade que representa 1 grama de sólidos dissolvido em 100 gramas de vinhaça) podem ser usados os equipamentos e técnicas similares as da vinhaça *in natura*.

Após o tratamento da vinhaça, ela pode voltar à cadeia produtiva em outras etapas, como por exemplo: lavagem da cana-de-açúcar, lavadores de gases, caldeiras, limpeza, diluição, resfriamento, entre outros. Tal medida diminuiria o impacto ambiental causado pela utilização demasiada de água, conseqüentemente reduzindo o que Christofidis (2003) chama de uso consuntivo da água, ocorrência que caracteriza-se como tipo de uso no qual há perdas entre o que é captado e o que retorna ao manancial.

² CAMHI, J.D. Tratamento do vinhoto subproduto da destilação de álcool. *Brasil Açúcareiro*, Rio de Janeiro: 18-23, 1979.

4.5. PROCESSO DE TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DO EFLUENTE

O processo de tratamento físico-químico de efluentes consiste no processo de remoção de sólidos presentes em efluentes e precipitação dos mesmos por meio da introdução de produtos químicos coagulantes, seguido de uma mistura rápida para dispersá-los e posteriormente uma mistura lenta para a formulação dos flocos sedimentáveis, no caso por meio de um equipamento denominado jar test. Esses produtos podem ser aplicados para a remoção de grande parte das impurezas presentes na água e podem ser classificados de acordo com suas quatro grandes categorias: cal, sais de alumínio, sais de ferro e polímeros (MANCUSO & SANTOS, 2003).

Os fenômenos de coagulação, floculação e decantação juntos são responsáveis por grande parte do processo de tratamento de soluções aquosas, inclusive para água potável. O que prova a eficiência dessa técnica quando aplicada corretamente.

4.5.1 Coagulação e Floculação

O conceito de coagulação surgiu em 1844, com a finalidade de melhorar o aspecto visual da água para o consumo humano. Em meados do século XIX, foi dada uma maior importância a esse processo, pois descobriu-se que a relação entre a concentração de partículas e a presença de patógenos era diretamente proporcional, o que acarretou na diminuição da transmissão de doenças causadas pelo contato com a água contaminada (LIBÂNIO, 2010).

A coagulação consiste no processo de desestabilização das partículas coloidais e suspensas, esse processo é realizado pela junção de ações físicas e químicas. Para o processo de coagulação são necessárias duas etapas: a mistura rápida e a mistura lenta.

O processo de mistura rápida primeira etapa, tem por objetivo dissipar o coagulante de forma que haja o maior aproveitamento possível, nesta etapa é

importante que tenha ocorrido a checagem de parâmetros como o pH, por exemplo, fator que interfere diretamente na formação dos coágulos (LIBÂNIO, 2010).

Durante a etapa de mistura lenta, segunda etapa a qual acontece após a desestabilização das partículas e formação dos coágulos, inicia-se então a floculação, que ocorre na fase de mistura lenta. Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a floculação consiste na agitação relativamente suave, para que ocorram choques entre as partículas e que se aglomerem formando partículas maiores, os flocos.

A floculação se caracteriza por uma operação unitária de clarificação, constituída por um conjunto de atividades físicas, nos quais se objetiva reduzir o número de partículas suspensas e coloidais na presente na massa líquida, buscando a formação de flocos mais robustos que serão extraídos com mais facilidade posteriormente (LIBÂNIO, 2010).

4.5.2 Coagulantes

Com o desenvolvimento da sociedade o homem descobriu que ao adicionar determinados produtos químicos à água, após um período de tempo, ela se tornava mais límpida. Atualmente sabe-se que os parâmetros de cor e turbidez melhoravam devido à precipitação de coágulos, formados a partir da ionização desses produtos após o contato com a água (BORBA, 2001).

Nesse estudo os coagulantes podem ser divididos em duas classes devido as suas características moleculares: os químicos e os naturais.

Os coagulantes naturais, além de serem utilizados como coagulantes também são utilizados como auxiliares de coagulação, são constituídos principalmente a base de polissacarídeos, proteínas e amidos. O mecanismo coagulante dessas espécies deve-se ao tamanho de suas moléculas e suas características eletromagnéticas, os coagulantes naturais são constituídos por grandes cadeias carbônicas dotadas de frações eletropositivas e eletronegativas, desta forma os coagulantes naturais podem ser considerados coagulante catiônico ou aniônico (BORBA, 2001).

Segundo Borba (2001), os mais convencionais são os químicos como por exemplo, o sulfato de alumínio, cloreto férrico, cloreto ferroso, além de outros, devido à grande eletropositividade dos elementos químicos que se opõem. No momento em que são dissolvidos em água, se transformam em compostos gelatinosos de carga positiva.

4.5.2.1 Cloreto Férrico

De acordo com Franco (2009), o cloreto férrico (FeCl_3) é amplamente utilizado no tratamento de efluentes. Essa espécie química possui efeitos corrosivos, por isso devem-se haver certos cuidados em relação a sua estocagem.

A coagulação decorrente do cloreto férrico ocorre por meio de mecanismos de varredura, ou seja, não existe relação estequiométrica entre a área superficial da partícula e a dosagem de coagulante (PACKMAN, 1965 apud LIBÂNIO 2010)³. Além de ser um tratamento bastante eficiente na remoção de sólidos em suspensão e fósforo. Geralmente sua dosagem é calculada juntamente com a dosagem de cal ou hidróxido de sódio, pois estes ajudam na produção dos flocos em decorrência do aumento do pH da água (MANCUSO & SANTOS, 2003).

Para o cloreto férrico, a maior efetividade no processo de remoção acontece quando o pH encontra-se entre as faixas de 4,5 e 5,5, por proporcionar a formação de flocos maiores e mais pesados os polímeros e hidróxidos colaboram auxiliando os processos de coagulação. A quantidade e o tipo do produto coagulante normalmente é encontrada de forma experimental (MANCUSO & SANTOS, 2003).

Quando o produto coagulante é adicionado ao efluente a ser tratado ocorre à hidrólise do cloreto férrico, logo os complexos de ferro adquirem cargas positivas. Os sólidos suspensos na água unem-se aos complexos férricos resultando na coagulação e neutralização dos sedimentos que possuem cargas negativas (FRANCO, 2013).

³ PACKMAN, R. F. some studies of the coagulation of the dispersed clays with the hydrolyzing salts. *Journal of Colloid Science*, v. 20, 1965.

4.5.2.2 Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) trata-se de um coagulante muito conhecido devido a sua grande utilização no tratamento de água potável, essa notoriedade deve-se a facilidade de transporte e baixo custo (CARVALHO, 2008).

Quando o sulfato de alumínio entra em contato com a água logo ocorre sua dissociação formando dois moles de $(\text{Al}_3)^{+3}$ e três moles de $(\text{SO}_4)^{-2}$, no decorrer da hidrólise são formados íons H^+ que tornam a solução mais ácida e promovendo a ineficiência do sistema. Desta maneira, em números de pH, o sulfato de alumínio apresenta melhores índices de remoção com o pH entre 5,5 e 8,5 (ROSALINO, 2011).

Uma característica negativa em relação ao uso deste coagulante é em relação ao lodo proveniente do seu processo de coagulação, floculação e decantação, devido as características do sulfato de alumínio o lodo gerado não é biodegradável, por isso existe uma problemática a respeito de seu tratamento e disposição final (CARVALHO, 2008).

4.5.2.3 tanfloc SG

O agente coagulante Tanfloc SG é um polímero orgânico catiônico de baixo peso molecular, obtido por meio de um processo de lixiviação da casca da acácia negra (*Acácia mearnsii de wild*), constituído basicamente por tanato quaternário de amônio (TANAC, 2013).

Apesar de ser natural, trata-se de um produto polihidroxidofenólico encontrado em vegetais e que pode ser utilizado como coagulante. O tanino além de ser biodegradável possui outra vantagem, ele tem a capacidade de aglutinar uma maior quantidade de materiais suspensos na água em relação aos outros coagulantes. É um composto que tem a característica de transformar complexos solúveis, de forma coagulante e/ou como polieletrólito, quando em contato com

substâncias como cálcio, magnésio, ferro, o que resulta em uma água de maior qualidade (SILVA, 1999).

O Tanfloc SG, por se tratar de um polifenol, pode ser responsável pela precipitação de substâncias como cromo, cádmio, cobre, ferro entre outros metais. Esse fenômeno ocorre devido a união de espécies condensadas a cátions metálicos, formando quelatos, partículas bastante estáveis, de caráter redutor e ácido, propriedade que faz com que o metal seja diluído (MARTINEZ, 1996⁴ & DUTRA, 1996⁵, apud, SILVA 1999).

Para Silva (1999), o tanino mostra-se como uma alternativa interessante para a substituição dos coagulantes químicos, já que se trata de uma substância natural e de grande eficiência no processo de coagulação. Porém, no Brasil, mostra-se caro em relação aos coagulantes químicos devido à falta de investimentos nesse mercado, o que não acontecem em países como Argentina e Paraguai, onde o uso do tanino já foi incorporado há algum tempo.

A Figura 3 mostra a estrutura química do tanato (Tanfloc).

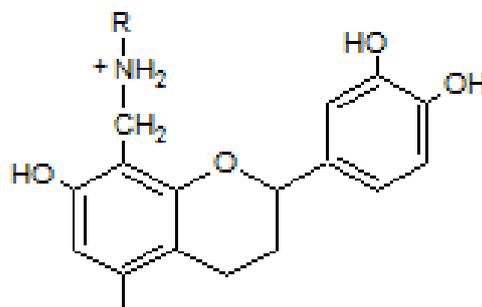


Figura 3: Estrutura química do tanato.

Fonte: DI BERNARDO (2002, apud THEODORO, 2012, P 67).

⁴ MARTINEZ, F. L. "Taninos Vegetais e suas aplicações". Universidade de Havana/Cuba. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Outubro de 1996.

⁵ DUTRA C., Avaliação do potencial de actinomicetos no trabalho de efluentes de indústrias que processam madeira – Tese de Mestrado - UFRJ, Rio de Janeiro -1997.

4.6 DECANTAÇÃO

A decantação, também conhecida como sedimentação, por acontecer naturalmente e se trata de uma técnica bastante simples, utilizada há muitos anos, com a existência de relatos do processo de decantação em 2000 a.C. (LIBÂNIO, 2010). Porém, somente em 1902 foi relatada a utilização dessa técnica associada ao uso de coagulantes em estações de tratamento de água.

A sedimentação, assim como a floculação, consiste em uma operação unitária bastante comum na remoção de partículas sólidas em um sistema de tratamento de água. Esse processo consiste em fazer a separação das partículas utilizando as forças gravitacionais (CARVALHO, 2008). Assim, partículas com densidades inferiores à da água dirigem-se para a parte superior (formação da espuma) e o restante, com o auxílio da força gravitacional, dirigem-se para o fundo (formando o lodo de fundo), como representado na Figura 4.

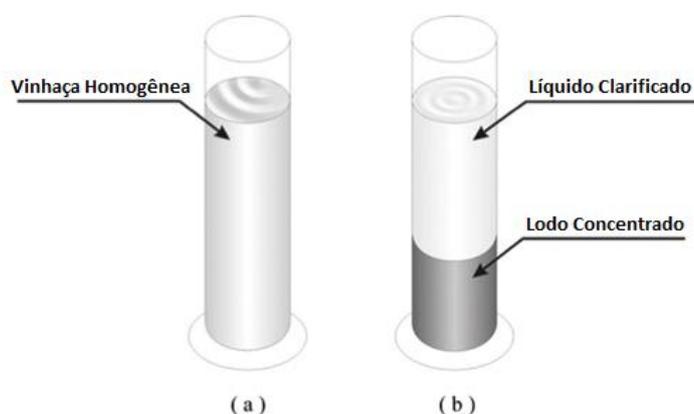


Figura 4: Esquematização do processo de sedimentação: (a) antes da sedimentação (b) após sedimentação
Fonte: Modificado (SANTOS ET. AL, 2005, p 01)

Fisicamente, toda partícula suspensa em um meio líquido em repouso será acelerada pela força da gravidade. Esse processo ocorrerá até que a força de resistência viscosa e deformação do líquido sejam iguais às resultantes do peso específico da partícula (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

5. MATERIAIS E METODOS

Este item tem como objetivo descrever a metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo. Abrangendo, a coleta do efluente, o tratamento físico-químico e análise dos resultados obtidos por meio do processo da coagulação, floculação e decantação utilizando coagulante natural e não-naturais.

Para o processo de tratamento do efluente sucroalcooleiro, optou-se por fazer tratamento de coagulação, floculação e decantação. Pois, a coagulação e floculação seguidas decantação são técnicas baratas e muito confiáveis no tratamento de efluentes. Utilizou-se para o estudo três coagulantes: Tanfloc SG, Cloreto Férrico e Sulfato de Alumínio, sendo que o primeiro se trata de um coagulante natural e os dois últimos coagulantes não-naturais.

5.1 COLETA

A coleta do efluente oriundo de indústria canvieira ocorreu na cidade de Itaí- SP entre os meses de setembro e outubro de 2013, o procedimento foi realizado três vezes. A coleta foi feita em seis galões de água mineral com capacidade de 20 litros como mostra a Figura 5.



Figura 5: Galões onde utilizados para estocagem de vinhaça.
Fonte: Autoria própria, 2013.

Seis galões de água mineral com capacidade de 20 litros (Figura 5) foram utilizados para o transporte e armazenamento da vinhaça até o campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Londrina (UTFPR - Londrina), local onde foram feitos os procedimentos experimentais no Laboratório de Saneamento Ambiental.

Sempre com o auxílio de um técnico de segurança do trabalho e um responsável pelo setor de manejo da vinhaça foram feitas as coletas, como mostra a Figura 6.



Figura 6: Técnico realizando a coleta da vinhaça
Fonte: Autoria própria, 2013.

5.2 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO

Esse tópico tem como objetivo descrever a forma como cada procedimento laboratorial foi efetuado.

5.2.1 AJUSTE DO pH E PREPARO DAS SOLUÇÕES COAGULANTES

Para o ajuste do pH utilizou-se uma solução alcalina de soda caustica a dois molar (NaOH 2M). Com a auxílio de um pHmetro (utilizou-se o pHmetro do modelo MPA-210P, fabricado pela empresa Policontrol), a adição da solução de soda caustica foi feita até que se atingisse o pH entre 6 e 7, nos galões de água onde a vinhaça era armazenada de 20 em 20ml o alcalinizante era adicionado, posteriormente era feita a agitação e a conferência do pH.

No preparo das soluções coagulantes, água destilada foi misturada aos coagulantes respeitando a proporção de 1 L de água destilada para 20 g, tanto para os coagulantes químicos (cloreto férrico e sulfato de alumínio) quanto para o natural Tanfloc SG.

5.2.2 TESTES INICIAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS MELHORES FAIXAS DE REMOÇÃO PARA OS DIFERENTES COAGULANTES

Inicialmente, foram feitos testes para obtenção das concentrações mais adequadas para os diferentes tipos de coagulantes (o químico cloreto férrico, o químico sulfato de alumínio e o natural Tanfloc SG) utilizados no tratamento da vinhaça. Para todos os coagulantes estes testes foram feitos com ajuste do pH do efluente.

O procedimento foi elaborado com o intuito de verificar a ordem de magnitude da concentração na qual cada coagulante obtém visualmente o melhor resultado. Desta maneira, foram testadas concentrações de diversas ordens de magnitude para cada coagulante, observando a capacidade de remoção dos parâmetros cor e turbidez.

A metodologia adotada para o tratamento dos efluentes de usina canavieira foi baseada no estudo de coagulação, floculação e decantação de Di Bernardo e Pádua (2000). Os ensaios foram realizados em equipamento de jar test da marca Nova Ética de seis provas com regulador de rotação das hastes misturadoras.

5.2.2.1 Jar Test

O procedimento foi elaborado em bateladas, seis amostras homogêneas de vinhaça eram introduzidas no jar test, em seguida, com o equipamento já ligado as soluções coagulantes eram adicionadas de uma só vez em quantidades diferentes nos jarros. A Figura 7 mostra as soluções coagulantes já preparadas e prontas para serem adicionadas no equipamento jar test, que já estava com seus seis jarros abastecidos de vinhaça homogeneizada e pronto para o procedimento de coagulação floculação e decantação.

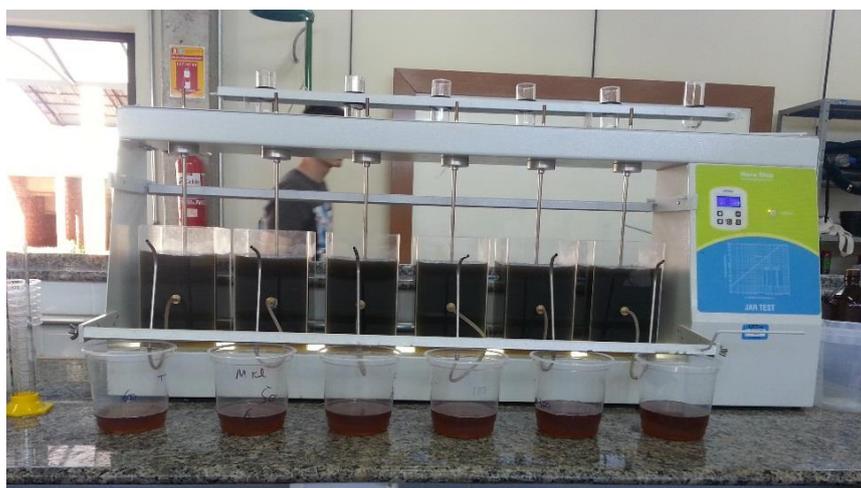


Figura 7: Jar test e soluções coagulantes.
Fonte: A autoria própria, 2013.

Para que ocorra o processo de coagulação/floculação são necessários dois estágios: o Tempo de Mistura Rápida (TMR) e o Tempo de Mistura Lenta (TML). O primeiro, TMR, tem a finalidade de dispersar completamente o coagulante e promover a coagulação, ocorre imediatamente após o contato do efluente com a solução coagulante e consiste em um período curto de tempo com de agitação intensa (a intensidade da agitação é medida por meio do gradiente de Rotação de Mistura Rápida, RMR). Ao final do TMR, 1 minuto com RMR = 400 rpm iniciou-se o TML, que tem por objetivo aumentar o tamanho dos flocos formados na primeira etapa com o intuito de favorecer a decantação. O TML foi dividido em duas etapas que contaram com gradientes de Rotação de Mistura Lenta (RML) e tempos

distintos: a primeira etapa do TML teve duração de 8 minutos com gradiente de RML = 80 rpm e a segunda duração de 10 minutos com gradiente de RML = 30 rpm.

Ao final do TML a amostra foi deixada em repouso para que ocorresse a sedimentação, o Tempo de Sedimentação (TS) utilizado foi de 30 minutos.

5.2.3 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DOS DADOS QUANTITATIVOS DE REMOÇÃO

Para a remoção das impurezas presentes no efluente a concentração dos coagulantes iniciou-se em 1800 mg/L e foi elevada gradativamente em 200 mg/L até que se chegasse à concentração máxima de 2800 mg/L de coagulante. Esses valores foram obtidos através dos testes iniciais para determinação das melhores faixas de remoção para os diferentes coagulantes, etapa descrita no item 5.2.2.

Determinada as faixas de concentração, todos os coagulantes foram testados, independentemente de seu resultado de eficiência nos testes iniciais. Optou-se por refazer os ensaios com o coagulante que obteve os melhores resultados em relação a remoção de cor e turbidez, porém, desta vez, sem o ajuste do pH para verificar se existia realmente a necessidade do controle do pH.

Os ensaios para obtenção dos dados quantitativos de remoção foram feitos de forma similar a descrita no item 5.2.2.1, porém utilizando-se da coleta de dados, diferentemente da etapa preliminar em que as informações eram obtidas apenas visualmente.

5.2.2.2 Coleta de Dados

A aquisição dos dados foi feita em dois momentos, uma antes do tratamento com o jar teste e outra logo após o fim do TML, esta iniciou-se no tempo 0 (zero minuto) e teve intervalos de 10 minutos, o procedimento foi efetuado até o final do tempo estipulado para a sedimentação (TS = 30 minutos). A coleta do efluente foi feita por meio de mangueiras como a que se encontra na Figura 8.



Figura 8: Jarro do jar test com mangueira de coleta de dados
Fonte: Autoria própria, 2013.

Entre o período das coletas foram medidos os valores de pH, cor e turbidez para as seis amostras. A cor foi obtida com o auxílio do espectrofotômetro HACH 4000; a turbidez através do turbidímetro portátil modelo AP 2000 da empresa Tecnopon; para obter o pH utilizou-se o pHmetro do modelo MPA-210P, fabricado pela empresa Policontrol.

Após a tabulação dos dados, 15 ml de todas as amostras foram pipetadas em cadinhos de massa conhecida e levadas a Estufa de Secagem e Esterilização SL 100 da marca SOLAB, lá as amostras permaneceram por 24 horas a uma temperatura de aproximadamente 100 °C. Ao serem retiradas da estufa foi feita nova medição da massa dos cadinhos com as amostras para a obtenção dos dados de Sólidos Totais. O procedimento de coleta de dados terminou com a obtenção dos dados de Sólidos Voláteis, as amostras utilizadas no processo anterior foram inseridas na Mufla Modelo MA 385/2 da marca Maconi e lá foram deixadas por um período de duas hora a temperatura de 550 °C.

Após o resfriamento das amostras novamente foi aferida a massa dos cadinhos com as amostras. Todos os procedimentos de pesagem foram feitos por meio da balança de precisão AW 220 da marca Shimadzu. A metodologia para realizar os ensaios de sólidos e Sólidos Voláteis encontra-se no anexo A.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 TESTES INICIAIS PARA DETERMINAÇÃO DAS MELHORES FAIXAS DE REMOÇÃO PARA OS DIFERENTES COAGULANTES

Os teste iniciais tiveram o intuito de verificar as melhores faixas de concentração para o desenvolvimento dos testes posteriores. A partir da obtenção dessas grandezas, foi possível determinar a abrangência de concentrações que seriam estudadas.

Dentre todas as concentrações utilizadas nos testes iniciais observou-se que a melhor faixa para aplicação dos coagulantes estava entre 1800 mg/L e 2800 mg/L. A partir então todos os coagulantes foram utilizados entre esta faixa nos ensaio para obtenção dos dados quantitativos de remoção, inclusive aqueles que não foram eficientes na promoção da alteração de cor e remoção da turbidez, caso do cloreto férrico e sulfato de alumínio.

Uma característica interessante notada nos teste iniciais foi a capacidade de mudança de tonalidade da vinhaça ao passo em que se altera seu pH, a Figura 9 ilustra a mudança de coloração.



Figura 9: Vinhaça com pH 7,30 (esq.) e vinhaça com pH 3,45 (dir.)
Fonte: Autoria própria, 2013.

Conforme foi sendo efetuada a mudança do pH pode ser observada a mudança de tonalidade da vinhaça. A Figura 9 mostra a esquerda a vinhaça com o pH 7,30 e a direita a vinhaça *in natura*, pH igual a 3,45.

6.2 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DOS DADOS QUANTITATIVOS DE REMOÇÃO

6.2.1 COAGULANTES INORGÂNICOS

Contrariando o que se esperava, em todos os ensaios e testes iniciais não foram constatados sinais de coagulação significativa para os coagulantes inorgânicos cloreto férrico e sulfato de alumínio, o que fez os dados quantitativos, referente aos ensaios, deixassem de ser coletados.

Diferentemente, Rodrigues (2011) promoveu a coleta de dados e obteve eficiência de remoção de 94% para o cloreto férrico e 91% para o sulfato de alumínio, tais valores só foram possíveis devido aos elevados tempos de sedimentação utilizados pelo autor (TS = 120 min).

6.2.1.1 Cloreto Férrico

Rodrigues (2012), constatou em seu trabalho que os maiores índices de remoção aconteciam com o TS = 120 min, quatro vezes mais tempo que o utilizado no desenvolvimento do presente trabalho e com a concentração de 0 mg/L ou seja, sem a presença do cloreto férrico. Tal estudo comprova a ineficiência do cloreto férrico para o tratamento da vinhaça e que a remoção de 94% foi decorrente do longo TS.

6.2.1.2 Sulfato de alumínio

Rodrigues (2012), assim como para o cloreto férrico encontrou maior eficiência para o TS = 120 min, porém com a concentração de 2000 mg/L. Mais uma vez pode-se alegar que o grande responsável pela alta eficiência do

processo (91%) foi o elevado tempo de detenção, uma vez que obteve eficiência de remoção de 94% para a vinhaça sem a utilização de coagulantes.

Assim como aconteceu com o cloreto férrico, tal estudo também comprova a ineficiência de remoção para o sulfato de alumínio.

6.2.2 COAGULANTE NATURAL

O coagulante natural utilizado foi o que apresentou os resultados mais satisfatórios no estudo de coagulação floculação e decantação, tanto com ajuste de pH quanto sem o ajuste do pH do efluente.

6.2.2.1 *Tanfloc SG*

Os ensaios para obtenção dos dados quantitativos de remoção do Tanfloc SG foram realizados duas etapas: uma com o pH modificado (7,30) e outra com o pH natural (3,45). A partir do primeiro ensaio surgiu o interesse de elaborar um novo ensaio com as mesmas concentrações de coagulantes e sem o ajuste do pH, com o objetivo de avaliar a necessidade do ajuste de pH. Estes foram os testes que obtiveram maior efetividade na remoção dos parâmetros avaliados, por isso foram coletados e avaliados quantitativamente.

O presente tópico tem o intuito de comparar os dados obtidos com para a vinhaça com ajuste de pH tratada com Tanfloc SG e para a vinhaça sem ajuste de pH tratada com Tanfloc SG.

6.2.2.1.1 Comportamento do pH em ambos ensaios

As Figura 10 e Figura 11 demonstram o comportamento do pH durante o processo de sedimentação nos ensaios com o ajuste do pH e sem o ajuste do pH, respectivamente.

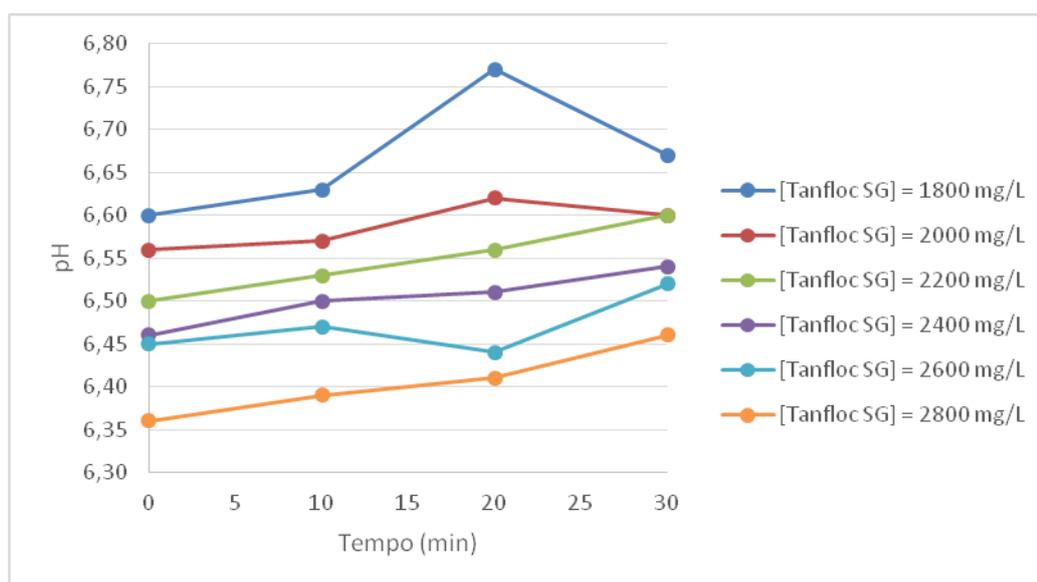


Figura 10: Variação do pH em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Antes do contato com a solução coagulante a vinhaça com o pH corrigido apresentou pH igual 7,30. Na Figura 10 observou-se que quanto menor a quantidade de Tanfloc SG mais ácida se tornava a amostra e que com o passar do tempo as amostras se tornavam cada vez mais alcalinas. Possivelmente esta inicial queda de pH no instante 0 minutos possa estar associada ao pH da água destilada utilizada para o preparo das soluções coagulante e que o aumento da alcalinidade durante o TS seja fruto do início da remoção dos sólidos dissolvidos, que tornavam o efluente mais ácido.

De acordo com a Resolução CONAMA 357, que estabelece níveis para o lançamento de efluentes com o pH entre 6 e 9, a vinhaça estaria apta a ser descartado em qualquer tipo de manancial.

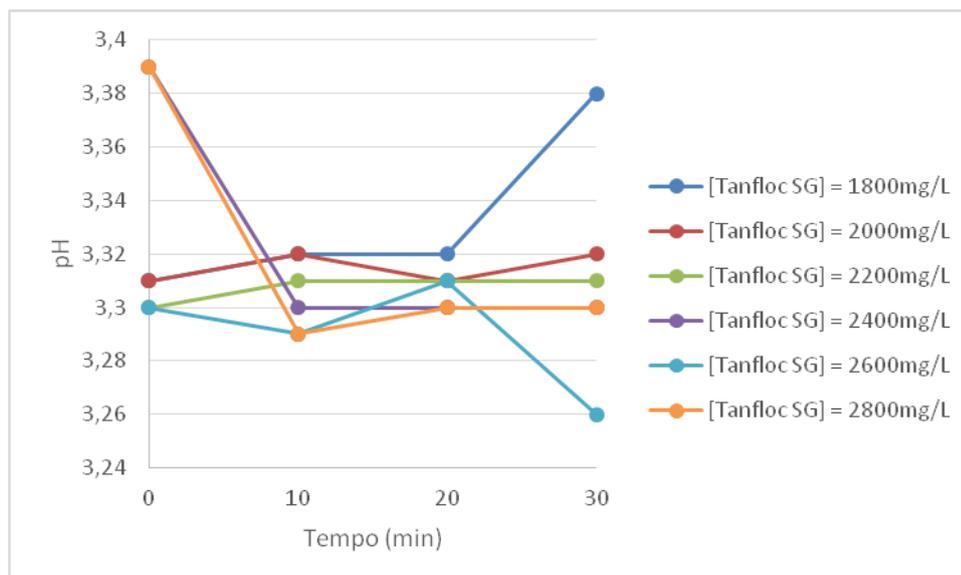


Figura 11: Variação do pH em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Os dados de pH obtidos para a vinhaça sem o controle de pH (Figura 11) mostraram uma variação visualmente irrelevante. Muito provavelmente as variações apontadas podem ser fruto da margem de erro do pHmetro, não chegando a ultrapassar 0,1 para mais ou para menos.

Ao comparar os dados obtidos com a Resolução CONAMA 357, observa-se que o efluente *in natura*, ou seja, sem o ajuste de pH, mesmo após o estudo de coagulação, floculação e decantação, não se enquadra dentro das normas de padrão de lançamento em relação ao pH. Neste caso, pH da vinhaça deveria ser regulado para que ela se enquadre nos parâmetros de lançamento exigidos por lei para o parâmetro pH.

6.2.2.1.2 Comportamento da remoção de cor em ambos ensaios

O presente tópico tem o objetivo de observar o comportamento do Tanfloc SG para a remoção da cor. As Tabelas 1 e Tabela 2 expõem os dados percentuais de remoção da cor juntamente com o dado de leitura momentâneo da cor.

A Tabela 1 expõem os dados de remoção do parâmetro de cor para a vinhaça com o ajuste de pH, o qual foi elevado a 7,30.

Tabela 1: Análise de Remoção da Cor para Vinhaça com Ajuste de pH

Te ¹	Ts ²	Concentrações do Coagulante											
		1800 mg/L		2000 mg/L		2200 mg/L		2400 mg/L		2600 mg/L		2800 mg/L	
		mgPt /L ³	(%) ⁴	mgPt /L	(%)								
0	-	7590	-	7590	-	7590	-	7590	-	7590	-	7590	-
19	0	3407	55 %	3288	57 %	3126	59 %	2849	62 %	2706	64 %	4711	38 %
29	10	3245	57 %	3119	59 %	2855	62 %	2648	65 %	2424	68 %	2283	70 %
39	20	3209	58 %	3044	60 %	2767	64 %	2571	66 %	2364	69 %	2057	73 %
49	30	3173	58 %	3038	60 %	2785	63 %	2573	66 %	2384	69 %	2017	73 %

Fonte: Autoria Própria, 2014.

Notas: ¹ Tempo total de Ensaio em minutos;

² Tempo de Sedimentação em minutos;

³ Valor Instantâneo de Cor em mgPt/L;

⁴ Percentual de Remoção de Cor em Relação ao Valor Inicial para Te = 0.

A Tabela 2 expõem os dados de remoção do parâmetro cor para a vinhaça *in natura*. No instante do teste o pH da vinhaça encontrava-se igual a 3,45.

Tabela 2: Análise de Remoção da Turbidez para Vinhaça Sem Ajuste de pH

Te ¹	Ts ²	Concentrações do Coagulante											
		1800 mg/L		2000 mg/L		2200 mg/L		2400 mg/L		2600 mg/L		2800 mg/L	
		mgPt /L ³	(%) ⁴	mgPt /L	(%)								
0	-	4168	-	4168	-	4168	-	4168	-	4168	-	4168	-
19	0	1073	74 %	664	84 %	667	84 %	610	85 %	544	87 %	516	88 %
29	10	798	81 %	656	84 %	583	86 %	548	87 %	504	88 %	417	90 %
39	20	783	81 %	645	85 %	565	86 %	546	87 %	513	88 %	479	89 %
49	30	783	81 %	649	84 %	600	86 %	558	87 %	527	87 %	500	88 %

Fonte: Autoria Própria, 2014.

Notas: ¹ Tempo total de Ensaio em minutos;

² Tempo de Sedimentação em minutos;

³ Valor Instantâneo de Cor em mgPt/L;

⁴ Percentual de Remoção de Cor em Relação ao Valor Inicial para Te = 0.

Para uma melhor observação e análise dos dados expostos na Tabela 1 e Tabela 2 foram plotados gráficos. Os resultados das plotagens estão inseridos nas Figura 12, Figura 13, Figura 14 e Figura 15, com o intuito de facilitar e melhorar a apresentação dos dados, os gráficos foram construídos expondo somente a remoção durante o TS.

As Figura 12 e Figura 13, representam os percentuais de remoção do parâmetro cor em relação ao TS para a vinhaça com ajuste de pH e sem o ajuste de pH, respectivamente.

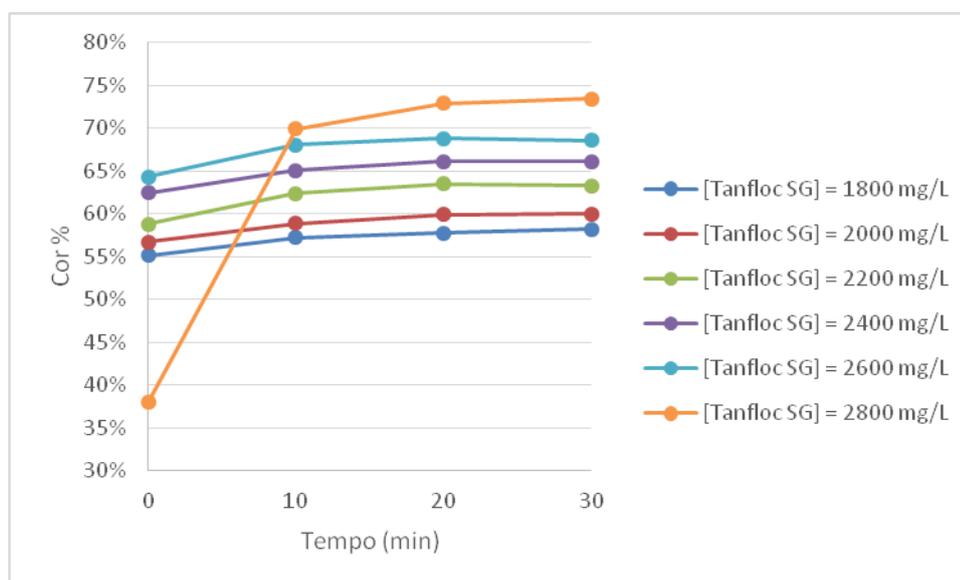


Figura 12: Variação do percentual de remoção da cor em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH

Fonte: Autoria própria, 2014.

Observou-se na Figura 12, que o melhor resultado para remoção de cor em vinhaça com ajuste de pH aconteceu com a concentração de Tanfloc SG em 2800 mg/L, com uma remoção máxima de quase 75% para o TS = 30 minutos.

Em relação ao tempo 0 minutos (Figura 12) a concentração de 2800 mg/L mostrou-se defasada em relação ao percentual de remoção as outras concentrações, porém ao final do intervalo de 10 minutos a taxa de remoção da concentração de 2800 mg/L já havia superado a remoção efetuada pelas outras concentrações e passou a seguir a tendências das outras concentrações, que aumentaram paralelamente em relação ao tempo. Sendo assim, esse fator pode ser considerado uma peculiaridade.

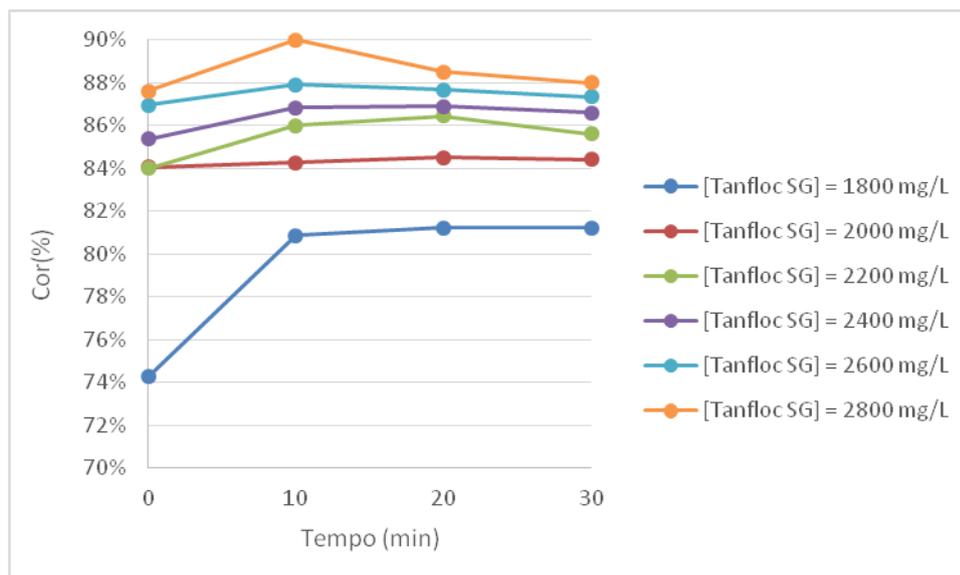


Figura 13: Variação do percentual de remoção da cor em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Assim como na Figura 13, pode se observar que para a vinhaça *in natura* o percentual de remoção de cor seguiu uma certa tendência, que só não foi obedecida pela concentração de 1800 mg/L.

Dando continuidade as linhas de tendência, nota-se que a partir do vigésimo minuto de TS inicia-se uma diminuição do percentual de remoção por parte das quatro principais concentrações (2800 mg/L, 2600 mg/L 2400 mg/L e 2200 mg/L). Desta forma, pode-se considerar que para a vinhaça *in natura* o TS foi superestimado, o que acabou provocando a diminuição dos índices de remoção.

Observou-se na Figura 13, que o melhor índice de remoção foi para a solução coagulante com concentração igual a 2800 mg/L com TS igual a 10 minutos. Neste momento ocorreu o melhor índice de remoção, a partir de então se iniciou a diminuição do percentual de remoção de cor.

Estudos feitos por Girardi (2009) com Tanfloc SG apontaram índices de remoção de 93% de cor, valor compatível aos resultados encontrados para o tratamento da vinhaça *in natura*.

A seguir estão representadas as Figura 14 e Figura 15, que demonstram o comportamento o parâmetro de cor residual momentânea da vinhaça.

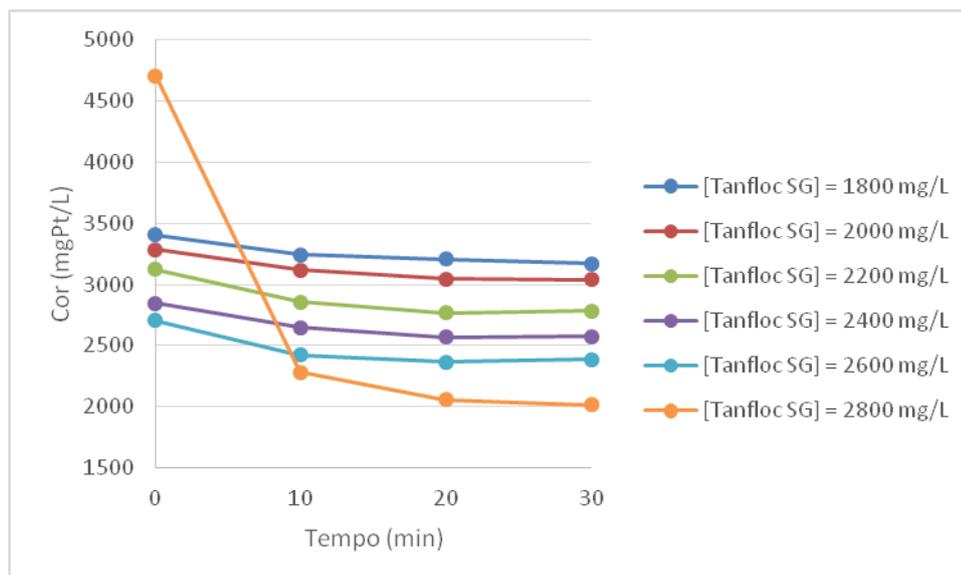


Figura 14: Variação da remoção da cor em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH.
Fonte: Autoria própria, 2014.

Como já observado na Figura 12, a Figura 14 também mostrou que os melhores índices de remoção ocorreram com o Tanfloc SG em concentração de 2800 mg/L, remoção de mais de 2500 mgPt/L, sendo que aproximadamente 75% desta remoção aconteceu nos primeiros 10 minutos.

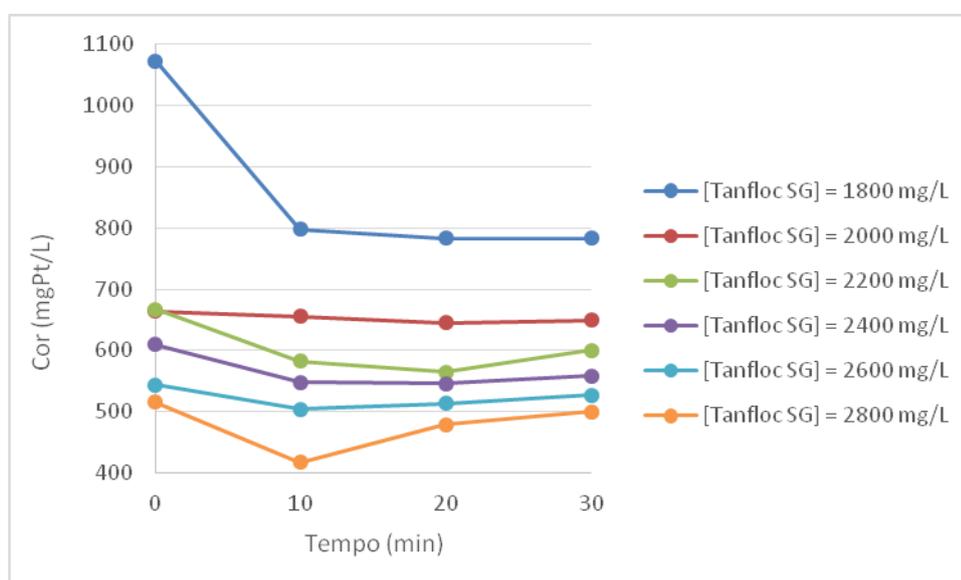


Figura 15: Variação da remoção da cor em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH.
Fonte: Autoria própria, 2014.

Comparando os valores de cor encontrados nas Figura 14 e Figura 15, notou-se que há uma divergência bastante grande entre a vinhaça *in natura* em

relação a vinhaça com ajuste de pH para os padrões de cor inicial obtidos no estudo. Muito provavelmente o ajuste do pH deve causar uma elevação dos níveis de cor e dificultar a sua remoção. Na Figura 9: Vinhaça com pH 7,30 (esq.) e vinhaça com pH 3,45 (dir.) é possível observar a diferença de tonalidade entre a vinhaça *in natura* e a vinhaça com ajuste de pH.

Os padrões de lançamento de cor da vinhaça foram avaliados de forma diferente a Resolução CONAMA 357. No estudo avaliou-se a cor aparente, ao passo que a Resolução CONAMA 357 avalia a cor verdadeira para o controle da emissão de efluentes em corpos hídricos. Considerando que, obrigatoriamente, a cor verdadeira é inferior a cor aparente devido a metodologia de obtenção destes parâmetros, sendo assim é possível fazer uma comparação entre estes parâmetros. Assim como neste estudo, o Termo de Referência Para o Workshop Tecnológico (2007) também encontrou valores de cor aparente muito superiores aos 100 mgPt/L estipulado pela Resolução CONAMA 357. Porém, para uma melhor avaliação os parâmetros de cor verdadeira também deveriam ser mensurados.

6.2.2.1.3 Comportamento da remoção da turbidez em ambos ensaios

Este tópico tem o objetivo de observar o comportamento do coagulante Tanfloc SG para a remoção do parâmetro turbidez. A Tabela 3 e Tabela 4 expõem os dados percentuais de remoção da turbidez juntamente com o dado de leitura momentâneo da turbidez.

A Tabela 3 expõem os dados de remoção do parâmetro turbidez para a vinhaça com o ajuste de pH.

Tabela 3: Análise de Remoção da Turbidez para Vinhaça com Ajuste de pH

Te ¹	Ts ²	Concentrações dos Coagulantes											
		1800 mg/L		2000 mg/L		2200 mg/L		2400 mg/L		2600 mg/L		2800 mg/L	
		NTU ³	(%) ⁴	NTU	(%)								
0	-	1540	-	1540	-	1540	-	1540	-	1540	-	1540	-
19	0	917	40%	918	40%	786	49%	877	43%	716	54%	811	47%
29	10	813	47%	791	49%	711	54%	616	60%	586	62%	533	65%
39	20	813	47%	791	49%	711	54%	616	60%	579	62%	479	69%
49	30	816	47%	769	50%	662	57%	633	59%	571	63%	478	69%

Fonte: Autoria Própria, 2014.

Notas: ¹ Tempo total de Ensaio em minutos;

² Tempo de Sedimentação em minutos;

³ Valor Instantâneo de Turbidez em NTU;

⁴ Percentual de Remoção de Turbidez em Relação ao Valor Inicial para Te = 0.

A Tabela 4 expõem os dados de remoção do parâmetro turbidez para a vinhaça *in natura*, no momento em que foram feitos os testes o pH da vinhaça encontrava-se igual a 3,45.

Tabela 4: Análise de Remoção da Turbidez para Vinhaça Sem Ajuste de pH

Te ¹	Ts ²	Concentrações do Coagulante											
		1800 mg/L		2000 mg/L		2200 mg/L		2400 mg/L		2600 mg/L		2800 mg/L	
		NTU ³	(%) ⁴	NTU	(%)								
0	-	1720	-	1720	-	1720	-	1720	-	1720	-	1720	-
19	0	340	80%	105	94%	77	96%	84	95%	61	96%	53	97%
29	10	109	94%	80,7	95%	65,8	96%	58,4	97%	49,5	97%	43,3	97%
39	20	102	94%	73,2	96%	61,7	96%	53,2	97%	44,8	97%	40	98%
49	30	101	94%	69,4	96%	63,2	96%	52,2	97%	48	97%	40,2	98%

Fonte: Autoria Própria, 2014.

Notas: ¹ Tempo total de Ensaio em minutos;

² Tempo de Sedimentação em minutos;

³ Valor Instantâneo de Turbidez em NTU;

⁴ Percentual de Remoção de Turbidez em Relação ao Valor Inicial para Te = 0.

Assim como no tópico anterior, que tratava da remoção do parâmetro cor, para uma melhor observação e análise dos dados expostos nas Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19 foram elaboradas as Tabelas acima (Tabela 3 e Tabela 4). Para melhor observação dos parâmetros expostos nos gráficos, suas construções foram feitas expondo somente os dados de remoção durante o TS.

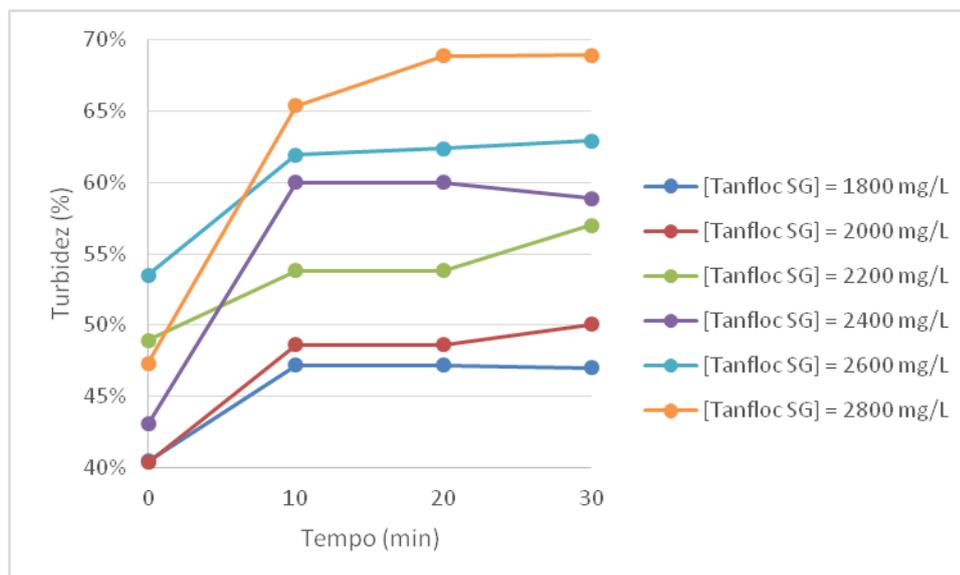


Figura 16: Variação do percentual de remoção da turbidez em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Assim como ocorrido com a cor e seguindo a tendência esperada, a concentração na qual ocorreu os melhores índices de remoção foi a concentração de 2800 mg/L, alcançando 70% de remoção (Figura 16). O resultado já era esperado devido as características do tratamento físico-químico de coagulação, floculação e decantação. Normalmente nesses processos os teores de remoção de cor e turbidez tendem a se comportar de maneiras similares, pois possuem resistências equivalentes à ação do coagulante em relação aos seus índices de remoção – fator que pôde ser observado nos trabalhos de Theodoro (2012), Franco (2009), Girardi (2009), Borba (2001), entre outros.

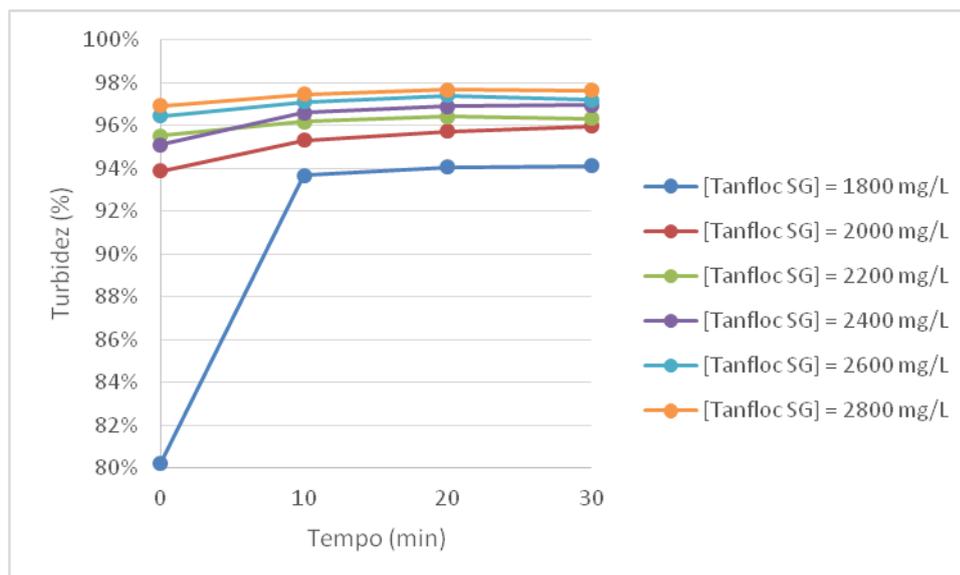


Figura 17: Variação do percentual de remoção da turbidez em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

A Figura 17 esboça a eficiência de remoção da turbidez em percentual de remoção em função do tempo. Através destes dados, mais uma vez pode-se observar que TS foi superestimado, após o décimo minuto de sedimentação houve pouca variação nos resultados.

Outra característica que fica evidenciada ao avaliar a vinhaça com ajuste de pH e a vinhaça *in natura* é a diferença no percentual de remoção de turbidez, a vinhaça *in natura* mostra números muito mais efetivos, apresentando remoção mínima de 94% ao passo que a remoção máxima de vinhaça com ajuste de pH não chegou a 70%.

As Figura 18 e Figura 19 representam os valores de remoção de turbidez encontrados para a vinhaça nos dois ensaios: com ajuste de pH e sem o ajuste de pH para compará-los a Resolução CONAMA 357.

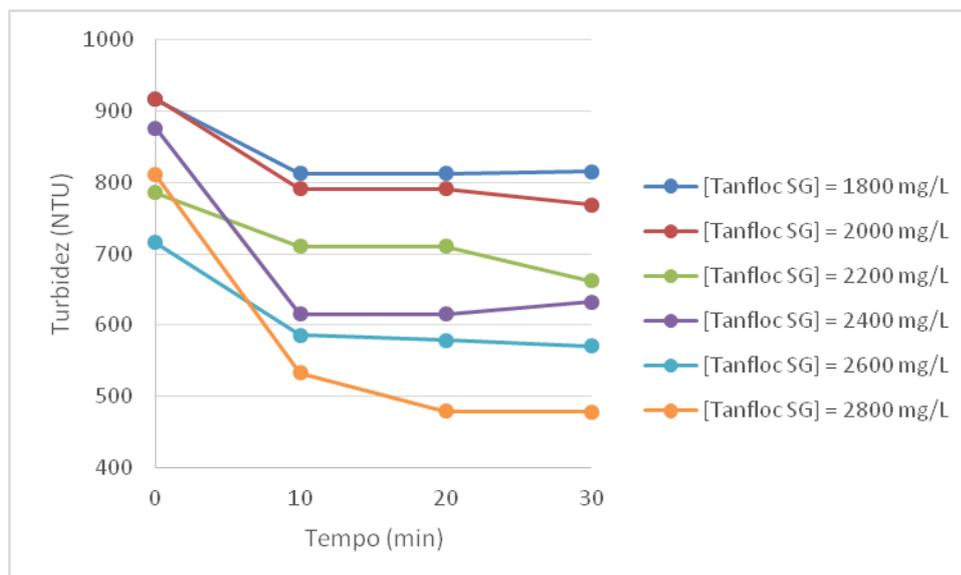


Figura 18: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Assim como demonstrado anteriormente pela Figura 14, a concentração que obteve os melhores resultados de remoção da turbidez foi a de 2800 mg/L, porém ficou muito aquém do exigido para o lançamento da vinhaça em corpos hídricos, a Resolução CONAMA 357 exige níveis de turbidez de no máximo 100 NTU para o lançamento como mostrado na Figura 18.

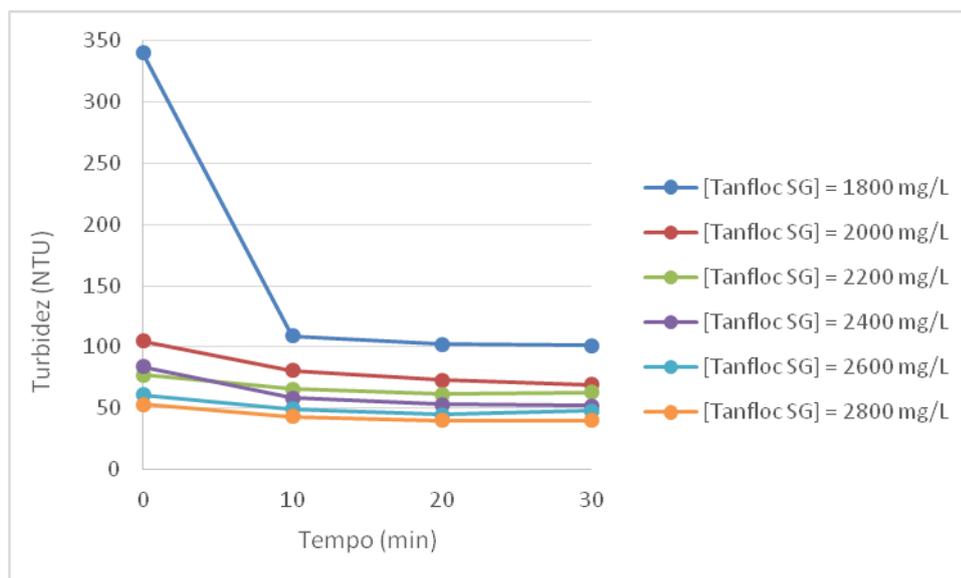


Figura 19: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

No ensaio sem o ajuste de pH os resultados foram bastante satisfatórios em relação a Resolução CONAMA 357 (Figura 19). Com exceção da concentração de 1800 mg/L que ficou muito próxima de atingir a meta estipulada, todas as outras concentrações atingiram níveis de turbidez que permitiriam o lançamento da vinhaça em corpos hídricos de Classe 3 e Classe 2 logo nos 10 primeiros minutos do TS. No tempo de 20 minutos utilizando a concentração de 2800 mg/L, a vinhaça chegou a alcançar turbidez de 40 NTU, tornando-se apta para o lançamento em corpos hídricos Classe 1.

6.2.2.1.4 Comportamento da remoção percentual dos sólidos em ambos ensaios

A Figura 20 e Figura 21 representam a percentagem de sólidos removidos em relação ao TS. Devido a um erro amostral na obtenção dos dados de sólidos, pode-se notar na Figura 20 a falta de alguns pontos no gráfico que foram ocultados, pois figuraram fora da realidade do estudo.

Consequentemente, como o procedimento posterior necessita destes dados (Sólidos Voláteis), também foram ignorados.

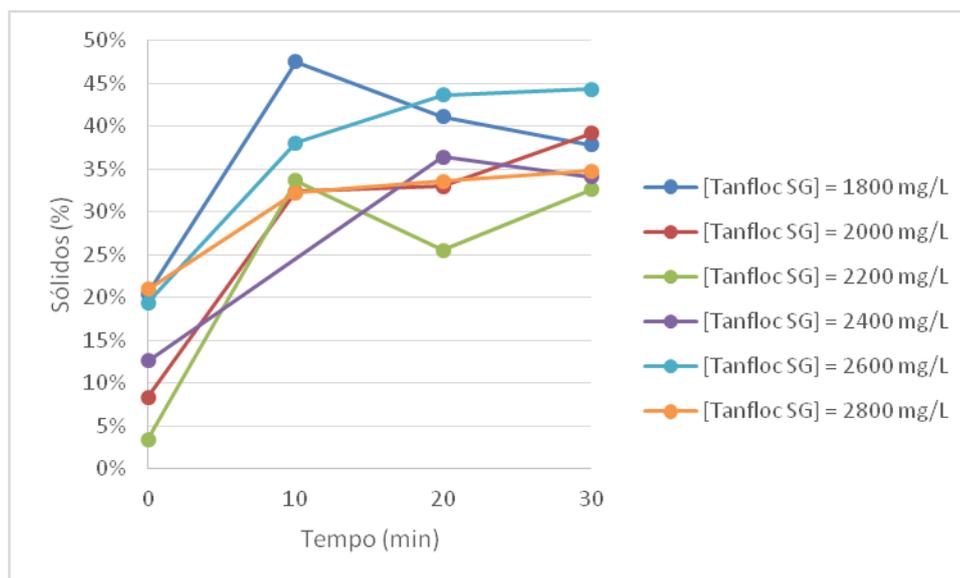


Figura 20: Variação do percentual de remoção de sólidos em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Neste caso, a concentração que obteve os melhores índices de remoção de sólidos nos primeiros 10 minutos foi a de menor concentração (1800 mg/L). Este fator deve-se propriamente a introdução dos coagulantes, a partir do momento em que eles são introduzidos a vinhaça recebe uma carga a mais de sólidos, constituída pelos próprios coagulantes. Por isso, com o decorrer do tempo e a formação/decantação dos flocos os índices de remoção aumentam para as maiores concentrações e diminuem para as menores concentrações.

Com o passar do tempo, nota-se que a remoção dos sólidos pela concentração de 1800 mg/L baixa, fator que ocorrer de maneira inversa para a concentração de 2800 mg/L. Com o decorrer do TS as maiores concentrações de coagulante fazem com que as partículas suspensas decantem com maior facilidade em relação as menores concentrações de coagulante.

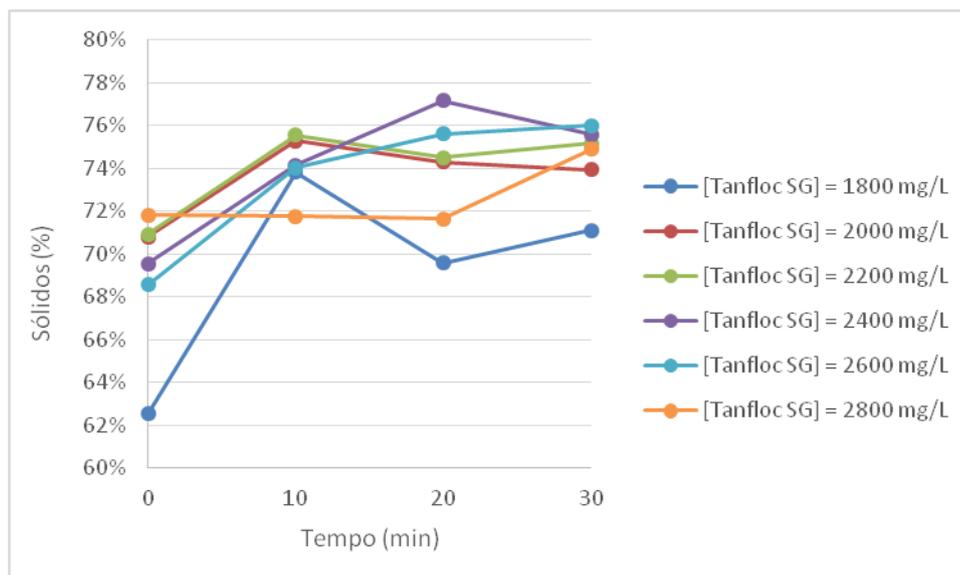


Figura 21: Variação do percentual de remoção do sólidos em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Nota-se que no instante inicial do TS, com exceção da concentração de 1800 mg/L, os índices de remoções variaram muito pouco, apenas em 4%. A seguir (tempo de 10 minutos) há uma elevação dos índices de remoção dos sólidos por parte da maioria das concentrações.

O melhor resultado foi obtido pela concentração de 2400 mg/L com tempo de vinte minutos de sedimentação e o pior resultado foi obtido pela concentração de 1800 mg/L com TS = 30 minutos.

6.2.2.1.5 Comportamento da remoção dos sólidos voláteis em ambos ensaios

Abaixo, representadas pelas Figura 22 e Figura 23 estão ilustradas as quantidades de sólidos voláteis removidos em função do TS para a vinhaça com o ajuste de pH e para a vinhaça *in natura*.

Assim como ocorreu na Figura 20, referente à remoção de sólidos, devido à metodologia utilizada para obtenção dos resultados de sólidos voláteis, também não foram compilados todos estes dados devido ao incidente exposto no item anterior. Dados considerados errôneos e não condizentes com a realidade foram excluídos.

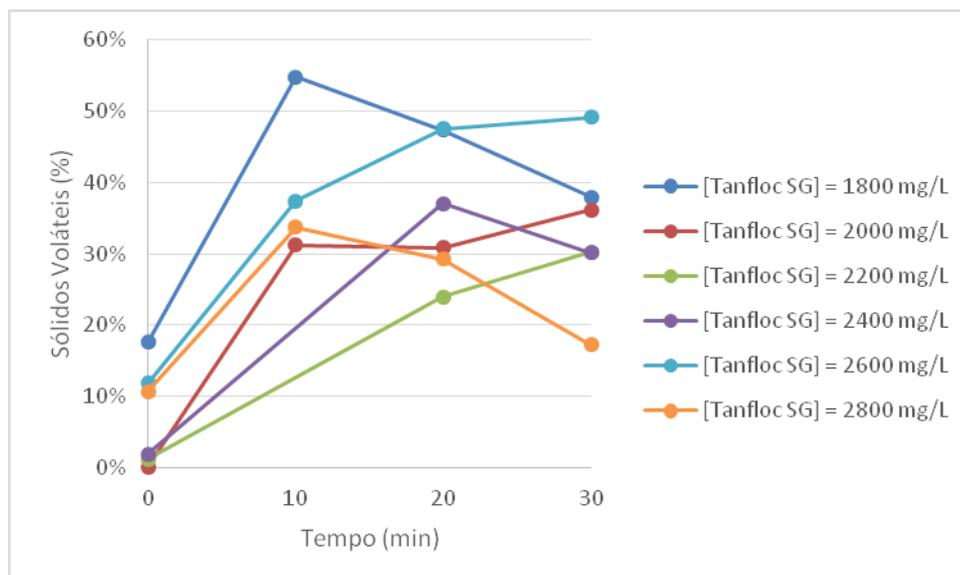


Figura 22: Variação da remoção percentual de sólidos voláteis em função do tempo para vinhaça com ajuste de pH.

Fonte: Autoria própria, 2014.

A Figura 22 demonstra a variação percentual da remoção de sólidos voláteis em função do tempo para a vinhaça com ajuste de pH. Como era plausível de se imaginar o gráfico plotado na Figura 22 seguiu os mesmos padrões em relação ao esboçado na Figura 20. Este comportamento deve-se principalmente a homogeneidade do tipo de material sedimentado e a facilidade com que os sólidos presentes na vinhaça se volatilizam devido as suas características majoritariamente orgânicas.

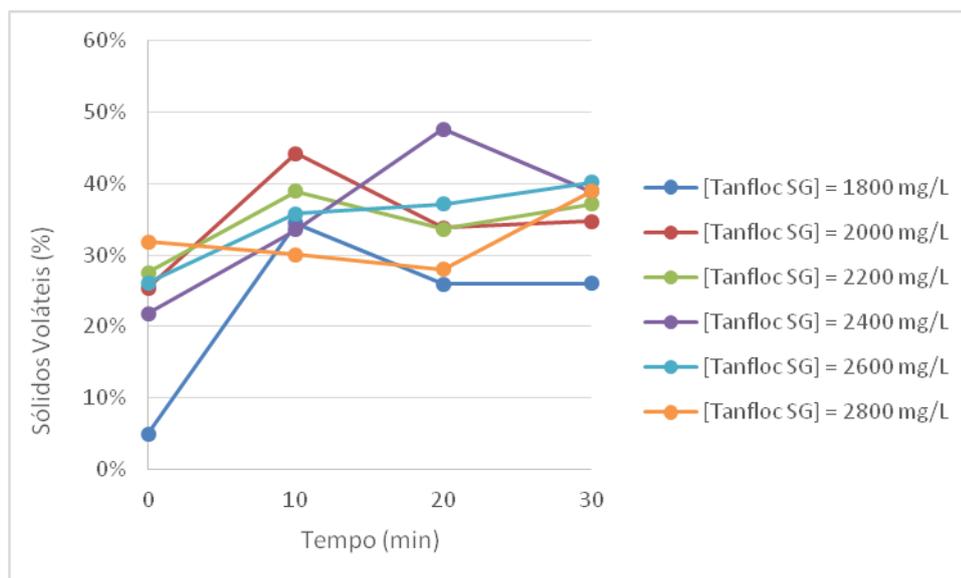


Figura 23: Variação da remoção percentual de sólidos voláteis em função do tempo para vinhaça sem ajuste de pH.
Fonte: Autoria própria, 2014.

O comportamento da variação do percentual de remoção de sólidos voláteis, assim como no gráfico discutido anteriormente (Figura 22), comportou-se de forma similar ao da Figura 21. Da mesma maneira como justificado anteriormente, esta similaridade entre os dados plotados nas figuras de sólidos e sólidos voláteis deve-se ao tipo de material sedimentado, a facilidade com que os sólidos presentes na vinhaça se volatilizam e a homogeneidade das amostras.

7 CONCLUSÃO

A partir da realização deste trabalho verificou-se a ineficiência do tratamento físico-químico da vinhaça por meio dos processos de coagulação, floculação e sedimentação utilizando os coagulantes inorgânicos: cloreto férrico e sulfato de alumínio – não houve a coagulação. Por outro lado, observou-se a eficiência da utilização do coagulante natural (Tanfloc SG) no processo de coagulação, floculação e decantação da vinhaça.

Também foi possível observar a importância dos testes iniciais com os coagulantes, essa metodologia possibilitou obtenção das melhores faixas de concentração para o desenvolvimento do trabalho com o Tanfloc SG e também precedeu a verificação da ineficiência dos coagulantes inorgânicos.

A partir da realização de ensaios utilizando a vinhaça com o ajuste de pH e a vinhaça *in natura*, foi possível observar visualmente e com o auxílio dos dados coletados a grande variação de suas características devido a essa modificação. Também, graças a esta conduta, foi possível avaliar os índices de remoção para a vinhaça com ajuste de pH e para a vinhaça *in natura*.

A vinhaça com ajuste de pH apresentou os menores índices de remoção em relação a vinhaça *in natura*. A vinhaça com ajuste de pH, coagulada a partir do Tanfloc SG, ficou fora dos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 em relação aos parâmetros avaliados no estudo, inclusive em relação ao pH.

Já a vinhaça *in natura* correspondeu melhor ao processo de tratamento físico-químico por meio da coagulação, floculação e decantação com a utilização do coagulante Tanfloc SG. Atingiu altas taxas de remoção, tanto para cor quanto para turbidez, chegando a se enquadrar nos parâmetros mais rigorosos de lançamentos avaliados no estudo, utilizando como referência a Resolução CONAMA 357/05. Porém, ficando aquém no parâmetro pH.

Devido à grande quantidade de sólidos na vinhaça, formados principalmente por matéria orgânica, a introdução de um pré-tratamento biológico para remoção de parte dessa matéria orgânica possivelmente

colaboraria imensamente na obtenção de resultados mais expressivos. Desta forma como sugestão para a continuidade do trabalho sugere-se, portanto, a utilização do processo físico-químico de coagulação, floculação e decantação com variados tipos de coagulantes, porém precedidos de um tratamento biológico para redução da carga orgânica da vinhaça.

REFERÊNCIAS

APHA. American **Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20.ed. Washington: AWWA/APHA/WEF, 1998.

AZEVEDO, MILENA. S.; SANTOS, RAQUEL. V. C.; MAGALHÃES, THAÍS V. Produção de Etanol no Brasil. **Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 2, n. 1, p. 151-154, 2012.

BORBA, L. R. **Viabilidade do uso da moringa oleifera lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades**. 2001. 76f. Dissertação (Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Centro de Ciências exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa. 2001.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama (2005). Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 18 mar. 2005. P. 58-63. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm>. Acesso em: 25 mar. 2013.

BRASIL. Lei 9.433/97, de 8 de janeiro de 1997. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/l9433.htm>. Acesso em: 08 jun. 2013.

CABELLO, P.E.; SCOGNAMIGLIO, F.P.; TERÁN, F.J.C. **Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio de leito fluidizado**. **Engenharia Ambiental**. Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 1, p. 321-338, 2009.

CARVALHO, MARIA J. H. **Uso de Coagulantes Naturais no Processo de Obtenção de Água Potável**. 2008. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

CAVALCANTI, C. Meio Ambiente, Desenvolvimento Sustentável e Políticas Públicas. **Curso agenda 21**. 14p. 2002.

CHAGAS, ANDRÉ L. S. **Três EnsaioS Sobre o Setor produtor de Cana-de-Açúcar no Brasil**. 2009. 112p. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CHRISTOFIDIS, DEMETRIOS. Água, Ética, Segurança Alimentar e Sustentabilidade Ambiental. **Revista Bahia Análise & Dados**, v. 13, n. ESPECIAL, p. 371-382, 2003.

COSTA, L. A. V.; IGNÁCIO, R. P. Relações de Consumo x Meio Ambiente: Em busca do Desenvolvimento Sustentável. In: **Âmbito Jurídico**, Rio Grande, XIV, n. 95, 2011. Disponível em: <http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=10794&revista_caderno=5>. Acesso em: 25 mar. 2013.

DI BERNARDO, LUIZ; DANTAS, ANGELA D. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, LUIZ; PÁDUA, V. L. Método Comparativo do Tamanho dos Flocos Formados Após a Coagulação Com Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico. **XXVII Congresso Interamericano De Engenharia Sanitária Ambiental**. 12p. 2000.

FARIA, A. A. A.; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. Concenração da Vinhaça e Reaproveitamento da Água. **IV Semana de Tecnologia do Curso de Biocombustíveis da Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal**. FATEC-JB – Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal, Jaboticabal – SP; Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias /UNESP, Jaboticabal – SP. 4p. 2011.

FRANCO, E. F. **Avaliação da Influência dos Coagulantes de Alumínio e Cloreto Férrico na Remoção de Turbidez e Cor da Água Brita e Sua Relação com Sólidos na Geração de Lodo em Estações de Tratamento de Água**. 2009. 187f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - SP. 2013.

GIRARDI, FRANCIÉLLE. **Tratamento de Vinhaça Utilizando Coagulantes Naturais**. 2009. 169f. Tese (doutorado em Engenharia Química) – Universidade estadual de Maringá, Maringá – PR. 2009.

LAIME, EDUARDO M. O.; FERNANDES, PEDRO D.; OLIVEIRA, DAYANE C. S.; FREIRE, EPITÁCIO A. Possibilidades tecnológicas Para a Destinação da Vinhaça: Uma Revisão. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e biológicas**, v.5, n.3, pág 16 - 29, 2011.

LIBÂNIO, MARCELO. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3. ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.

LIMA, HENRIQUE. H. S.; BEZERRA, ALEXANDRE. F.; RODRIGUES, ELISANGELA. G. S.; JAGUARIBE, EMERSON. F.; SENA, RENNIO. F. Tratamento Físico Químico da Vinhaça com Uso de Carvão Ativado do Bagaço da Cana de Açúcar. In: **Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB**. 1., 2012, João Pessoa.

LOBÃO, EDSON. A crise do petróleo e os biocombustíveis. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 27 jul. 2008. Primeiro Caderno, p. 3.

MANCUSO, PEDRO C. S.; SANTOS, F. **Reúso da água**. 3 ed. Barueri: Manuelie, 2003.

MORAES, LEILA C. K. **Estudo da Coagulação-Filtração Para a Produção de Água Potável**. 2004. 135f. Tese (mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade estadual de Maringá, Maringá, 2007.

NETO, ANDRÉ E. Uso e Reúso de Água na Indústria Canavieira. In: **Workshop on The Impact of New Technologies on the Sustainability of the Sugarcane/Bioethanol Production Cycle**. Centro de Ciências e Tecnologias Do Bioetanol, 2009, São Paulo.

NITSCH, MANFRED. O Programa de Biocombustíveis Proálcool no Contexto da Estratégia Energética Brasileira. **Revista de Economia Política**, vol. 11, n. 2 (42), pág. 123 – 138. 1991.

OLIVEIRA, MARCO. Vinhaça Alternativa: Resíduo da Produção de Etanol Pode Ser Usado para Produzir Biodiesel. **Revista Pesquisa FAPESP: Ambição Espacial**, ed. 187, pág. 70 – 73, 2011.

OUTLOOK FIESP 2023. Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol. Outlook Fiesp 2023: **Projeções para o Agro Negócio Brasileira**. Federação das Indústrias do estado do de São Paulo. São Paulo: Fiesp. Pág. 37 – 45, 2013.

PREVITALI, Noemi R. **Uso de vinhaça para fertirrigação**. 2011. 60f. Trabalho (Graduação) – Apresentado ao Curso de Tecnologia em Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2011.

REHDER, MARCELO. Crise leva quase 20% das usinas de cana do Centro-Sul a fechar ou mudar de dono. **O Estado de São Paulo**, São Paulo. 18 fev. 2013. Economia, p. 14.

RODRIGUES, RANGEL C. Aplicabilidade de Coagulantes naturais e não naturais no Tratamento Físico-Químico da Vinhaça. **XXIV Congresso de Iniciação Científica da UFLA. Universidade Federal de Lavras**, Lavras – MG, 15p., 2011.

ROSALINO, Melanie R. R. **Potenciais efeitos da presença de alumínio na água de consumo humano**. 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

SAMPAIO, SABRINA. P.; VIEIRA, S. M. **Estudo Da Estabilidade da Cor do Caldo de Cana (Saccharum spp.)**. 2009. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Alimentos) - Centro Universitário de Belo Horizonte (UNI-BH), Belo Horizonte, 2009.

SANTIAGO, RAFAEL M.; GIRARDI, FRANCIÉLLE; GIMENES, MARCELINO L. Tratamento de Vinhaça Com os Coagulantes Naturais: Quitosana, Tanino E Moringa. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. 8. 2009, Uberlândia.

SANTOS, RAFAEL C. O.; FILHO, OLAVO B.; GIORDANO, GANDHI. Proposta de um Método de Cálculo do Tempo de Sedimentação no Tratamento de Esgoto por Lodos Ativados em Bateladas. *Revista Engenharia Sanitária Ambiental*, vol. 10, n 3, pág. 185 – 193, 2005.

SCHUCHARDT, ULF; RIBEIRO, MARCELO L.; GONÇALVES, ADILSON R.; A Indústria Petroquímica no Próximo Século: Como Substituir o Petróleo Como Matéria-Prima. **Quim. Nova**, vol. 24, Nº 2, pág. 247-251, 2001.

SILVA, MELISSA A. S.; GRIEBELER, NORI P.; BORGES, LINO C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.1, pág. 108 – 114, 2007.

SILVA, T. S. S. **Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e esgoto**. 1999. 85f. Tese (Mestrado, Área de Saúde Pública) – Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 1999.

SIQUEIRA, MARIA E. T. **Estudo da Utilização de Coagulantes Naturais e**

Químicos em uma Estação de Tratamento de Água Piloto (ETA-Piloto). 2009. 91p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

TANAC. **Boletim Informativo.** Montenegro. Brasil, 2013. 8p.

TEIXEIRA, MÔNICA. Brasil Deixa de Ser Autossuficiente na Produção de Petróleo. In: Bom Dia Brasil. Disponível em: < <http://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2013/04/brasil-deixa-de-ser-autossuficiente-na-producao-de-petroleo.html> > Acesso em: 07 fev. 2014.

TERMO DE REFERÊNCIA PARA O WORKSHOP TECNOLÓGICO. **Vinhaça.** 1. 2007, Jaboticabal. Anais... Universidade Estadual Paulista. 2007. Jaboticabal.

THEODORO, JOSEANE. D. **Estudo Dos Mecanismos de Coagulação/Floculação Para a Obtenção de Água de Abastecimento Para o Consumo Humano.** 2012. 184f. Tese (Doutorado em Engenharia Química, área de desenvolvimento de processos) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

YOUNG, CARLOS E. F. Sustentabilidade e competitividade: O Papel das empresas. **Revista de Economia Mackenzie**, v. 5, n. 5, pág. 87-101, 2007.

Anexo A

SÓLIDOS

(APHA, 1998)

Procedimento para Determinação dos Sólidos Totais, Fixos e Voláteis:

Tarar uma cápsula de porcelana limpa e seca, colocando-a na mufla por 30 minutos, esfriar em dessecador e pesar (P_1).

Adicionar à cápsula um volume conhecido de amostra previamente homogeneizada.

Levar a cápsula a estufa à 100°C, até secagem completa (cerca de 12 horas).

Esfriar em dessecador e pesar (P_2).

Levar a cápsula à mufla (550°C) por duas horas. Esfriar em dessecador e pesar (P_3).

Cálculos:

$$ST(mg / L) = \frac{(P_2 - P_1) \times 1.000.000}{V_A}$$

$$SF(mg / L) = \frac{(P_3 - P_1) \times 1.000.000}{V_A}$$

$$SV(mg / L) = \frac{(P_2 - P_3) \times 1.000.000}{V_A}$$

Em que, V_A é o volume da amostra (mL).