

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

**TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE EFLUENTE DE UMA USINA DE  
RECICLAGEM DE PLÁSTICO DE CAMPO GRANDE-MS**

Campo Grande  
Maio de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

**LIGIA SILVA VIVEIROS**

**TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE  
EFLUENTE DE UMA USINA DE RECICLAGEM DE  
PLÁSTICO DE CAMPO GRANDE-MS**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, na área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

**ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria Lúcia Ribeiro**

Aprovada em:

**Banca Examinadora:**

Profa. Dra. Maria Lúcia Ribeiro  
DHT/UFMS

Prof. Dr. Carlos Nobuyoshi Ide  
DHT/UFMS

Dra. Matildes Blanco  
IMASUL/SEMAC

Campo Grande, MS  
2008

Ficha catalográfica preparada pela  
COORDENADORIA DA BIBLIOTECA CENTRAL/UFMS

Viveiros, Ligia Silva  
Tratamento Físico-químico de efluente de Usina de Reciclagem  
de Plástico em Campo Grande-MS/Ligia Silva Viveiros – Campo  
Grande-MS, 2008.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso  
do Sul, 2001.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Lúcia Ribeiro

1.coagulação/floculação 2. teste de jarros. 3. águas de lavagem

## DEDICATÓRIA

*A minha família,  
pelo apoio e incentivo.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Professora Doutora Maria Lúcia Ribeiro, pelo empenho, garra e determinação na conclusão deste trabalho. Sou muito grata por sua brilhante orientação.

À Professora Doutora Leila Maria Mercê de Albuquerque “in memória”, pela força de vontade, amor e entusiasmo pela ciência. Saudades!

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Hidráulica e Transportes e do Laboratório de Qualidade Ambiental (LAQUA) da UFMS, pela excelente colaboração.

*O pensamento não passa de um clarão na  
noite; mas esse clarão representa tudo.*

*Henri Poincaré*

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	i
AGRADECIMENTOS .....	ii
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	viii
RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO GERAL .....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 Tratamento de Efluentes Industriais .....	5
3.1.1 Tratamentos Físico-químicos .....	7
3.1.2. A Coagulação/Floculação como etapa do processo de tratamento .....	12
3.1.2.1. Coagulação .....	13
3.1.2.2. O Diagrama de Amirtharajah e Mills .....	20
3.1.2.3. Floculação .....	22
3.1.2.3.1. Mistura rápida .....	22
3.1.2.3.2. Floculadores .....	23
3.1.2.4. Decantação .....	24
3.2 Usina de Reciclagem de Plástico .....	25
3.2.1 Efluente de Usina de Reciclagem de Plástico .....	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	29
4.1 Dosagem de coagulante em função da alcalinidade da amostra .....	32
4.2 Teste de Jarros .....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	36
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Amostra de efluente de indústria de papel após ser tratado por meio do processo de coagulação/floculação .....	14
FIGURA 3.2 – Desestabilização da partícula em suspensão por rompimento da dupla capa e conseqüente diminuição do potencial zeta, dando início à coagulação no meio aquoso.....	15
FIGURA 3.3 – Modelo esquemático dos processos de coagulação e floculação.....	16
FIGURA 3.4 – Desestabilização por adsorção de partículas (ou colóides) em suspensão .....	17
FIGURA 3.5 – Desestabilização por varredura de partículas (ou colóides) em suspensão .....	18
FIGURA 3.6 – Interação entre partículas, ou coágulos, em suspensão e polieletrólitos catiônicos em meio aquoso.....	19
FIGURA 3.7 – Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio .....	21
FIGURA 4.1 – Atividades relacionadas à reciclagem .....	29
FIGURA 4.2 – Vista de peneira estatica.....	30
FIGURA 4.3 – Vista do homogeneizador.....	31
FIGURA 4.4 – Entrada do decantador – Medidor de vazão do tipo Calha Parshall .....	32
FIGURA 4.5 – Vista do tanque decantador elevado .....	32
FIGURA 4.6 – Vista do aparelho utilizado para o Teste de Jarros .....	33
FIGURA 4.7 – Especificação do aparelho utilizado no teste.....	34
FIGURA 5.1 – Ensaio de bancada de Teste de Jarros .....	42
FIGURA 5.2 – Efluente clarificado após o ensaio coagulação – floculação pelo teste de jarros .....	43
FIGURA 5.3 – Diagrama de Coagulação-Floculação .....	44
FIGURA 5.4 – Eficiência de Remoção de Cor e Turbidez.....	45
FIGURA 5.5 – Gráfico da correlação entre dosagem de coagulante em $\text{mg.L}^{-1}$ e pH da solução .....	48
FIGURA 5.6 – Gráfico da correlação entre pH da solução e % de remoção de cor .....	49
FIGURA 5.7 – Gráfico da correlação entre pH da solução e % de remoção de turbidez.....	50
FIGURA 5.8 – Gráfico da correlação entre dosagem de coagulante em $(\text{mg.L}^{-1})$ e % de remoção de cor.....	51
FIGURA 5.9 – Gráfico da correlação entre dosagem de coagulante em $(\text{mg.L}^{-1})$ e % de remoção de turbidez .....	52

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Aplicações de processos unitários químicos no tratamento de efluentes líquidos.....	08
TABELA 3.2 – Compostos químicos usados no tratamento de efluentes líquidos.....	09
TABELA 5.1 – Características da amostra e resultados para o Teste 1 .....	36
TABELA 5.2 – Características da amostra e resultados para o Teste 2 .....	37
TABELA 5.3 – Características da amostra e resultados para o Teste 3 .....	37
TABELA 5.4 – Características da amostra e resultados para o Teste 4 .....	38
TABELA 5.5 – Características da amostra e resultados para o Teste 5 .....	38
TABELA 5.6 – Características da amostra e resultados para o Teste 6 .....	39
TABELA 5.7 – Características da amostra e resultados para o Teste 7 .....	39
TABELA 5.8 – Características da amostra e resultados para o Teste 8 .....	40
TABELA 5.9 – Características da amostra e resultados para o Teste 9 .....	40
TABELA 5.10 – Características da amostra e resultados para o Teste 10 .....	41
TABELA 5.11 – Características da amostra e resultados para o Teste 11 .....	41
TABELA 5.12 – Valores médios de pH, dosagem de $Al_2(SO_4)_3$ , % de remoção de cor e turbidez apresentados nos testes de coagulação/floculação .....	43
TABELA 5.13 – Dados de pH, $[Al_2(SO_4)_3]$ em $mg.L^{-1}$ , % de remoção de cor e % de remoção de turbidez, para os respectivos testes .....	45
TABELA 5.14 – Correlação linear .....	47

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FT	Fósforo Total
LAQUA	Laboratório de Qualidade Ambiental
PET	Polietileno
pH	Potencial Hidrogeniônico
RPM	Rotação por minuto
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais

**LISTA DE SÍMBOLOS**

Al	Alumínio
Ca	Cálcio
cm	Centímetro
dV	Diferencial de velocidade
Fe	Ferro
G	Gradiente de velocidade
H <sup>+</sup>	Íon Hidrogênio
L	Litro
m	Metro
mg	miligrama
Na	Sódio
N	Velocidade da mistura em RPM
OH <sup>-</sup>	Íon Hidroxila
P	Potência
S	Enxofre
SiO <sub>2</sub>	Óxido de Silício
V	Velocidade do escoamento
$\pi$	pi

## RESUMO

VIVEIROS, L.S. (2008). *Tratamento Físico-Químico de efluente de uma usina de reciclagem de plástico de Campo Grande-MS. Campo Grande, 2008. 51 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.*

A fim de regular os usos, a qualidade ambiental e sanitária da água foram criadas leis que visam garantir a qualidade por meio de monitoramento dos parâmetros de qualidade para fins de potabilidade, como a Portaria Federal nº 518, do Ministério da Saúde. Para atingir os padrões de qualidade de água e efluentes, devem ser utilizados sistemas de tratamento específicos que garantam o cumprimento da legislação pertinente e a eficiência desejada. Em estações de tratamento de água, uma das etapas mais importantes em sistemas de tratamento físico-químico de água é a de coagulação/floculação, que geralmente é seguida do processo de decantação, flotação, ou, ainda, das duas etapas associadas, que se destina à remoção de sólidos em suspensão, que conferem à água turbidez, e de sólidos dissolvidos, que conferem cor e sabor. O desenvolvimento de mecanismos práticos em escala de bancada, viabilizou a aplicação de coagulação/floculação em larga escala nas estações de tratamento de água, dada a sua praticidade e controle, aliada à elevada eficiência operacional. Neste trabalho foi utilizado o método de coagulação/floculação por meio de ensaio de bancada, pelo método do Teste de Jarros, com o objetivo de avaliar a eficiência de remoção de cor e turbidez em um efluente industrial de uma usina de reciclagem de plástico, utilizando o coagulante sulfato de alumínio e cloreto férrico. Como resultado, os testes indicaram que a eficiência de remoção de cor e turbidez estão relacionadas com o pH da solução e com a concentração de coagulante utilizada no ensaio, podendo ser comparado com o Diagrama de Amiltharajah-Mills.

Palavras-Chave: efluente industrial; tratamento físico-químico; coagulação/floculação; teste de jarros.

## ABSTRACT

VIVEIROS, L.S. (2008). *Physical-chemical effluent treatment of Campo Grande-MS's of recycling of packings plastics*. Campo Grande, 2008. 51 p. Master Dissertation –Federal University of Mato Grosso do Sul, Brazil (in Portuguese).

Abstract – To regulate the uses, environmental quality and health of water were created laws designed to ensure quality by monitoring the parameters of quality for drinking, as the Federal Ordinance N. 518, Ministry of Health of Brazil to achieve the quality standards for water and wastewater, treatment systems must use specific to ensure compliance with relevant legislation and the efficiency desired. In water treatment plants, one of the most important systems on physico-chemical treatment of water is to coagulation / flocculation, which is usually followed by the process of decantation, flotation, or the two steps involved, which intended for removal of suspended solids that give water turbidity, and dissolved solids, which give color and flavor. The development of practical mechanisms in bench scale, allowed the application of coagulation / flocculation on a large scale in water treatment plants, because of their practicality and control, coupled with high operational efficiency. In this work we used the method of coagulation / flocculation using test bench, using the method of test jars, to evaluate the efficiency of removal of color and turbidity in an industrial effluent from a plant for recycling of plastic, using the coagulant aluminum sulfate and ferric chloride. As a result, the tests indicated that the efficiency of removing turbidity and color are related to the pH of the solution and the concentration of coagulant used in the test and can be compared with the diagram of Amiltharajah-Mills.

**Key-words:** effluent treatment; physical-chemical treatment; coagulation/flocculation; jar test.

# 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à vida utilizada em larga escala pelo homem para diversos fins: abastecimento público, esgotamento sanitário, indústrias, irrigação, geração de eletricidade, recreação, entre outros. O uso da água esta cada vez mais diversificado associado ao crescimento demográfico e vem exigindo atenção maior às necessidades de uso de água para as mais diversas finalidades (Mancuso & Santos, 2003). Para regular os usos, a qualidade ambiental e sanitária da água existem leis que visam garantir a qualidade da água através do monitoramento dos parâmetros para fins de potabilidade (Portaria Federal nº 518, do Ministério da Saúde). A proteção ambiental de cursos d'água, mananciais e dos ecossistemas diretamente dependentes destes, também deve ser escopo do controle da qualidade de efluentes industriais e domésticos, regulamentado por legislação ambiental vigente que tem por finalidade estabelecer padrões de lançamento de efluentes, obedecendo aos critérios de classificação e enquadramento dos cursos d'água (Resolução nº 357, do CONAMA), baseado nos usos aos quais estes se destinam, associado ao poder de fiscalização dos órgãos competentes nas esferas federal, estadual e municipal, atuando as duas últimas de forma mais restritivas, de acordo com a necessidade e anseio da comunidade, através de legislação local, devendo ser, no mínimo, tão exigente quanto a do Estado de origem e nunca mais tolerante.

Para atingir os padrões de qualidade de água e efluentes, devem utilizados sistemas de tratamento específicos que garantam o cumprimento da legislação pertinente e a eficiência desejada.

Em estações de tratamento de água, uma das etapas mais importantes em sistemas de tratamento físico-químico de água é a de coagulação/floculação, que geralmente é seguido do processo de decantação, flotação, ou, ainda, das duas etapas associadas, que se destina à remoção de sólidos em suspensão, que conferem à água turbidez, e de sólidos dissolvidos, que conferem cor e sabor. O processo que agrega as etapas citadas coagulação/floculação, seguida de filtração, é denominado clarificação.

A presença de sólidos na água pode acarretar sérios efeitos, diretos e indiretos, ao meio ambiente e aos organismos dele dependentes, inclusive ao homem, já que podem ser constituídos de substâncias nocivas, além das alterações físicas que proporcionam aos meios aquáticos.

O desenvolvimento de mecanismos práticos em escala de bancada, viabilizou a aplicação de coagulação/floculação em larga escala nas estações de tratamento de água, dada a sua praticidade e controle, aliada à elevada eficiência operacional. O planejamento prévio detalhado do processo de coagulação/floculação tornou-se uma ferramenta essencial para a execução de projetos de estações de tratamento de água, evitando desperdícios de recursos ou ineficiência operacional, por meio dimensionamento adequado, tendo em vista as oscilação de características físico-químicas da água ou do efluente a ser tratado, o que pede uma investigação rigorosa prévia (no caso de elaboração de projeto) ou um monitoramento periódico assíduo (nas estações de tratamento de água) por meio de teste de bancada, em pequena escala, simulando situação real, sendo este referenciado por autores com diversos termos, como “Ensaio de Floculação”, “Ensaio de Coagulação/Floculação”, “Ensaio de Jarro”, “Jar-Test”, ou, ainda, “Teste de Jarros”, denominação que será adotada para este trabalho.

O Teste de Jarros simula situação real do sistema de tratamento de água, e, para tanto, deve-se utilizar amostra representativa, em relação às características da água a ser tratada, além de serem reproduzidas no ensaio, as condições operacionais do sistema, como tempos de contato de reação e de formação de floco, as características de mecânica do fluido, intensidade da mistura e da agitação para formação de floco, gradiente de velocidade, velocidade de decantação, entre outras, a fim de definir qual a melhor alternativa operacional (no caso de elaboração de projeto) ou a melhor concentração de reagentes, coagulante e auxiliares, para a correção da condição de qualidade de água pré-existente, obtendo-se maior eficiência do sistema de tratamento.

Atualmente, o processo de coagulação/floculação vem sendo empregado em plantas de estações de tratamento de esgotos com finalidade de aumentar a eficiência e gerar um efluente clarificado. Tendo em vista a escassez de água em qualidade desejável, se faz necessário utilizar técnicas e tratamentos adequados de efluentes a fim de difundir e intensificar o reuso da água em processos industriais, como forma de diminuir o lançamento de efluentes tratados em cursos d'água.

Este trabalho teve como objetivo avaliar as melhores condições no tratamento físico-químico de efluente de uma indústria de reciclagem de plástico, localizada em Campo Grande – MS, por meio do processo de coagulação/floculação que reutiliza a água na fabricação de mangueiras de plástico.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Determinar em escala de bancada, por meio de Teste de Jarros, as melhores condições de aplicação de coagulantes e faixa de pH para o tratamento do efluente de uma Usina de Reciclagem de Plástico, localizada no município de Campo Grande-MS, que reutiliza o efluente clarificado no processo industrial.

Investigar a correlação entre os parâmetros pH, concentração de coagulante, remoção de cor e remoção de turbidez, utilizando o método estatístico de regressão linear.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os recursos hídricos são bens de relevante valor para promoção do bem-estar de uma sociedade. A água é bem de consumo final ou intermediário de diversas atividades humanas. Com o aumento da intensidade e variedade desses usos ocorrem conflitos entre usuários. Uma forma eficiente de evitar e administrar estes conflitos é a gestão integrada do uso, controle e conservação dos recursos hídricos. Isto envolve a consideração de uma grande diversidade de objetivos (econômicos, ambientais, sociais, etc.), usos (irrigação, geração de energia, abastecimento, lançamento de efluentes etc.) e alternativas (Tucci, 2002).

Tucci (2002), ressalta que os usos dos recursos hídricos têm se intensificado com o desenvolvimento econômico, tanto no que se refere ao aumento da quantidade demandada para determinada utilização, quanto no que se refere à variedade dessas utilizações. Originalmente, a água era usada principalmente para dessedentação, usos domésticos, criação de animais e para usos agrícolas a partir da chuva e, menos frequentemente, com o suprimento irrigado (Ferreira Filho & Marchetto, 2006).

À medida que a civilização se desenvolveu outros tipos de usos foram surgindo, disputando os usos de recursos hídricos muitas vezes escassos e estabelecendo conflitos entre os usuários. As principais categorias dos usos da água encontram-se inseridas em três classes: infra-estrutura social; agricultura, florestamento e aquíicultura, e indústria (Tucci, 2002).

Há que se destacar a existência de regiões onde a escassez e a má distribuição de água tornam-se fatores limitantes ao seu próprio desenvolvimento. Diversos são os instrumentos, os mecanismos e as tecnologias a serem empregados no trato dessa questão, porém vários deles carecem de estudos e investigações que auxiliem o seu melhor emprego e produzam resultados sanitários, ambientais e econômicos satisfatórios. Uma das alternativas que se têm apontado para o enfrentamento do problema é o reuso de água, importante instrumento de gestão ambiental do recurso água e detentor de tecnologias já consagradas para sua adequada utilização (Mancuso & Santos, 2003)

Braile & Cavalcante (1993) explicam que na indústria, de modo geral, a água pode ser matéria-prima que se junta a outras para criar produtos acabados, ou ser utilizada como meio de transporte e como agente de limpeza. Em Usinas de reciclagem de plástico a água é o veículo de transporte de impurezas que foram removidas das embalagens plásticas. Neste sentido, esse efluente deve ter ser tratado de forma adequada.

### 3.1 Tratamento de Efluentes Industriais

A poluição do meio ambiente tornou-se assunto de interesse público em todas as partes do mundo. Ao lado dos crescentes problemas provocados pela contaminação do meio ambiente, estão os processos de produção utilizados para extrair matérias-primas e para transformá-las numa multiplicidade de produtos para fins de consumo em escala internacional (Braile & Cavalcante, 1993).

Braile & Cavalcante (1993) argumentam que os hábitos de consumo da sociedade moderna estimulam o crescimento das indústrias e conseqüentemente poluição dos recursos hídricos, quando os efluentes não recebem o tratamento adequado.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357/2005 classifica os corpos d'água, estabelece os padrões de qualidade das águas e estabelece os padrões de lançamento de efluentes (BRASIL, 2005).

O tratamento do efluente torna-o adequado para o lançamento no corpo receptor, sem que se altere sua qualidade, bem como mantenha disponível para os usos múltiplos do corpo hídrico. Analogicamente, ao solo e ar que pode ser afetados direta ou indiretamente pela poluição (Rocha *et. al.*, 2005).

Rocha *et. al.* (2005) afirmam que o objetivo do tratamento deve ser estabelecido para o projeto específico, pois existem inúmeros tipos de tratamento para determinados efluentes, dependendo de suas características. O nível de tratamento pode ser determinado pela comparação entre as características do efluente sem tratamento e as que se deseja obter para o efluente tratado. Inúmeros tipos de tratamentos e disposições ou alternativas de reutilização podem ser desenvolvidos e avaliados, e desta forma pode-se selecionar a melhor alternativa.

Os contaminantes dos efluentes líquidos são removidos por meios físicos, químicos e biológicos. Os métodos individuais são normalmente classificados como operações físicas unitárias, processos químicos unitários e processos biológicos unitários (Cossich, 2006).

Segundo Giordano (2003), processos físicos são os processos que basicamente removem os sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes através de processos físicos, tais como:

- Gradeamento;
- Peneiramento;
- Separação de óleos e gorduras;
- Sedimentação;

- Flotação;

Processos físicos também são aqueles capazes de remover a matéria orgânica e inorgânica em suspensão coloidal e reduzir ou eliminar a presença de microrganismos tais como:

- Processos de filtração em areia;
- Processos de filtração em membranas (micro filtração e ultrafiltração).

Os processos físicos também são utilizados unicamente com a finalidade de desinfecção, tais como a radiação ultravioleta (Giordano, 2003).

Giordano (2003), explica que são considerados como processos químicos aqueles que utilizam produtos químicos, tais como: agentes de coagulação, floculação, neutralização de pH, oxidação, redução e desinfecção em diferentes etapas dos sistemas de tratamento; através de reações químicas promovem a remoção dos poluentes ou condicionem a mistura de efluentes a ser tratada aos processos subsequentes. Os principais processos encontram-se listados a seguir:

- Clarificação química (remoção de matéria orgânica coloidal, incluindo os coliformes);
- Eletrocoagulação (remoção de matéria orgânica, inclusive de compostos coloidais, corantes e óleos/ gorduras);
- Precipitação de fosfatos e outros sais (remoção de nutrientes), pela adição de coagulantes químicos compostos de ferro e ou alumínio;
- Cloração para desinfecção;
- Oxidação por ozônio, para a desinfecção;
- Redução do cromo hexavalente;
- Oxidação de cianetos;
- Precipitação de metais tóxicos;
- Troca iônica.

Os processos biológicos de tratamento reproduzem em escala de tempo e área os fenômenos de autodepuração que ocorrem na natureza, têm como princípio utilizar a matéria orgânica dissolvida ou em suspensão como substrato para microrganismos tais como bactérias, fungos e protozoários, que a transformam em gases, água e novos microrganismos (Metcalf & Eddy, 2003).

Os esgotos sanitários e os efluentes industriais clarificados devido à remoção da matéria orgânica em suspensão (coloidal ou sedimentável) e dissolvida, bem como pela

redução da presença de microorganismos, são considerados tratados. O grau de tratamento requerido é função da legislação ambiental, ou seja, das características ou pelo uso preponderante atribuído ao corpo receptor (FEEMA, 1992).

Segundo Giordano (2003), os principais processos são:

- Lagoas anaeróbias e fotossintéticas;
- Os processos aeróbios são normalmente representados por lodos ativados e suas variantes: aeração prolongada; lodos ativados convencionais; lagoas aeradas facultativas; aeradas aeróbias;
- Os processos facultativos são bem representados pelos processos que utilizam biofilmes (filtros biológicos, biodiscos e biocontactores) e por algumas lagoas (fotossintéticas e aeradas facultativas). Os biocontactores apresentam também processos biológicos aeróbios.
- Os processos anaeróbios ocorrem em lagoas anaeróbias e biodigestores.

### **3.1.1 Tratamentos Físico-químicos**

As características dos efluentes industriais são inerentes à composição das matérias primas, das águas de abastecimento e do processo industrial. A concentração dos poluentes nos efluentes é função das perdas no processo ou pelo consumo de água (Giordano (2003).

Segundo Cossich (2006), o tratamento físico-químico de um efluente é realizado pela adição de espécies químicas ou por reações químicas. Os processos usados para o tratamento de efluentes em que a mudança é realizada por meio de reações químicas são conhecidos como processos químicos unitários. Na área de tratamento de efluentes, os processos químicos unitários são normalmente utilizados associados às operações físicas unitárias e com os processos biológicos unitários. A Tabela 3.1 apresenta aplicações de alguns processos químicos unitários no tratamento de efluentes líquidos.

A precipitação química, mais conhecida por coagulação, de águas residuárias decorrentes dos processos industriais tem sido empregada, na maioria das vezes, precedendo tratamento biológico de depuração, objetivando reduzir a carga orgânica afluente, conseqüentemente, obtendo-se menores dimensões destas unidades (Cossich, 2006).

TABELA 3.1 – Aplicações de processos unitários químicos no tratamento de efluentes líquidos.

Processo	Aplicação
Precipitação química	Remoção de fósforo e aumento da remoção de sólidos suspensos na sedimentação primária usada para tratamento físico-químico.
Adsorção	Remoção de orgânicos não removidos pelos métodos de tratamento químico e biológico convencionais. Também usada para remoção de cloro de efluentes antes da descarga final dos efluentes tratados.
Desinfecção	Destruição seletiva de organismos causadores de doenças (pode ser realizada de várias maneiras).
Desinfecção com cloro	Destruição seletiva de organismos causadores de doenças. O cloro é o composto químico mais usado.
Remoção de cloro	Remoção do cloro total combinado residual que existe após a cloração (pode ser realizada de várias maneiras).
Desinfecção com dióxido de cloro	Destruição seletiva de organismos causadores de doenças.
Desinfecção com cloreto de bromo	Destruição seletiva de organismos causadores de doenças.
Desinfecção com ozônio	Destruição seletiva de organismos causadores de doenças.
Desinfecção com luz ultravioleta	Destruição seletiva de organismos causadores de doenças
Outras aplicações químicas	Vários outros compostos químicos podem ser usados para se alcançar objetivos específicos no tratamento de efluentes líquidos.

Fonte: Cossich (2006).

As indústrias têxteis enfrentam diversos problemas no tratamento dos efluentes, um deles é o baixo nível da remoção da cor. Hassemer & Sens (2002) investigaram a eficiência do tratamento desses efluentes por meio de ozonização e coagulação-floculação. A finalidade da investigação foi obter a dosagem mínima de ozônio efetiva ao tratamento e as dosagens ótimas de sulfato de alumínio, cal e polímero para a remoção de cor e turbidez. No tratamento com coagulação-floculação a eficiência da remoção da cor com e sem polímero foi de 98%, para a turbidez a eficiência de redução foi de 95% sem polímero e 98% com polímero. Verificaram que a pré-ozonização não contribuiu de forma efetiva ao tratamento.

### **Coagulantes Utilizados**

Conforme Cossich (2006), os coagulantes mais utilizados nas plantas de tratamento de efluentes são o sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso e a cal para controle do pH. A Tabela 3.2 mostra os compostos químicos geralmente utilizados no tratamento de efluentes líquidos.

TABELA 3.2 – Compostos químicos usados no tratamento de efluentes líquidos.

Composto	Fórmula	Peso Molecular
Alúmen	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666,7
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$	594,3
Cloreto férrico	$FeCl_3$	162,1
Sulfato férrico	$Fe_2(SO_4)_3$	400,0
	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 3H_2O$	454,0
Sulfato ferroso	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278,0
Cal	$Ca(OH)_2$	56 como CaO

Fonte: Cossich (2006).

**Sulfato de Alumínio** - é o mais utilizado entre os coagulantes. É um sólido cristalino de cor branca-acinzentada, contendo aproximadamente 17% de  $Al_2O_3$  solúvel em água. É disponível em pedra, em pó ou em soluções concentradas (Cossich, 2006).

Na hidrólise do íon alumínio, em água pura com pH baixo predomina a forma  $Al^{+++}$  e em soluções alcalinas  $Al(OH)_4^-$  e  $Al(OH)_5^{--}$ . Em soluções diluídas na neutralidade temos o  $Al(OH)_3$ .

Na água, o  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  reage com a alcalinidade natural formando o  $Al(OH)_3$  segundo a reação (3.1).



O  $Al(OH)_3$  irá formar os flocos e o  $CO_2$  é o responsável pelo aumento da acidez da água. Quando a alcalinidade natural é reduzida, geralmente adiciona-se cal  $Ca(OH)_2$  ou carbonato de sódio  $Na_2CO_3$ , reações (3.2) e (3.3).

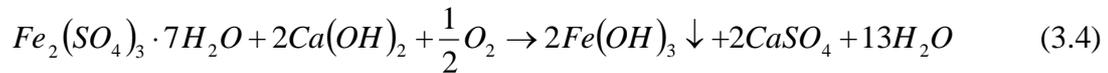


Outros sais de Alumínio são: sulfato duplo de alumínio e amônio  $Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$  (Alúmen de Amônio) e  $Na_2O \cdot Al_2O_3$  (Alúmen de Sódio) (Cossich, 2006).

### **Coagulantes de Ferro**

Cossich (2006) explica que o Sulfato ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) é um sólido cristalino de cor branca esverdeada, obtido como subproduto de outros processos químicos, principalmente

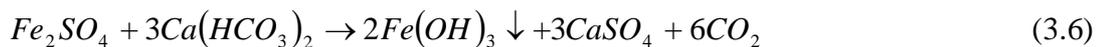
a decapagem do aço, disponível na forma líquida (da decapagem), é encontrado também na forma granular. O sulfato ferroso, quando adicionado à água precipita a forma oxidada de hidróxido de ferro III, assim a adição de cal ou cloro é geralmente necessária para uma coagulação efetiva, observa-se na reação (3.4).



O cloreto férrico é preparada adicionando-se cloro para oxidar o sulfato ferroso, vide reação (3.5). A vantagem em relação a cal é que a coagulação pode ser obtida numa extensa faixa de pH entre 4,8 e 11,00.



Também disponível na forma granular marrom-avermelhado, que é rapidamente solúvel em água, vide reação (3.6) e (3.7).



O cloreto férrico,  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  é usado, primariamente, na coagulação de esgotos sanitários e industriais, e apresenta aplicações limitadas no tratamento de água. Obtido clorando-se ferro, disponível comercialmente nas formas sólida e líquida, é altamente corrosivo, na forma hidratado ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) ou anidro ( $FeCl_3$ ), a coagulação pode ser realizada na faixa de pH de 4 a 11 (Cossich, 2006).

### **Alcalinizantes**

Cossich (2006) aponta que dentre os alcalinizantes, o mais utilizado pelo seu baixo custo é a cal (cal virgem ou viva, cal hidratada ou extinta, cal dolomítica, são outras denominações do óxido de cálcio). Podem também ser utilizado o hidróxido de cálcio  $[Ca(OH)_2]$  e de misturas deste com o óxido de magnésio (MgO) ou hidróxido de magnésio  $[Mg(OH)_2]$ .

### **Auxiliares de Coagulação**

Dificuldades com a coagulação, freqüentemente, ocorrem devido aos precipitados de baixa decantação, ou flocos frágeis que são facilmente fragmentados sob forças hidráulicas, nos decantadores e filtros de areia. Os auxiliares de coagulação beneficiam a floculação, aumentando a decantação e o enrijecimento dos flocos. Os materiais mais utilizados são os polieletrólitos, a sílica ativada, agentes adsorventes de peso e oxidantes (Cossich, 2006).

### **Polímeros Sintéticos**

Polímeros sintéticos são substâncias químicas orgânicas de cadeia longa e alto peso molecular, disponíveis numa variedade de nomes comerciais. Polieletrólitos são classificados de acordo com a carga elétrica na cadeia do polímero, os carregados positivamente são chamados de catiônicos e os que não possuem carga elétrica são os não-iônicos. Os polieletrólitos aniônicos e os não-iônicos são geralmente utilizados com coagulantes metálicos e promovem a ligação entre os colóides, a fim de desenvolver flocos maiores e mais resistentes.

Na coagulação de algumas águas, os polímeros podem promover floculação satisfatória, com significativa redução das dosagens de sulfato de alumínio. As vantagens potenciais são a reduções da quantidade de lodo e a maior facilidade à desidratação.

Algumas vezes, polímeros catiônicos e não-iônicos podem ser usados conjuntamente para formar um fluxo adequado, o primeiro sendo coagulante primário e segundo auxiliar de coagulação. Apesar de diversos avanços neste campo, existem varias águas que não podem ser tratadas apenas com polieletrólitos. Testes devem ser realizados para obtenção da eficiência de um polieletrólito no tratamento de uma determinada água (Cossich, 2006).

### **Sílica Ativada**

Segundo Cossich (2006) a sílica ativada é o silicato de sódio tratado com ácido sulfúrico, sulfato de alumínio, dióxido de carbono ou cloro. Como auxiliar de coagulação apresenta as seguintes vantagens: aumenta a taxa de reação química, reduz a dosagem de coagulante, aumenta a faixa de pH ótimo e produz um floco com melhores propriedades de decantação e resistência.

Desvantagem em relação aos polieletrólitos é a necessidade de um controle preciso de preparo e dosagem. Dosagem de 7 a 11% da dosagem do coagulante primário expresso em  $\text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{SiO}_2$ . Quando utilizada junto com o sulfato de alumínio ou sulfato ferroso, a sílica, por sua elevada carga negativa, promove a formação de flocos maiores, mais densos e resistentes, o que aumenta a eficiência de coagulação (Cossich, 2006).

### **Argilas Bentoníticas**

Usadas no tratamento de águas contendo alto teor de cor, baixa turbidez e baixo conteúdo mineral. Nestas condições, os flocos de Fe ou Al são demasiadamente leves para decantar rapidamente. A adição da argila resulta num aumento de peso do floco melhorando a decantabilidade (Cossich, 2006).

#### **3.1.2. A Coagulação/Floculação como etapa do processo de tratamento**

O processo de coagulação/floculação consiste na aglutinação de partículas presentes na água a ser tratada (água bruta ou efluente líquido) em pequenas massas, denominadas flocos, que dependendo de sua densidade em relação à água podem decantar ou flotar, sendo estes efeitos determinados, principalmente, pelos mecanismos físicos envolvidos no processo (Numes, 1996).

O processo ocorre em duas etapas distintas: a coagulação e a floculação. Estas dependem intimamente de fatores físicos e químicos para que ocorram de forma satisfatória. A coagulação/floculação, no tratamento de água e efluentes, visa à remoção da turbidez (orgânica e inorgânica), cor (aparente e verdadeira), microrganismos, algas, plânctons, substâncias responsáveis pelo odor e sabor, precipitados químicos e nutrientes (Numes, 1996). O processo pode ser aplicado no tratamento de águas para abastecimento e também no tratamento de efluentes industriais, visto que estes possuem, em muitos casos, substâncias tóxicas aos microrganismos responsáveis pelo tratamento biológico. Nesse sentido, faz-se necessário a aplicação de tratamento físico-químico, representado tradicionalmente pelo processo de coagulação/floculação (Gradg Jr, 1980).

Estudos realizados por Amoo & Amuda (2007) no tratamento de efluentes de uma indústria de bebidas, constatou-se uma grande eficiência dos processos de coagulação e floculação. Foram obtidas taxas de remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO),

fósforo total (FT) e sólidos dissolvidos totais (SDT) de 73, 95 e 97% respectivamente. Com a utilização do polieletrólito não-iônico poliacrilamida, as taxas de remoção de DQO, FT e SDT aumentaram para 91, 99 e 97%, respectivamente. Além disso, houve redução de 60% do volume de lodo gerado utilizando para o processo a associação do coagulante com o polieletrólito, se comparado à utilização apenas de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  para o tratamento. O processo de coagulação/floculação pode ser útil como tratamento único ou pré-tratamento antes de tratamento biológico para efluente de indústria de bebidas, dependendo da qualidade que se deseja para o efluente tratado.

O mecanismo de coagulação/floculação também pode ser usado para tratamento de águas residuárias domésticas. Estudos realizados por Mattei *et al.* (2007) mostraram através de Teste de Jarros as possibilidades de tratamento desse tipo de efluente com significativas taxas de remoção de DQO e sólidos suspensos totais. Variaram-se as concentrações de sulfato de alumínio, pH e velocidade de agitação. A eficiência de tratamento depende da concentração de coagulante e características do efluente. Foram utilizados efluentes de quatro estações municipais de tratamento, e a tratabilidade variou devido às diversas origens dos efluentes.

Domínguez *et al.* (2007) utilizaram o Teste de Jarros para determinar a capacidade de remoção de matéria orgânica em efluente de processamento de cortiça. Os parâmetros que variaram durante o processo de coagulação foram: dosagem coagulante (33–166  $\text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{Al}_3^+$ ), carga poluidora representada pela demanda química de oxigênio (DQO entre 1.060 e 3.050  $\text{mg.L}^{-1}$   $\text{O}_2$ ), tempo de mistura (5–30 min), velocidade ativa de rotação (60–300 rpm) e pH (4–11). As capacidades de remoção encontradas foram de 20–55% para DQO, 28–89% para polifenóis, e 29–90% para outros compostos aromáticos.

Aziz *et al.*, (2007) utilizaram vários coagulantes, como cloreto férrico, cloreto ferroso e sulfato de alumínio para remoção de cor em chorume de aterro sanitário, após tratamento pré-anaeróbio. Concluíram que com cloreto férrico a taxa de remoção de cor foi maior, aproximadamente 94% com dosagem de 800  $\text{mg.L}^{-1}$  a pH 4. O efeito dessa dosagem de coagulante na remoção de cor mostrou tendência semelhante para DQO, turbidez e sólidos suspensos.

### 3.1.2.1. Coagulação

Os termos coagulação e floculação são freqüentemente usados como sinônimos, para

fazer referência ao processo integral de aglomeração de partículas. Segundo Hammer (1979), o significado químico do termo coagulação é “a desestabilização de uma dispersão coloidal pela supressão da camada dupla”, e floculação é “a agregação de partículas”. Porém, os engenheiros tem usado, tradicionalmente, esta terminologia para fazer referência aos processos físicos utilizados no tratamento da água que envolvem estes mecanismos químicos. A Figura 3.1 apresenta uma amostra efluente de indústria de papel após sofrer o processo de coagulação/floculação (Giordano, 2003).



Figura 3.1 – Amostra de efluente de indústria de papel após ser tratado por meio do processo de coagulação/floculação.

Esta observação pode ser constatada pelas definições sugeridas por Richter & Azevedo Netto (1991), dentre as várias interpretações propostas por diversos autores, podendo, de uma forma geral, serem adotadas:

- Coagulação: Processo através do qual os coagulantes são adicionados à água, reduzindo as forças que tendem a manter separadas as partículas em suspensão.
- Floculação: Aglomeração das partículas por efeito de transporte de fluido, de modo a formar partículas de maior tamanho que possam sedimentar por gravidade.”

A coagulação visa à desestabilização das partículas que se encontram em suspensão, anulando as cargas eletrostáticas que as mantêm separadas umas das outras, de forma que unam-se formando aglomerados (flocos) numa segunda etapa, denominada floculação.

Segundo Di Bernardo (2003), a coagulação é capaz de agregar impurezas em suspensão fina, em estado coloidal ou em solução, e se dá pela adição, à água, de produtos químicos denominados coagulantes, capazes de originar a formação de coágulos hidrófobos, ou hidrofóbicos (que não possuem afinidade com a água, tornando-se insolúvel nesta), através da neutralização das cargas eletrostáticas das partículas, que são negativas, rompendo a dupla capa, responsáveis por mantê-las em suspensão, através de repulsão entre estas. A carga que promove este efeito de repulsão entre as partículas, é denominada potencial zeta, e, em média, tem um potencial de 25 milivolts, observa-se na Figura 3.2.

A concepção básica deste tipo de tratamento consiste em transformar em flocos impurezas em estado coloidal, suspensões, dissolvidos e, posteriormente, removê-los em decantadores. Para se obter a floculação, utilizam-se coagulantes químicos como sais de alumínio e de ferro, que reagem com a alcalinidade contida ou adicionada nas águas residuárias, formando hidróxidos que desestabilizam colóides, partículas em suspensão, pela redução do seu potencial zeta a valores próximos de zero, denominado ponto isoelétrico (Cossich, 2006).

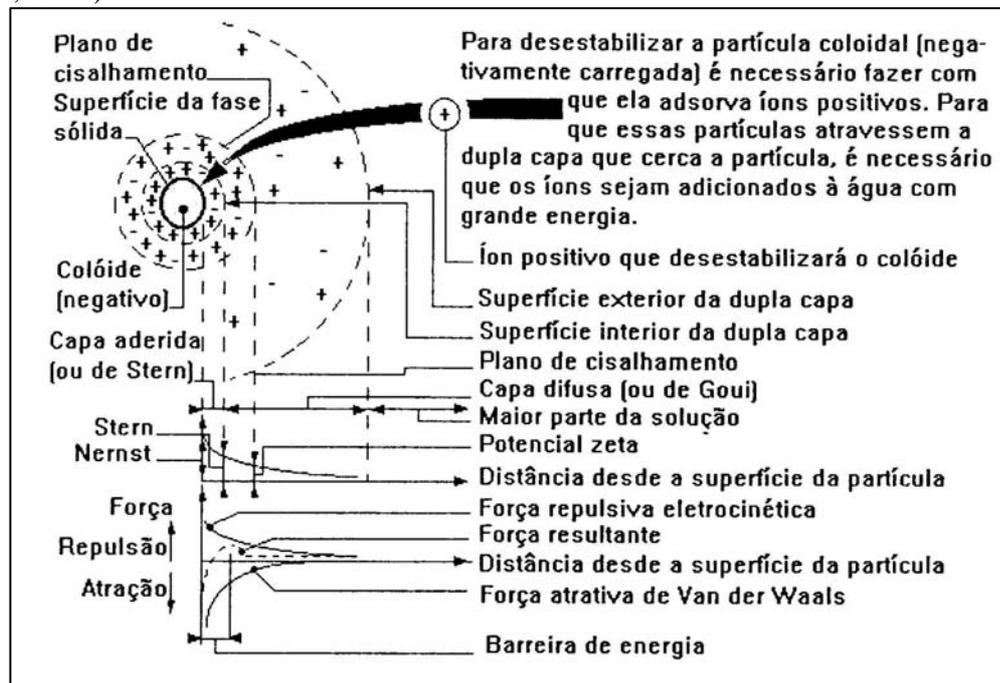


FIGURA 3.2 - Desestabilização da partícula em suspensão por rompimento da dupla capa e conseqüente diminuição do potencial zeta, dando início à coagulação no meio aquoso. Fonte: Di Bernardo (2003).

Sais de alumínio e de ferro em água se dissociam e disponibilizam seus íons metálicos

hidrolisados, altamente carregados eletricamente (de carga positiva), capazes de reduzirem as forças repulsivas das partículas, por meio da compressão da dupla da camada eletrostática difusa que as envolve. Com as forças repulsivas reduzidas, basta um pequeno incremento de energia, através de agitação lenta, para que haja o contato entre as partículas e a aglomeração progressiva destas, imperando a força de atração entre elas, em função de suas massas, com a conseqüente formação de flocos. A Figura 3.3 mostra o modelo esquemático dos processos de coagulação e floculação.

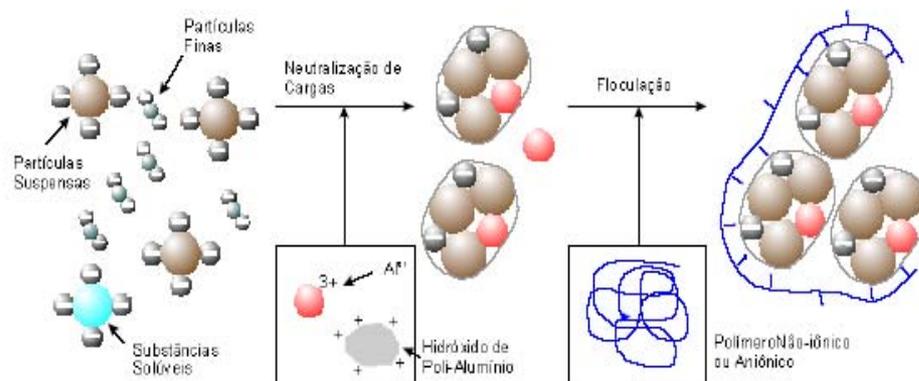


FIGURA 3.3. Modelo esquemático dos processos de coagulação e floculação.  
Fonte: Navachi (2002).

Durante a etapa de floculação a velocidade da água deve ser suficiente para promover o contato entre os coágulos, sem ser demasiadamente alta e que venha a produzir a quebra destes.

Como relata Di Bernardo (2003), a coagulação pode se processar por meio da desestabilização das partículas em suspensão por adsorção ou varredura. A desestabilização por adsorção é muito rápida, iniciando-se no instante em que o coagulante é adicionado à água e durando menos que 01 (um) segundo, devendo, por este motivo, ocorrer sob intensa agitação (mistura rápida), para que sua dispersão seja a mais homogênea possível, além da energia de mistura contribuir significativamente para que a superfície da partícula seja atingida pelo cátion metálico disponibilizado pelo coagulante, diminuído, de forma mais efetiva, o potencial zeta, originando a formação dos primeiros complexos metálicos hidrolisados, cuja composição é determinada pelas condições da água no momento e no ponto em que o coagulante entra em contato com esta, originando os flocos, através da adsorção entre estes complexos. Esta seqüência pode ser observada na Figura 3.4.

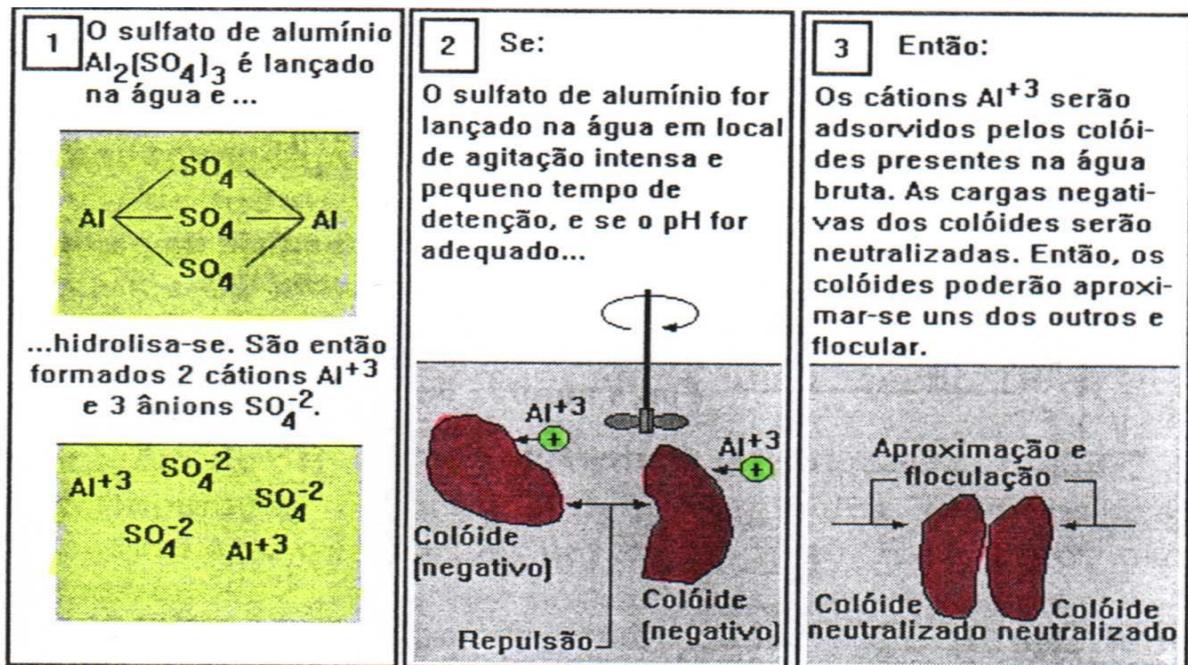


FIGURA 3.4 - Desestabilização por adsorção de partículas (ou colóides) em suspensão.  
Fonte: Di Bernardo (2003).

O coagulante mais utilizado no tratamento de água e de efluentes é o sulfato de alumínio, que forma produto insolúvel (hidróxido de alumínio, na forma de floco gelatinoso) no período de 01 (um) a 07 (sete) segundos, consumindo o sulfato de alumínio, que contribui para a coagulação das partículas em suspensão através da desestabilização por varredura. Quando isto ocorre, a remoção destas se processa por meio de arraste promovido pelos flocos gelatinosos de hidróxido de alumínio, que as incorpora à sua massa (conforme ilustração da Figura 3.5), o que pode resultar em boa clarificação da água. Porém, na prática o que se obtém é a associação das duas formas de coagulação (por adsorção e varredura), em maior ou menor grau, quando se utiliza o sulfato de alumínio como coagulante, dependendo da quantidade aplicada e da agitação na etapa de coagulação.

Os principais fatores químicos a serem considerados no processo de coagulação/floculação são o pH, a alcalinidade e a adição de produtos auxiliares, destinados a melhorar características desejáveis no processo, além das características do próprio coagulante escolhido e sua concentração para aplicação (Di Bernardo, 2003).

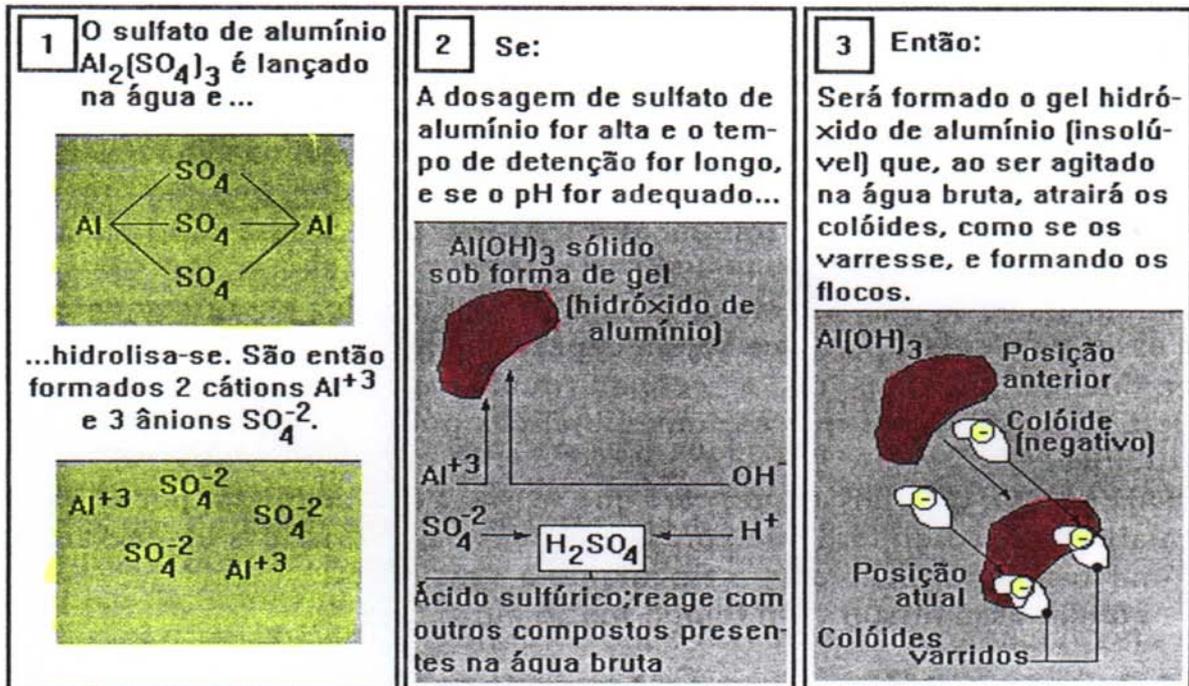


FIGURA 3.5 - Desestabilização por varredura de partículas (ou colóides) em suspensão.  
Fonte: Di Bernardo (2003).

Segundo Di Bernardo (2003), o pH deve se ajustar à condição ótima de trabalho do coagulante, especificamente adequada às características da água a ser tratada, determinada por meio de ensaio de bancada utilizando Teste de Jarros, podendo ser ajustado para mais ou para menos, de acordo com a necessidade, com a adição de produtos auxiliares, sendo os mais usuais o ácido sulfúrico, para redução do pH, o bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) e o hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), para aumento de pH.

A alcalinidade da água é conferida pela presença de íons bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ou hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ). Quando esta é devida à presença de íons carbonatos e hidróxidos é chamada de Alcalinidade Hidroxídica (ou “Alcalinidade à Fenolftaleína”, por ser este o reagente indicador utilizado para sua titulação), que só ocorre em águas com pH igual ou superior a 8,3, e quando é devida à presença de íons bicarbonatos é chamada de Alcalinidade Parcial (ou “Alcalinidade devida a bicarbonatos”), que utiliza como reagente indicador o alaranjado de metila (ou “metil orange”). A soma destas duas alcalinidades é a Alcalinidade Total, que representa a alcalinidade efetiva do meio (Di Bernardo, 2003).

A alcalinidade tem uma importância significativa no processo de coagulação/floculação, pois age como uma “solução tampão” de pH, mantendo este estável ao longo do processo, neutralizando ácidos (íons  $\text{H}^+$ ) ou bases (íons  $\text{OH}^-$ ) sem mudança

significativa do pH, já que em meio ácido o carbonato é convertido a bicarbonato, segundo a reação (3.8):



e em meio básico o bicarbonato é convertido à carbonato, segundo a reação (3.9):



A alcalinidade em águas naturais depende muito das características da fonte, assim como a alcalinidade de efluentes industriais depende do tipo de indústria e seus insumos utilizados (Navachi, 2002).

Os polieletrólitos possuem grande cadeia molecular que, em meio aquoso, podem apresentar um número grande de cargas distribuídas ao longo desta, sendo capaz de agregar inúmeras partículas, ou coágulos, contribuindo significativamente para o processo de coagulação/floculação, como mostra a Figura 3.6.

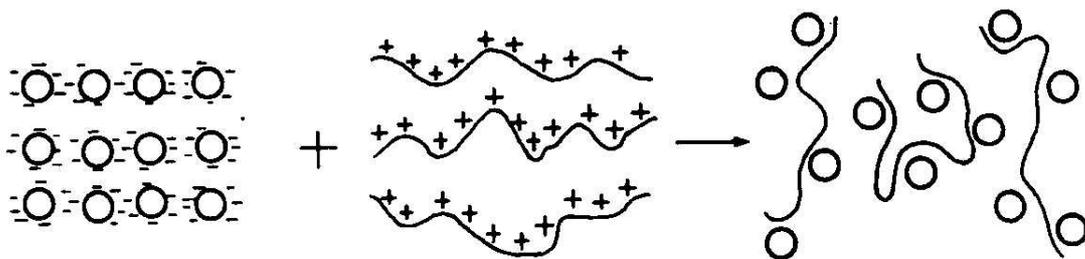


FIGURA 3.6 – Interação entre partículas, ou coágulos, em suspensão e polieletrólitos catiônicos em meio aquoso.  
Fonte: Di Bernardo (2003).

Di Bernardo (2003) descreve que os polieletrólitos podem ser naturais ou sintéticos, e classificados em catiônicos, aniônicos ou não-iônicos (que não se ionizam), de acordo com a carga que adquire sua cadeia polimérica em meio aquoso, determinando seu comportamento. Dentre as principais funções que desempenham no processo destacam-se as seguintes: reduzir o consumo de coagulante, aumentando a eficiência e neutralizar as cargas das partículas em suspensão, através da redução do potencial zeta, promovendo sua coagulação e floculação,

formando grandes flocos de considerável massa agregada, aumentando a velocidade de sedimentação e eficiência de arraste de outras partículas e pequenos flocos por varredura, com conseqüente redução do tempo de residência da água no circuito, sem prejuízo da qualidade final do processo, aumentando a capacidade de processamento sem alteração física do sistema de tratamento.

Os flocos pré-formados, a argila preparada e a sílica ativada visam contribuir para o aumento da eficiência nas etapas de floculação e decantação (sedimentação), sendo incorporados aos novos flocos formados no processo, fazendo com que estes sejam aglutinados, ganhando volume e massa, promovendo, no sistema de tratamento, benefícios práticos semelhantes àqueles conferidos pelos polieletrólitos, citados anteriormente (Di Bernardo, 2003).

O diagrama de Amirtharajah e Mills é um importante aliado para a realização destes estudos, quando o coagulante utilizado é o sulfato de alumínio, correlacionando concentração de coagulante com pH, servindo como um importante suporte para o início das investigações (Di Bernardo, 2003).

### **3.1.2.2. O Diagrama de Amirtharajah e Mills**

Di Bernardo (2003) explica que o diagrama de Amirtharajah e Mills é uma representação gráfica das concentrações de saturação dos produtos de hidrólise do sulfato de alumínio considerados mais importantes, definindo algumas áreas, nesta, que representam situações físicas esperadas no processo de coagulação/floculação, para condições de variação da concentração de coagulante, quando este é o sulfato de alumínio, e do pH da mistura, após a adição de reagentes envolvidos nesta fase do tratamento da água.

O diagrama destaca quatro regiões importantes:

- 1. Região que associa desestabilização das partículas por adsorção e por varredura:** situação que também é considerada satisfatória, porém com maior consumo de reagente, sendo dependente de fatores operacionais da estação de tratamento de água.
- 2. Região de restabilização das partículas:** nesta região, cargas positivas adsorvidas em excesso pelas partículas, inicialmente negativas, podem reverter sua carga, reestabilizando-se como partículas positivas.
- 3. Região de desestabilização das partículas por adsorção (coagulação):** nesta região as partículas adsorvem os produtos de hidrólise de forma mais satisfatória, tendo

diminuído seu potencial zeta, neutralizando suas cargas eletrostáticas e desestabilizando-as, resultando na perfeita formação de flocos, em condições adequadas de agitação, obtendo-se a maior eficiência do processo de coagulação/floculação. No limite superior da dosagem de sulfato de alumínio, para esta região, a carga negativa das partículas terá sido anulada.

- 4. Região de desestabilização das partículas por varredura:** nas condições representadas por esta região, há formação de hidróxido de alumínio (foco gelatinoso) que adsorve as partículas em suspensão por varredura, estando esta ocorrência principalmente relacionada com a aplicação de sulfato de alumínio em excesso e com o gradiente de velocidade utilizado para a mistura rápida, acarretando em maior consumo de coagulante.

Na Figura 3.7 é apresentado o diagrama de Amirtharajah e Mills com a identificação das regiões citadas anteriormente.

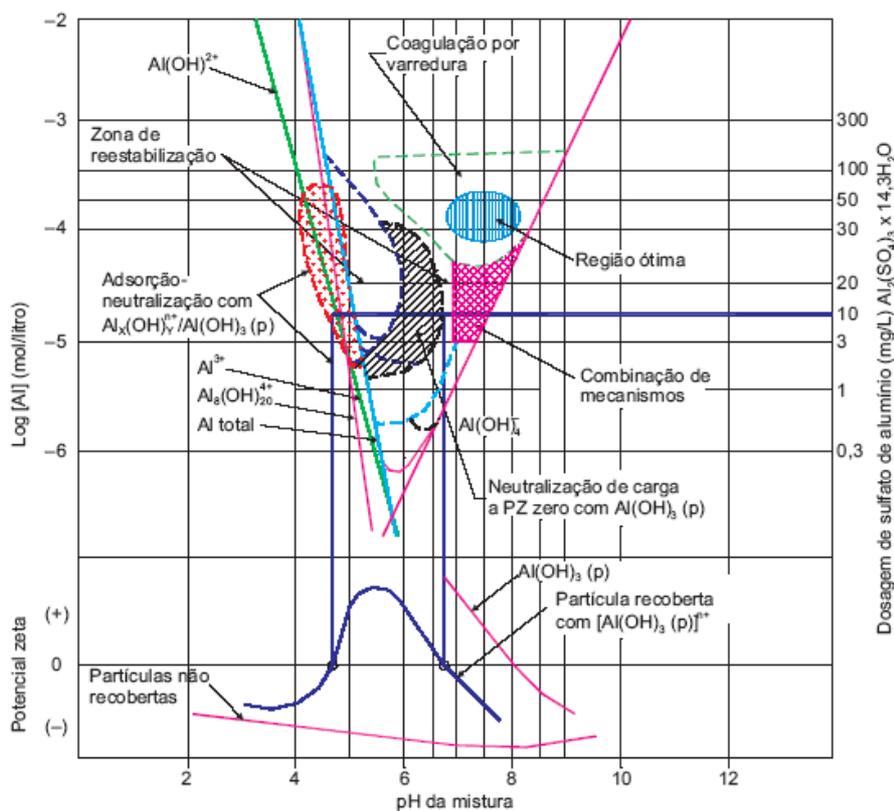


FIGURA 3.7 - Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio.  
Fonte: Amirtharajah & Mills (1982).

### 3.1.2.3. Floculação

A floculação é a segunda etapa do processo de coagulação/floculação é responsável pela aglomeração das partículas desestabilizadas na etapa de coagulação, por meio de transporte que permita o contato, formando coágulos porosos de maior tamanho (flocos), com conseqüente ganho de volume e massa, tornando-os sedimentáveis (Navachi, 2002).

Navachi (2002), aponta que esta etapa é um processo físico, dependendo de agitação lenta para promover o contato entre os coágulos formados e aglutinação, e tem duração que pode variar de 20 (vinte) a 30 (trinta) minutos. A energia envolvida nesta etapa deve ser a menor possível, evitando que haja a desagregação dos flocos já formados, o que aumentaria o tempo de sedimentação (decantação).

#### 3.1.2.3.1 Mistura rápida

O dimensionamento das câmaras de mistura rápida e de floculação convencionais, era feito em função exclusiva da velocidade da água e do tempo de detenção. Atualmente leva-se em conta também o gradiente de velocidade  $G$  (Di Bernardo, 2003).

A Norma Técnica da ABNT NBR 12216/92 que estabelece os critérios para o projeto de Estação de Tratamento de Água define mistura rápida como operação destinada a dispensar produtos químicos na água a ser tratada, em particular no processo de coagulação. As condições ideais em termos de gradiente de velocidade, tempo de mistura e concentração da solução de coagulante devem ser determinadas preferencialmente através de ensaios de laboratório. Quando estes ensaios não podem ser realizados, deve ser observada a seguinte orientação:

- A dispersão de coagulantes metálicos hidrolisáveis deve ser feita a gradientes de velocidade compreendidos entre  $700 \text{ s}^{-1}$  e  $1100 \text{ s}^{-1}$ , em um tempo de mistura não superior a 5s;
- A dispersão de polieletrólitos, como coagulantes primários ou auxiliares de coagulação, deve ser feita obedecendo às recomendações do fabricante;

Conforme a NBR 12.216/92 (ABNT, 1982) constituem dispositivos de mistura: qualquer trecho ou seção de canal ou de canalização que produza perda de carga compatível com as condições desejadas, em termos de gradiente de velocidade e tempo de mistura; difusores que produzam jatos da solução de coagulante, aplicadas no interior da água a ser

tratada; agitadores mecanizados e entrada de bombas centrífugas.

### 3.1.2.3.2 Floculadores

Os floculadores são unidades utilizadas para promover a agregação de partículas formadas na mistura rápida. O período de detenção no tanque de floculação e os gradientes de velocidade a serem aplicados devem ser determinados por meio de ensaios realizados com água a ser tratada. Dependendo do porte da estação de tratamento, não sendo possível proceder aos ensaios destinados a determinar o período de detenção adequado, podem ser adotados valores entre 20 min e 30 min, para floculadores hidráulicos, e entre 30 min e 40 min, para os mecanizados. Não sendo realizados ensaios, deve ser previsto gradiente de velocidade máximo, no primeiro compartimento, de  $70 \text{ s}^{-1}$  e mínimo, no último, de  $10 \text{ s}^{-1}$ . A agitação da água pode ser promovida por meios mecânicos ou hidráulicos (ABNT NBR 12.216/92).

Segundo a NBR 12.216/92 a potência fornecida à água por agitadores mecânicos deve ser determinada pela eq. (3.1):

$$P = \mu \times G^2 \times C \quad \text{eq. (3.1)}$$

Onde:

P = potência, em W

$\mu$  = viscosidade dinâmica, em “Pa.s”

G = gradiente de velocidade, em  $\text{s}^{-1}$

C = volume útil do compartimento, em  $\text{m}^3$

O gradiente de velocidade em um compartimento do floculador hidráulico é dado pela eq. (3.2):

$$G = \sqrt{\frac{g \times h}{\nu \times t}} \quad \text{eq. (3.2)}$$

Onde:

G = gradiente de velocidade, em  $\text{s}^{-1}$

g = aceleração da gravidade, em  $\text{m/s}^2$

h = soma das perdas de carga na entrada e ao longo do compartimento, em m

$\nu$  = viscosidade cinemática, em  $\text{m}^2/\text{s}$

$t$  = período de detenção no compartimento, em s

Os flocladores hidráulicos são quaisquer dispositivos que utilizam energia hidráulica dissipada em forma de perda de carga no fluxo da água através de um tanque, canal ou tubulação. Dentre os principais flocladores hidráulicos podem ser citados os de chicanas (canal sinuoso onde a água é obrigada a passar ao redor de chicanas, dando giros sucessivos de 180° no sentido de fluxo), de ação de jato (canal com diversos compartimentos em série, interligados por orifícios submersos, estando entre estes os de fluxo helicoidal, do tipo “Cox” e do tipo “Alabama”) e em meio poroso (tanque, ou canal, contendo um meio granular). (Richter & Azevedo Netto, 1991).

Os flocladores mecânicos mais utilizados são os de movimento giratório com paletas paralelas ou perpendiculares ao eixo, podendo este ser horizontal ou vertical, sendo o vertical mais vantajoso por evitar cadeias de transmissão ou poços secos para a instalação de motores, aproveitando melhor a área disponível para instalação. Os flocladores giratórios são normalmente fornecidos com quatro braços fixados ao eixo (como uma cruz, “+”, estando o eixo no centro), com paletas paralelas a este, podendo seu número variar de uma ou mais por braço. Porém, demonstra-se por cálculo que o gradiente de velocidade é independente o número de paletas por braço, estando estas à mesma distância em relação ao eixo, apontando como única vantagem de um aumento deste a maior homogeneização proporcionada, algo como um floclador hidráulico com um número muito grande de câmaras, ou chicanas, porém com um maior consumo de energia, por exigir do motor uma maior potência. No entanto, observações e experiências práticas indicam que um floclador mais simples, dotado de uma única paleta por braço, permite um melhor controle do gradiente de velocidade (Richter & Azevedo Netto, 1991).

#### **3.1.2.4. Decantação**

A decantação é a terceira etapa do processo de clarificação, e primeira etapa posterior ao processo de coagulação/floculação, e se caracteriza por ser a fase de remoção dos flocos formados nas etapas anteriores, através de sua sedimentação, por ação da gravidade. As unidades que realizam a decantação são chamados tanques de decantação ou, simplesmente, decantadores (Lora, 2000).

Os primeiros decantadores foram tanques de fluxo horizontal. Suas principais

vantagens são: simplicidade, alta eficiência e baixa sensibilidade a condições de sobrecarga. Por esses motivos, sua utilização é ainda defendida (Di Bernardo, 2003).

O mais recente e forte concorrente é o chamado decantador tubular ou de alta taxa, o qual tem uma eficiência pelo menos igual aos primeiros, se resultante de um projeto hidráulico adequado. Entre o clássico decantador de fluxo horizontal e os modernos decantadores tubulares, encontram aplicação, notadamente no tratamento de água para a indústria, os decantadores de fluxo vertical, como os clarificadores de manta de lodos com ou sem recirculação, e uma série de sistemas patenteados semelhantes, originados dos “precipitadores” usados no processo de abrandamento da água com cal-soda (Di Bernardo, 2003).

O lodo removido de decantadores, ou originado por meio do processo de flotação, como será visto, deverá ser desaguado em sistemas de desidratação, antes de sua disposição final. Os sistemas mais comuns de desaguamento são:

- Leitões de secagem: disposição temporária (até a desidratação) em área superficial impermeabilizada;
- Filtro-prensa de esteira: equipamento utilizado para se fazer a desidratação do lodo por processamento contínuo, originando torta com concentração de massa seca variando entre 25 e 35%, dependendo de sua natureza, reduzindo consideravelmente o tempo de secagem, podendo a fase líquida retornar ao processo de coagulação/floculação do sistema de tratamento de água;
- Filtro-prensa de placas: equipamento ainda muito utilizado na desidratação de lodo, obtendo, também, torta com concentração de matéria seca variando entre 25 e 35%, porém com processamento descontínuo, por batelada, com tempo de filtração podendo chegar a quatro horas, além de ser necessário o uso de produtos auxiliares cal, cloreto férrico ou polieletrólito, dependendo do tipo de tratamento, sendo a fase líquida descartada;
- Lagoas de lodo: são tanques destinados a receber lodo para posterior desidratação.
- Landfarming: consiste em dispor o lodo ou torta no solo para degradação biológica na camada superior, desde que este não contenha substâncias que possam contaminar o solo e o lençol freático.

### **3.2 Usina de Reciclagem de Plástico**

A reciclagem é a ação de coletar, reprocessar, comercializar e utilizar materiais antes considerados como lixo. A reciclagem é definida como o “resultado de uma série de atividades através das quais materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são desviados, sendo coletados, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de bens, feitos anteriormente apenas com matéria-prima virgem”.

Segundo Forlin & Faria (2002), a reciclagem de embalagens plásticas preocupa a sociedade, mundialmente, face ao crescente volume de utilização e as implicações ambientais inerentes ao seu descarte não racional pós-consumo. A rentabilidade do mercado de reciclagem de embalagens plásticas (polímeros) no Brasil, como em outros países desenvolvidos, mostra aspectos atraentes para iniciativas empresariais do setor, com reflexos sócio-econômicos diretos relacionados com a melhoria da qualidade de vida da população, geração de renda, economia de recursos naturais e atenuação de problemas ambientais.

De modo geral, as indústrias que estão mais interessadas em reciclar seus resíduos poliméricos são dos segmentos de embalagens e automotivo (Spinacé & Paoli, 2005). Segundo Mano & Mendes (1999), os polímeros são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, sua estrutura química e interações intra e intermoleculares. Possuem unidades químicas que são unidas por ligações covalentes, que se repetem ao longo da cadeia. Eles podem ser naturais, como a seda, a celulose, as fibras de algodão, etc., ou sintéticos, como o polipropileno (PP), o politereftalato de etileno (PET), o polietileno (PE), o policloreto de vinila (PVC), etc.

Agnelli (1996) classifica os polímeros como termoplásticos (plásticos), termofixos, borrachas e fibras. O termo plástico vem do grego, *plastikus*, que significa material adequado à moldagem. Os plásticos são materiais que, embora sólidos à temperatura ambiente em seu estado final, quando aquecidos acima da temperatura de "amolecimento" tornam-se fluidos e passíveis de serem moldados por ação isolada ou conjunta de calor e pressão. Alguns exemplos de termoplásticos são o PP, o PE, o PET, o PVC e o poliestireno (PS). Os termoplásticos são moldáveis a quente e possuem baixa densidade, boa aparência, são isolantes térmico e elétrico, são resistentes ao impacto e possuem baixo custo, portanto, apresentam uma larga faixa de aplicações. Devido a estas propriedades o consumo dos polímeros vem crescendo no Brasil e no mundo.

Apesar da existência de uma grande variedade de termoplásticos, apenas cinco deles, ou seja, o PE, o PP, o PS, o PVC e o PET representam cerca de 90% do consumo nacional.

Dentre estes termoplásticos o PET apresenta um dos maiores índices de crescimento em consumo no País, acima de 2.200% na última década. No Brasil, em 2006, os principais termoplásticos foram utilizados em embalagens primárias (31%), descartáveis (22%), construção civil (14%), outros materiais (13%), produtos ao consumidor (6%), filmes (5%), eletrodomésticos (5%), fibras (3%) e setor automotivo (1%) (Wallis, 2006).

Segundo levantamentos feitos em grandes cidades brasileiras, os principais polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos são o polietileno de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD), o PET, o PVC e o PP. Outros tipos de polímeros encontrados correspondem a apenas 11% do total (Wallis, 2006).

Segundo Wallis (2006), o ciclo de reciclagem de plástico geralmente ocorre de acordo com as seguintes etapas:

- Separação, enfardamento e estocagem;
- Moagem;
- Lavagem e secagem;
- Aglutinação e leve aquecimento – pasta plástica;
- Resfriamento repentino (água) - aumento da densidade;
- Formação de grânulos,
- Transformação em tiras (spaghetti) de material derretido,
- Resfriamento (água) e solidificação das tiras,
- "pellets".

### **3.2.1 Efluente de Usina de Reciclagem de Plástico**

Rocha *et. al.* (2005) apontam que o impacto causado ao meio ambiente pela produção desenfreada de lixo tem levado governo e sociedade a promover estudos e buscar alternativas para minimizar a degradação da natureza e aumentar o bem estar da sociedade como um todo. Reduzir o desperdício é uma das formas de se contribuir para a preservação do meio ambiente, conservando as reservas naturais, sua flora e sua fauna.

Com isso, tornou-se necessário a busca por alternativas para a redução dos resíduos sólidos. Neste contexto, a reciclagem aparece como um instrumento importante no gerenciamento dos resíduos sólidos.

Porém, como todo processo industrial, a reciclagem gera resíduos sólidos e líquidos que devem ser tratados adequadamente. A caracterização do efluente é imprescindível para a

escolha do tratamento adequado, além de ser necessária para avaliar o grau de poluição do mesmo ao ser lançado indiscriminadamente no meio ambiente.

O efluente da reciclagem quando não tratado pode gerar uma poluição maior e mais rápida do que a disposição inadequada do resíduo sólido.

Segundo Santos & Souza (2000), os recursos hídricos tanto superficiais como subterrâneos, estão se tornando cada vez mais escassos, como consequência do aumento mundial da população e da intervenção do ser humano no ambiente. Nesse processo, têm sido afetados cada vez mais negativamente em sua qualidade, nas reservas disponíveis e na capacidade natural de autodepuração.

Torna-se fundamental que a reciclagem seja efetivada em todos os sentidos, tanto em relação aos resíduos desviados dos aterros, quanto aos resíduos gerados pelo próprio processo de reciclagem. Para isso, deve-se observar a qualidade dos resíduos industriais e, em seguida, buscar alternativas para tratá-los adequadamente.

Os plásticos filmes, por possuírem uma grande área superficial, são poluidores. Entre os poluentes, encontram-se restos de alimentos, gorduras, papel, etiquetas, grampos e sujeira em geral. A lavagem deste material gera um líquido com potencial poluidor elevado, que deve ser tratado e disposto de acordo com a legislação vigente.

Tendo em vista a implantação do reúso, devem ser considerados, entre outros, os aspectos sócio-econômicos, aspectos de saúde pública e aspectos ambientais, além de um rigoroso controle na qualidade físico-química e bacteriológica da água residuária utilizada (Leme, 1984).

Para a viabilidade do reúso é importante o entendimento desta ação como a adição de uma Política de Economia de Água. No caso da indústria, é fundamental a participação da alta direção, a qual deverá estar comprometida com a política de reúso, direcionando e apoiando a implantação das ações necessárias (FIESP, 2004).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Na usina de reciclagem de plástico o material recepcionado é triado e encaminhado para a lavagem para remoção de impurezas. A Figura 4.1 apresenta as principais etapas envolvidas no processo de reciclagem de plástico. A indústria produz mangueiras para irrigação, utilizando a mesma água no processo.

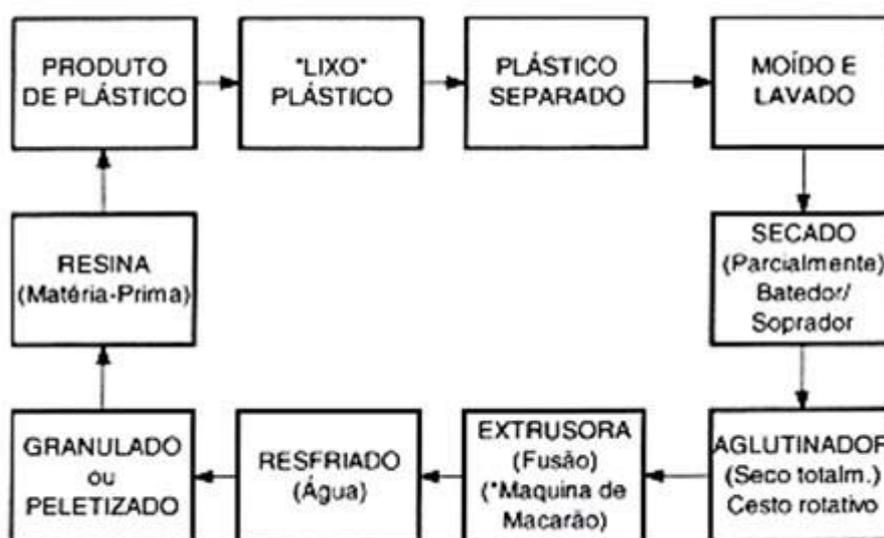


FIGURA 4.1 – Atividades relacionadas à reciclagem de plástico.  
Fonte: FIESP, 2004.

A água utilizada na lavagem é fornecida pela Concessionária de Água do município de Campo Grande-MS, consumindo de 2 a 3 litros de água por quilo (Kg) de plástico reciclado, sendo que em média são reciclados 300 Kg de plástico por dia, portanto são utilizados de 200 a 300 litros por dia e em torno de 90.000 litros ao mês, ou seja, 90 m<sup>3</sup>/mês.

A água entra no sistema para realizar a lavagem dos materiais plásticos sujos e contaminados, posteriormente segue por um conduto até o sistema de tratamento de efluente, composto de peneira estática, medidor de vazão do tipo calha Parshall, homogeneizador e tanque de decantação elevado com saída de lodo pelo fundo. Após ser utilizada, a água é conduzida para a peneira estática, pelo medidor de vazão do tipo Calha Parshall, onde recebe solução de CaO e sulfato de alumínio, passa pelo homogeneizador e segue para o tanque elevado. A água de lavagem tratada no tanque elevado por meio de coagulação/floculação é reutilizada na indústria, após receber tratamento, por aproximadamente cinco dias, antes de ser encaminhada para a rede coletora de esgotos.

A figura 4.2 apresenta a peneira estática na entrada do sistema de tratamento de efluente.



Figura 4.2 – Vista da peneira estática.

A Figura 4.3 apresenta o homogeneizador. O efluente após passar pela peneira estática segue para o homogeneizador, que além de homogeneizar o efluente também atua como equalizador de vazão na entrada do sistema.



Figura 4.3 – Vista do homogeneizador.

Na figura 4.4 pode ser visualizado o medidor de vazão do tipo Calha Parshall que registra a vazão que entra no tanque decantador elevado.



Figura 4.4 – Entrada do decantador – Medidor de Vazão do Tipo Calha Parshall.

Na calha Parshall adiciona-se CaO e sulfato de alumínio ao efluente para posteriormente ser encaminhado ao tanque de decantação elevado. O tanque decantador com saída de lodo pelo fundo é apresentado na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Vista do tanque decantador elevado.

As coletas foram realizadas, entre os meses de novembro e dezembro de 2007. As amostras foram coletadas em recipientes de 20L.

As amostras foram transportadas para o LAQUA – Laboratório Qualidade Ambiental do Departamento de Hidráulica e Transportes da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – DHT/UFMS, onde foram submetidas aos ensaios de teste de jarros.

#### **4.1 Dosagem de coagulante em função da alcalinidade da amostra**

Para o ensaio de Teste de Jarros é necessário observar o diagrama de concentração de coagulante em função do pH da amostra. A dosagem ótima de coagulante é realizada em função da alcalinidade do efluente. A alcalinidade é uma medida da capacidade que as águas têm de neutralizar ácidos. Esta capacidade é devida à presença de bases fortes, de bases fracas, de sais de ácidos fracos, tais como bicarbonatos, boratos, silicatos e fosfatos, de sais de ácidos orgânicos, tais como o ácido húmico e, no caso de águas poluídas, os ácidos acético, propiônico e sulfúrico. Em águas superficiais a alcalinidade pode ser devida presença de grande quantidade de algas; elas removem dióxido de carbono da água, elevando o pH da mesma para 9-10.

O conhecimento da alcalinidade é importante no controle dos processos de coagulação química de águas, esgotos e águas residuárias, no amolecimento de águas e no controle da corrosão. Ainda, alcalinidade elevada altera o sabor da água.

Os métodos usualmente empregados na determinação de alcalinidade são o titulométrico e o potenciométrico até pH pré-fixado, sendo que também pode ser estabelecido o pH final da titulação potenciométrica através de curva de titulação potenciométrica.

As concentrações dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico foram determinada estequiometricamente através das reações (3.1) e (3.5).

Os parâmetros analisados e os métodos utilizados estão apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.11. Todos os métodos estão descritos no Standart Methods, 21a. edição (2005). Através dos resultados, chegou-se a conclusão sobre a qualidade da água bruta e do efluente.

## 4.2 Teste de Jarros

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o ensaio de Teste de Jarros, com equipamento em escala de bancada, no LAQUA. O aparelho utilizado é elétrico, composto de 06 (seis) recipientes, denominados jarros, com cerca de três litros de capacidade volumétrica, de base quadrada de aresta com cerca de doze centímetros, confeccionados em acrílico, de modo a permitir a observação da formação do floco, e providos de pás rotativas para agitação mecânica, posicionadas no centro da base do jarro, com controle de rotação que varia de 0 a 100 RPM, além de suporte para tubos de ensaio com controle manual para adição simultânea de reagente (coagulante), denominado “conjunto distribuidor simultâneo de dosagens”, e iluminação artificial difusa sob a base transparente dos jarros, para facilitar a visualização da dinâmica do processo e formação dos flocos. A Figura 4.2 apresenta o aparelho utilizado no Teste de Jarros.

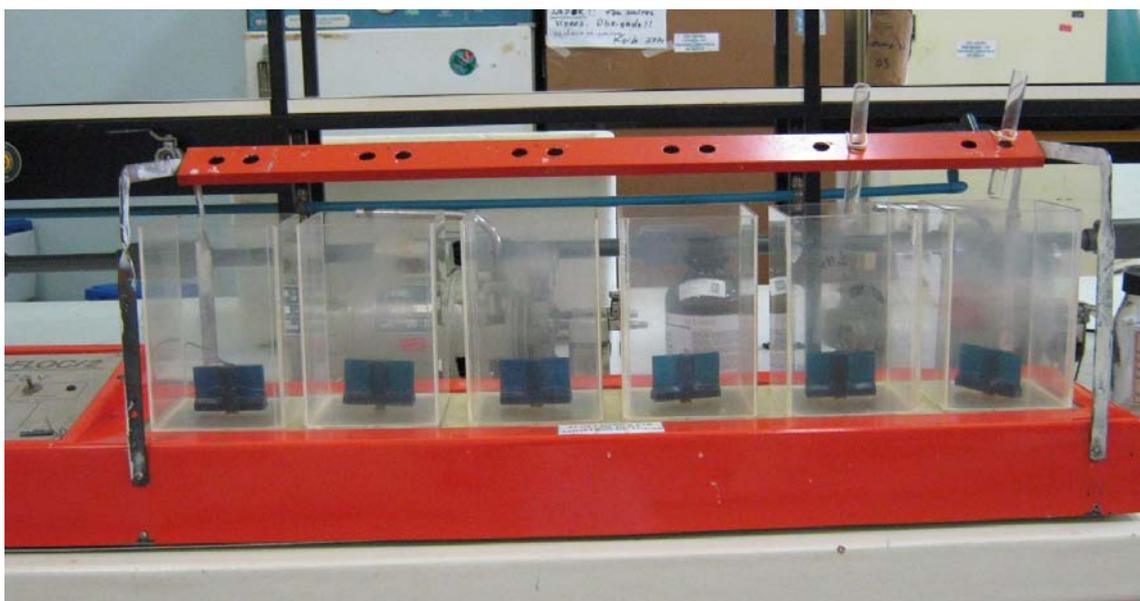


Figura 4.6 – Vista do aparelho utilizado para o Teste de Jarros.

O Teste de Jarros é um ensaio em escala de bancada, capaz de reproduzir as condições do processo de coagulação/floculação da estação de tratamento de água, em busca da condição operacional que resulte na melhor eficiência possível, considerando-se as características da água a ser tratada, envolvendo aplicação de reagentes, com controle dos parâmetros envolvidos no processo. O aparelho utilizado no teste é o “Turbo Floc”, tensão 220 V, como pode ser verificado na Figura 4.3.

O ensaio pode ser feito para a elaboração de projeto, ou adequação deste a uma nova situação de característica da água bruta, monitorando e ajustando o processo de tratamento e testando de eficiência de novos reagentes.

Depois de algum tempo desliga-se o equipamento, aguardando um tempo correspondente ao tempo de detenção na etapa de decantação. São observadas e anotadas, então, a natureza e as características de decantabilidade dos flocos, em termos qualitativos, ou seja, pobre, regular, boa ou excelente. Uma amostra nebulosa indica coagulação pobre, enquanto que a coagulação satisfatória contém flocos que são bem formados, com o líquido apresentando-se claro entre partículas. A menor dosagem que fornece boa remoção de turbidez durante o Teste de Jarros é considerada como a primeira dosagem experimental na operação da estação de tratamento.

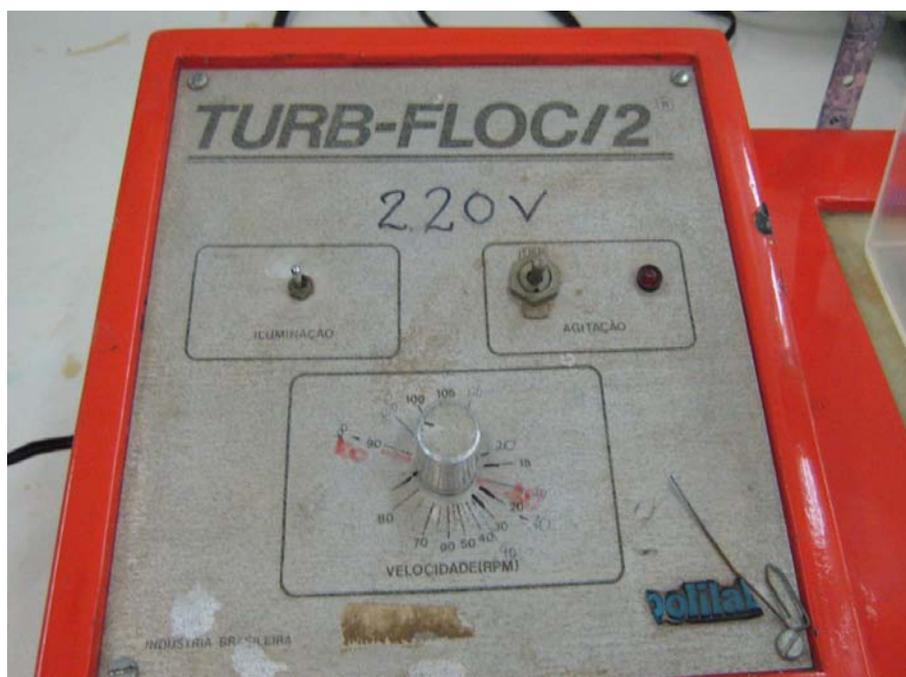


Figura 4.7 – Especificação do aparelho utilizado no teste.

Para pesquisas ou estudos especiais, os jarros usados no ensaio podem ser modificados para reproduzirem mais aproximadamente as unidades de mistura construídas nas estações de tratamento.

O efluente utilizado no experimento foi coletado imediatamente antes dos ensaios, na usina, que utiliza plásticos recicláveis para a confecção de tubos de PVC e mangueiras. A primeira medida adotada foi o ensaio do efluente bruto para determinação de pH, Cor, Turbidez e Alcalinidade Total originais da amostra coletada.

O pH foi determinado com Peagâmetro Digital de Bancada, a Cor por meio de Disco Comparativo de Cor, método de comparação visual, a Turbidez com Turbidímetro e a Alcalinidade Total por meio de titulação.

Foram realizados um total de 11 testes de tratabilidade, utilizando-se sulfato de alumínio,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  e cloreto férrico,  $\text{FeCl}_3$  como coagulantes, sem auxílio de polieletrólitos.

Aplicou-se agitação máxima, 100 RPM, aos jarros, adicionando, em seguida, o coagulante. Esta velocidade de rotação foi mantida por um período de um minuto. Depois disso, reduziu-se a rotação para 30 RPM, mantendo esta por um período de trinta minutos. Então, desligou-se o equipamento e aguardou-se quinze minutos para permitir a decantação dos flocos formados.

Após este período, verificou-se, visualmente, qual jarro apresentou melhor clarificação, onde o efluente se encontrava mais límpido.

Ao final, retirou-se uma alíquota da camada intermediária superior da amostra de cada frasco para proceder a novas determinações de Cor, Turbidez e Alcalinidade Total, para se avaliar qual a melhor concentração de coagulante a ser utilizada para o tratamento, tomando-se o cuidado de não promover qualquer agitação nesta, evitando, assim, que parte dos flocos sedimentados fosse colocada novamente em suspensão, o que causaria interferência no resultado analítico, deixando de ser representativo por mascarar o resultado real.

Todos os procedimentos analíticos adotados neste experimento são os padronizados pelo Standard Methods (APHA, 2005).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Tabelas 5.1 a 5.11, apresentam uma síntese dos resultados obtidos através da realização dos onze ensaios de Teste de Jarros, com as diversas amostras estudadas, considerando-se os parâmetros de controle (Cor, Turbidez e Alcalinidade Total) e a concentração de sulfato de alumínio utilizada nos jarros.

No primeiro teste, resumido pela Tabela 5.1, foram usadas concentrações comumente utilizadas em Estação de Tratamento de Água e foram obtidos resultados satisfatórios na remoção de cor e turbidez, alcançando-se taxas máximas de remoção de 60 e 54% respectivamente. O efluente não ficou bem clarificado, mostrando-se turvo, sem condições de reutilização no processo de lavagem de plásticos. Justifica-se pela concentração utilizada de sulfato de alumínio encontrar-se na faixa aplicada em Estações de Tratamento de Água convencionais.

TABELA 5.1 – Características da amostra bruta e resultados para o Teste 1.

Características da Amostra – 1º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
		6,30		250,00		1821,60		260,00
Resultados do 1º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00		
Cor (uC)	160,00	120,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
% remoção de cor	36,00	52,00	60,00	60,00	60,00	60,00		
Turbidez (UNT)	884,00	971,00	942,00	936,00	852,00	838,00		
% remoção de turbidez	51,47	46,70	48,29	48,62	53,23	54,00		

Após a utilização de cálculos estequiométricos a partir das reações químicas que ocorrem no processo de hidrólise do sal coagulante, foi possível estimar uma concentração adequada de coagulante para o tratamento. De acordo com a Tabela 5.2, foi possível obter 100% de remoção de cor e 99,9% na remoção de turbidez. O efluente após o teste mostrou-se bem clarificado, límpido, com condições satisfatórias para posterior reutilização na linha de produção da indústria.

TABELA 5.2 – Características da amostra bruta e resultados para o Teste 2.

Características da Amostra – 2º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
		6,50		150,00		1611,70		271,13
Resultados do 2º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	623,16	628,16	633,16	638,16	643,16	648,16		
Cor (uC)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
% remoção de cor	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Turbidez (UNT)	1,29	1,76	1,34	1,11	1,30	1,10		
% remoção de turbidez	99,92	99,89	99,92	99,93	99,92	99,94		

O efluente utilizado no terceiro teste possuía características diferentes do utilizado nos testes anteriores. Os valores de cor e turbidez eram aproximadamente 10 vezes menores. Mesmo assim, decidiu-se manter a concentração de coagulante utilizada no segundo teste, apenas para ratificar a eficiência em efluente novo.

Segundo a Tabela 5.3, a eficiência foi confirmada, com taxas de remoção de cor de 100% e de turbidez próximas de 99,9%.

TABELA 5.3 – Características da amostra bruta e resultados para o Teste 3.

Características da Amostra – 3º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
		7,06		15,00		178,00		335,11
Resultados para o 3º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	623,16	628,16	633,16	638,16	643,16	648,16		
Cor (uC)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
% remoção de cor	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Turbidez (UNT)	1,11	0,97	1,04	0,97	1,00	1,68		
% remoção de turbidez	99,38	99,46	99,41	99,46	99,44	99,05		

Como a concentração de sulfato de alumínio utilizada no teste anterior foi mais que o suficiente para a clarificação do efluente, decidiu-se diminuir pela metade a concentração do teste anterior. Os resultados para essa tomada de decisão foram satisfatórios, pois se conseguiu remoção de 100% na cor e aproximadamente 99% na turbidez, mostrados na

Tabela 5.4.

TABELA 5.4 – Características da amostra bruta e resultados para o Teste 4.

Características da Amostra – 4º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
	7,06		15,00		190,00		325,35	
Resultados do 4º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	311,58	314,08	316,58	319,08	321,58	324,08		
Cor (uC)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
% remoção de cor	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Turbidez (UNT)	2,98	2,93	2,94	2,39	2,68	2,50		
% remoção de turbidez	98,43	98,46	98,45	98,74	98,59	98,68		

Portanto, foi determinada a concentração ótima da solução de sulfato de alumínio para clarificação do efluente, na faixa de 311,58 a 324,08 mg.L<sup>-1</sup>, nessas condições iniciais: pH = 7,06; cor = 15 uC; turbidez = 190 UNT e alcalinidade em torno de 325 mg.L<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>.

Como o cloreto férrico também é bastante utilizado no tratamento de água e de efluentes, resolveu-se testar esse sal para determinação de sua concentração ótima. Foi utilizada concentração de cloreto férrico próxima à do segundo teste, obtida pelo cálculo estequiométrico. Na Tabela 5.5, é possível visualizar que essas concentrações de cloreto férrico foram ótimas para o tratamento do efluente. As taxas de remoção de cor chegaram a 100% e as de turbidez em torno de 98%.

TABELA 5.5 – Características da amostra bruta e resultados para o Teste 5.

Características da Amostra – 5º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
	7,28		20,00		233,50		350,04	
Resultados do 5º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[FeCl <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	600,00	605,00	610,00	615,00	620,00	625,00		
Cor (uC)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
% remoção de cor	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Turbidez (UNT)	3,97	4,49	2,62	3,12	2,52	2,14		
% remoção de turbidez	98,30	98,08	98,88	98,66	98,92	99,08		

O efluente do Teste 6 possuía pH um pouco maior que os anteriores. Essa diferença,

apesar de pequena, foi suficiente para que a concentração de sulfato de alumínio aumentasse quase quatro vezes mais. A explicação para esse fato pode ser dada através do diagrama de Amirtharajah e Mills. Segundo o diagrama, as concentrações de sulfato de alumínio crescem extraordinariamente com pequena variação de pH, visto que a escala de concentrações é logarítmica.

Os testes 6 e 7, resumidos nas Tabelas 5.6 e 5.7 respectivamente, foram bem parecidos nas taxas de remoção.

TABELA 5.6 – Características da amostra bruta e resultados para o Teste 6.

Características da Amostra – 6º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
	9,26		70,00		716,40		1106,19	
Resultados do 6º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	2.460,00	2.465,00	2.470,00	2.475,00	2.480,00	2.485,00		
Cor (uC)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00		
% remoção de cor	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86		
Turbidez (UNT)	23,20	20,10	20,80	20,40	19,30	19,90		
% remoção de turbidez	96,76	97,19	97,10	97,15	97,30	97,22		

Como o pH do efluente do teste 7 encontrava-se com um valor um pouco menor que do teste 6, experimentou-se diminuir de maneira moderada, a concentração de coagulante. Porém, os resultados continuaram bem próximos.

TABELA 5.7 – Características da amostra bruta e resultados para o Teste 7.

Características da Amostra – 7º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
	8,54		70,00		716,40		1007,42	
Resultados do 7º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	2.241,00	2.246,00	2.251,00	2.256,00	2.261,00	2.266,00		
Cor (uC)	5	5	5	5	5	5		
% remoção de cor	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86		
Turbidez (UNT)	21,23	20,10	21,50	19,96	20,60	19,70		
% remoção de turbidez	97,04	97,19	97,00	97,21	97,12	97,25		

No Teste 8 foram utilizadas as maiores concentrações de coagulante, pois os valores de cor e turbidez do efluente foram os mais elevados. A concentração ótima de cloreto férrico, para o tratamento satisfatório dessa amostra de efluente, ficou na faixa de 2.812 a 2.837 mg.L<sup>-1</sup>, apresentada na Tabela 5.8.

TABELA 5.8 – Características da amostra e resultados para o Teste 8.

Características da Amostra – 8º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
	7,65		150		2150		1556,92	
Resultados para o 8º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[FeCl <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	2812	2815	2822	2827	2832	2837		
Cor (uC)	20	10	5	5	5	5		
% remoção de cor	86,67	93,33	96,67	96,67	96,67	96,67		
Turbidez (UNT)	13,23	6,41	8,94	6,99	6,51	20,03		
% remoção de turbidez	99,15	99,59	99,42	99,55	99,58	98,71		

A Tabela 5.9 mostra as características da amostra do teste 9, encontrava-se com um valor um pouco menor que do teste 6, experimentou-se diminuir de maneira moderada, a concentração de coagulante. Os resultados mostraram uma eficiência menor que a do Teste 6.

TABELA 5.9 – Características da amostra bruta e resultados para o Teste 9.

Características da Amostra – 9º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
	7,58		70,00		670,70		1.238,6	
Resultados do 9º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	2.754,00	2.759,00	2.764,00	2.769,00	2.774,00	2.779,00		
Cor (uC)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00		
% remoção de cor	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86		
Turbidez (UNT)	24,60	24,80	28,40	27,87	27,14	22,90		
% remoção de turbidez	96,33	96,30	95,76	95,84	95,84	96,58		

O Teste 9 apresentou resultado muito próximos ao do Teste 8 em relação a % de remoção de cor e % de remoção de turbidez.

TABELA 5.10 – Características da amostra bruta e resultados para o Teste 10.

Características da Amostra – 10º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
	6,94		70,00		670,70		1.431,00	
Resultados do 10º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	3.181,00	3.186,00	3.191,00	3.196,00	3.201,00	3.206,00		
Cor (uC)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00		
% remoção de cor	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86		
Turbidez (UNT)	17,70	17,37	17,63	18,27	17,20	17,97		
% remoção de turbidez	97,36	97,41	97,37	97,28	97,44	97,32		

As características das amostras utilizadas nos Teste 10 e 11 são muito próximas, no entanto procurou-se variar a concentração de coagulante para verificar a eficiência do tratamento. No entanto, os resultados apresentados possuem eficiência de remoção de cor e turbidez muito próximas.

TABELA 5.11 – Características da amostra bruta e resultados do Teste 11.

Características da Amostra – 11º teste	pH		Cor (uC)		Turbidez (UNT)		Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	
	6,94		70,00		670,70		1.431,00	
Resultados do 11º teste								
Nº Jarro	1	2	3	4	5	6		
[FeCl <sub>3</sub> ] aplicada em mg.L <sup>-1</sup>	2.585,00	2.590,00	2.595,00	2.600,00	2.605,00	2.610,00		
Cor (uC)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00		
% remoção de cor	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86	92,86		
Turbidez (UNT)	13,63	13,83	14,70	14,20	12,67	12,73		
% remoção de turbidez	97,97	97,94	97,81	97,88	98,11	98,10		

As águas de lavagem de reciclagem de plástico são reutilizadas por cerca de cinco dias, dependendo das condições de lavagem, e devido ao efluente ser bombeado até um tanque elevado, e receber coagulante sulfato de alumínio e cal, a alcalinidade do efluente aumentou ao longo dos dias.

As características das amostras de efluentes sofreram uma grande variação, dificultando na determinação das concentrações de coagulante. Como os parâmetros de controle das amostras (cor, turbidez e alcalinidade total) variaram consideravelmente, obteve-se não apenas uma, mas várias faixas de concentrações ótimas para os coagulantes.

As variações nas características dos efluentes industriais estão diretamente ligadas ao processo produtivo. Sua qualidade é função da quantidade de sujeira nos plásticos e também da quantidade que a água de lavagem foi repassada no processo.

Para que essa proposta de tratamento saia da escala de bancada, e atinja a escala real da indústria, são necessários estudos mais aprofundados nas características do efluente, regime de trabalho, processo produtivo, etc. No entanto, o trabalho realizado mostrou claramente a eficiência do processo de coagulação/floculação/decantação como tratamento físico-químico para o efluente em questão, originário da lavagem de plásticos recicláveis.

Analisando os dados de entrada e saída do efluente, como por exemplo, remoção inicial de 100% cor e 99 % de turbidez, que foram os parâmetros mais analisados e comparados pode certamente que sua redução em termos de eficiência chegando a 98%.

A Figura 5.1 mostra o ensaio de bancada Teste de Jarros, durante o processo de coagulação e floculação.

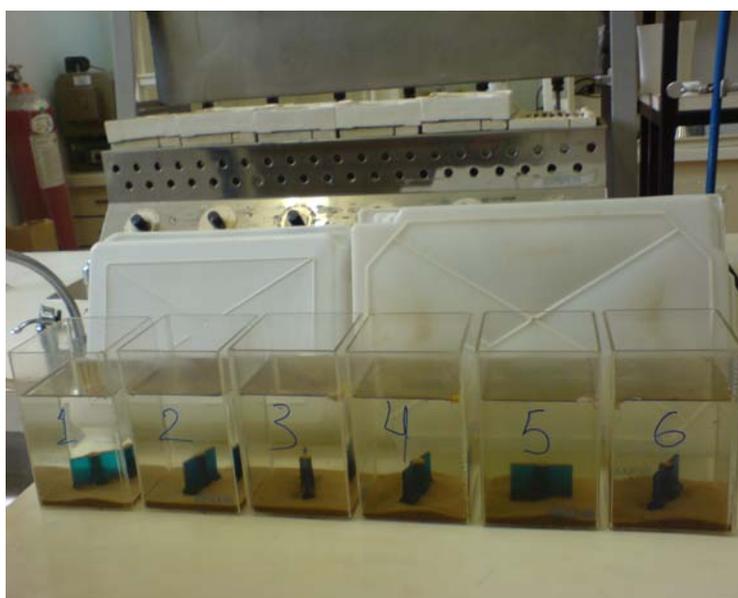


FIGURA 5.1. Ensaio de bancada do Teste de Jarros.

A Figura 5.2 apresenta o efluente clarificado após o tempo de mistura e decantação, observa-se a formação de precipitado, esses resíduos são resultados da coagulação / floculação.



FIGURA 5.2. Efluente clarificado após o Ensaio Coagulação – Flocculação pelo Teste de Jarros.

A Tabela 5.12 apresenta valores médios amostrados de pH, dosagem de coagulante  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , porcentagem de remoção de cor e turbidez obtidos através dos testes de Jarros de coagulação / flocculação. De posse dessas informações foi elaborado o gráfico apresentado na FIGURAS 5.3, onde foi elaborado um diagrama de Coagulação / Flocculação a fim de identificar a melhor faixa de pH para a dosagem de coagulante calculada estequiometricamente a partir da alcalinidade da amostra.

TABELA 5.12. Valores médios de pH, dosagem de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , % remoção de cor e turbidez apresentados nos testes de coagulação/flocculação.

Teste	pH	$[\text{Al}_2\text{SO}_4]$ mg.L <sup>-1</sup> (média)	% remoção de cor (média)	% remoção de turbidez (média)
1	6,3	17,5	54,5	50,3
2	6,5	635,6	100	99,9
3	7,06	635,6	100	99,3
4	7,06	318,8	100	98,5
6	9,26	2472,5	93,8	97,1
7	8,54	2253,5	92,8	97,1
8	7,65	2824,1	96,1	99,3
9	7,58	2766,5	92,8	96,1
10	6,94	3193,5	92,8	97,3
11	6,94	2597,5	92,8	97,9

O Teste 1 apresentou valores médios de % de remoção de cor e de turbidez distantes dos demais testes apresentados, pois para o ensaio de teste de jarros adotou-se a concentração de sulfato de alumínio comumente utilizada em estações de tratamento de água convencionais.

A alcalinidade possui uma relação direta com a concentração de sulfato de alumínio verificada pela equação. Observando o Diagrama de Coagulação/Floculação apresentado na Figura 5.3 verifica-se que para os ensaios realizados, o pH da amostra estando entre 6 a 8, a concentração de coagulante calculada teve uma variação elevada, no entanto, para os valores de coagulantes muito diferentes a remoção de cor e turbidez mostrou-se eficiente para estes valores de pH.

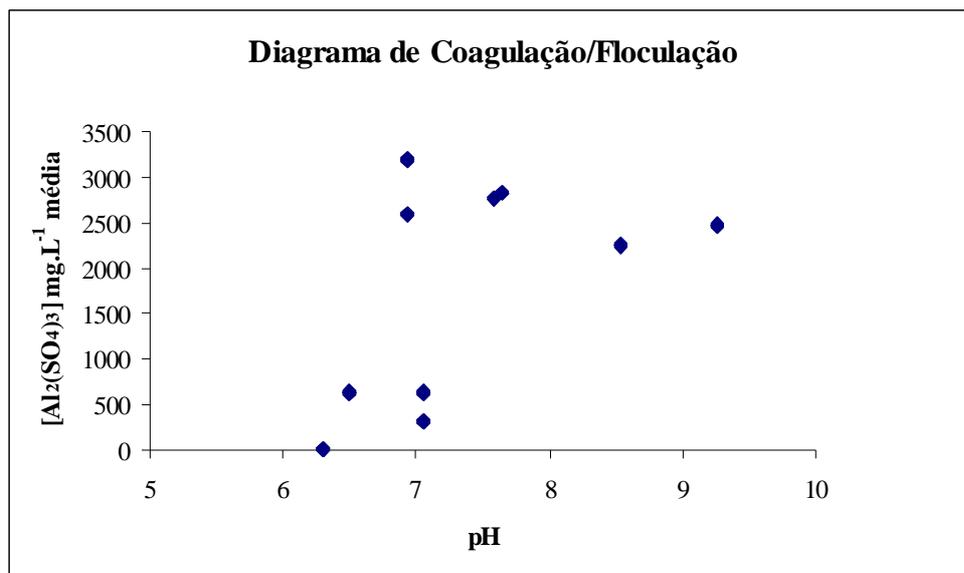


FIGURA 5.3. Diagrama de Coagulação-Floculação.

Observa-se no gráfico apresentado na Figura 5.4 que a porcentagem de remoção de cor e de turbidez ficaram em torno de 90 a 100%. Com exceção aos pontos isolados de na ordem de 50-60%, essa baixa eficiência de remoção é justificada pela dosagem de coagulante utilizada tomando como referência concentrações utilizadas em Estações de Tratamento de Água convencionais. O sucesso de remoção de cor e turbidez obtidos nos Testes de Jarros foi devido à concentração calculada a partir da alcalinidade das amostras de água de lavagem.

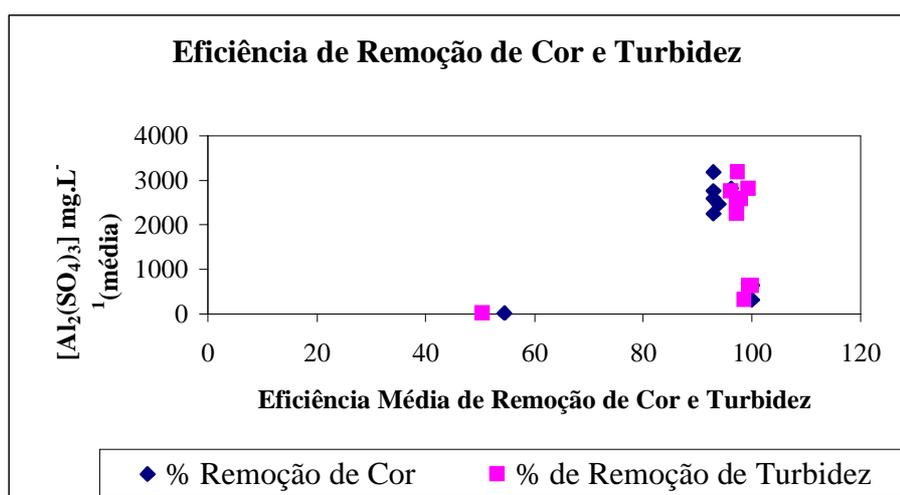


FIGURA 5.4. Eficiência de Remoção de Cor e Turbidez.

Observou-se que as melhores eficiências foram obtidas através das concentrações calculadas estequiometricamente. O diagrama de Amirtharajah & Mills mostra que a região ótima de coagulação encontra-se na faixa de pH de 6 a 8, o mesmo ocorre nos gráficos das Figuras 5.3 e 5.4, onde verifica-se que a faixa de pH de 6 a 8 apresentou os melhores resultados. Valores de pH acima de 8 mostra alcalinidade total elevada e maior concentração de coagulante.

Na Tabela 5.13 são apresentados dados de pH,  $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$   $\text{mg.L}^{-1}$ , % remoção de cor e % remoção de turbidez cada para teste.

TABELA 5.13. Dados de pH,  $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$   $\text{mg.L}^{-1}$ , % remoção de cor e % remoção de turbidez, para os respectivos testes.

Teste	pH	$[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ $\text{mg.L}^{-1}$	% remoção de cor	% remoção de turbidez
01	6,30	5,00	51,47	6,50
	6,30	10,00	46,70	6,50
	6,30	15,00	48,29	6,50
	6,30	20,00	48,62	6,50
	6,30	25,00	53,23	6,50
	6,30	30,00	54,00	6,50
02	6,5	623,16	100,00	99,92
	6,5	628,16	100,00	99,89
	6,5	633,16	100,00	99,92
	6,5	638,16	100,00	99,93
	6,5	643,16	100,00	99,92
	6,5	648,13	100,00	99,94
03	7,06	632,16	100,00	99,38
	7,06	628,16	100,00	99,46
	7,06	633,16	100,00	99,41
	7,06	638,16	100,00	99,46
	7,06	643,16	100,00	99,44
	7,06	648,13	100,00	99,05
04	7,06	311,58	100,00	98,43
	7,06	314,08	100,00	98,46
	7,06	316,58	100,00	98,45
	7,06	319,08	100,00	98,74
	7,06	321,58	100,00	98,59
	7,06	324,08	100,00	98,68

05	7,28	600,00	100,00	98,30
	7,28	605,00	100,00	98,08
	7,28	610,00	100,00	98,88
	7,28	615,00	100,00	98,66
	7,28	620,00	100,00	98,62
	7,28	625,00	100,00	99,08
06	9,26	2.460,00	98,86	96,76
	9,26	2.465,00	92,86	97,19
	9,26	2.470,00	92,86	97,10
	9,26	2.475,00	92,86	97,15
	9,26	2.480,00	92,83	97,30
	9,26	2.485,00	92,86	97,22
07	8,54	2.241,00	92,86	97,04
	8,54	2.246,00	92,86	97,19
	8,54	2.251,00	92,86	97,00
	8,54	2.256,00	92,86	97,21
	8,54	2.261,00	92,86	97,12
	8,54	2.266,00	92,86	97,25
08	7,65	2.812,00	96,67	99,15
	7,65	2.815,00	93,33	99,59
	7,65	2.822,00	96,67	99,42
	7,65	2.827,00	96,67	99,55
	7,65	2.832,00	96,67	99,58
	7,65	2.837,00	96,67	98,71
09	7,58	2.754,00	92,86	96,33
	7,58	2.759,00	92,86	96,30
	7,58	2.764,00	92,86	95,76
	7,58	2.769,00	92,86	95,84
	7,58	2.774,00	92,86	95,84
	7,58	2.779,00	92,86	96,58
10	6,94	3.181,00	92,86	97,36
	6,94	3.186,00	92,86	97,41
	6,94	3.191,00	92,86	97,37
	6,94	3.201,00	92,86	97,28
	6,94	3.206,00	92,86	97,44
	6,94	3.211,00	92,86	97,32
11	6,94	2.585,00	92,86	97,97
	6,94	2.590,00	92,86	97,94
	6,94	2.595,00	92,86	97,81
	6,94	2.600,00	92,86	97,88
	6,94	2.605,00	92,86	98,11
	6,94	2.610,00	92,86	98,10

Os dados apresentados na Tabela 5.13 foram utilizados para verificar a correlação entre as variáveis pH e dosagem de coagulante, dosagem de coagulante e % de remoção de cor, dosagem de coagulante e % remoção de turbidez. O método estatístico utilizado na investigação da correlação entre as variáveis foi o Coeficiente de Correlação Linear ( $r_{xy}$ ).

Para verificar a correlação entre as variáveis foi utilizado o método estatístico de Pearson conhecido como Coeficiente de Correlação Linear. A equação utilizada no cálculo estatístico é a seguinte:

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i x_y}{n S_x S_y} \quad (5.1)$$

Onde:

$r_{xy}$  = coeficiente de correlação linear

$x_i$  e  $x_y$  = variável

$n$  = numero de amostras

$S_x$  e  $S_y$  = Desvio padrão

Para o cálculo do Desvio Padrão (S) é utilizada a seguinte equação:

$$S = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \quad (5.2)$$

Onde:

$x_i$  = variável

$n$  = numero de amostras

$S$  = Desvio padrão

O Coeficiente e o tipo de Correlação Linear são apresentados na Tabela 5.14, a Correlação Linear ( $r_{xy}$ ) varia de -1 a +1, sendo uma constante adimensional. Quanto mais próximo ao índice 1, a relação entre as variáveis é mais próxima da regressão linear simples.

TABELA 5.14 – Correlação Linear

Coeficiente	Tipo de Correlação
- 1,00	Correlação negativa <b>perfeita</b>
- 0,75	Correlação negativa <b>forte</b>
- 0,50	Correlação negativa <b>media</b>
- 0,25	Correlação negativa <b>fraca</b>
0,00	Correlação linear <b>inexistente</b>
0,25	Correlação positiva <b>fraca</b>
0,50	Correlação positiva <b>media</b>
0,75	Correlação positiva <b>forte</b>
1,00	Correlação positiva <b>perfeita</b>

Fonte: Costa Neto (1977).

Analisando os resultados estatisticamente pelo método de regressão linear, pode-se observar as seguintes correlações entre as variáveis:

- Correlação entre Dosagem de Coagulante em  $\text{mg.L}^{-1}$  e pH
- Calculando o desvio padrão de cada variável,

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \text{ e } S_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}}$$

Desvio padrão dos dados amostrais da dosagem de coagulante,

$$S_x = \sqrt{\frac{3.633,6654}{66}}, \text{ logo } S_x = 7,4199$$

$$S_y = \sqrt{\frac{2,7\text{E} + 08}{66}}, \text{ logo } S_y = 2023,7623$$

- Calculando o coeficiente de correlação linear  $r_{xy}$ ,

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i x_y}{n S_x S_y}, \sum x_i x_y = 842024,0196, n = 66, S_x = 7,4199 \text{ e } S_y = 2023,7623$$

$$r_{xy} = \frac{842024,0196}{66 \times 7,4199 \times 2023,7623}, \text{ logo } r_{xy} = 0,8496$$

Pode-se concluir que a correlação linear simples é forte. Analisando a Figura 5.5 que apresenta o gráfico da correlação entre dosagem de coagulante em  $\text{mg.L}^{-1}$ .

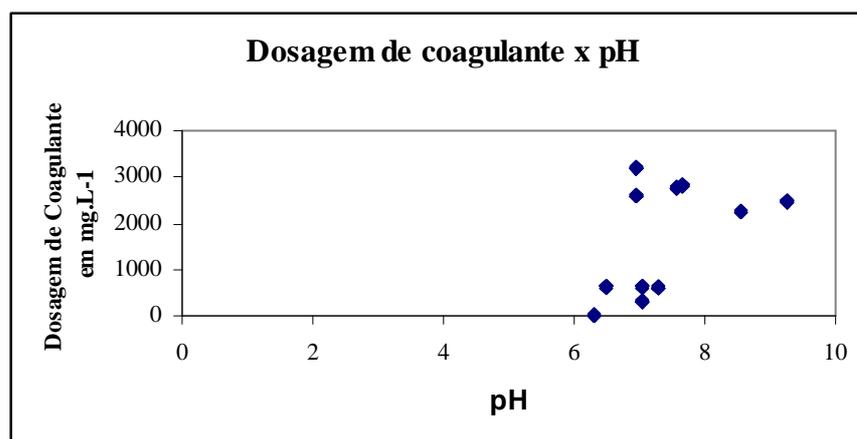


FIGURA 5.5 – Gráfico da correlação entre dosagem de coagulante em  $\text{mg.L}^{-1}$  e pH da solução.

- Correlação entre pH e % Remoção de Cor
- Calculando o desvio padrão de cada variável,

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \text{ e } S_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}}$$

Desvio padrão dos dados amostrais da dosagem de coagulante,

$$S_x = \sqrt{\frac{3.633,6654}{66}}, \text{ logo } S_x = 7,4199$$

$$S_y = \sqrt{\frac{570691,9000}{66}}, \text{ logo } S_y = 92,9884$$

- Calculando o coeficiente de correlação linear  $r_{xy}$ ,

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i x_y}{n S_x S_y}, \sum x_i x_y = 45015,6036, n = 66, S_x = 7,4199 \text{ e } S_y = 92,9884$$

$$r_{xy} = \frac{45015,6036}{66 \times 7,4199 \times 92,9884}, \text{ logo } r_{xy} = 0,9885$$

Pode-se concluir que a correlação linear simples é forte. Analisando a Figura 5.6 que apresenta o gráfico da correlação entre dosagem de coagulante em  $\text{mg.L}^{-1}$ .

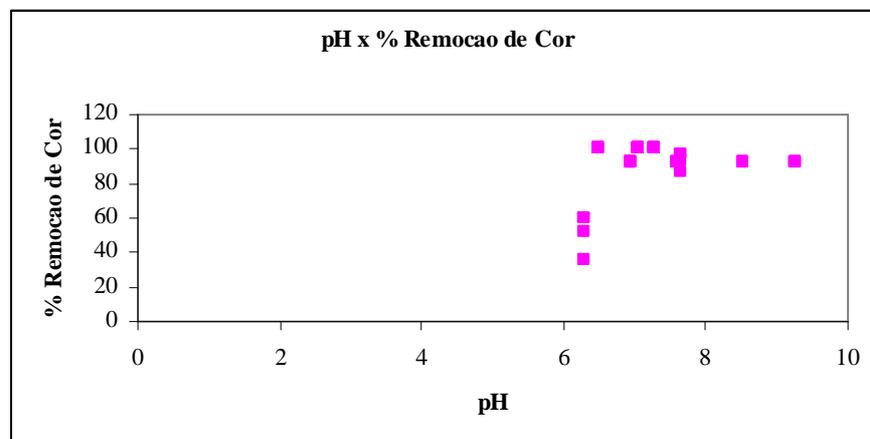


FIGURA 5.6 – Gráfico da correlação entre pH da solução e % de remoção de cor.

- Correlação entre pH e % Remoção de Turbidez

- Calculando o desvio padrão de cada variável,

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \text{ e } S_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}}$$

Desvio padrão dos dados amostrais da dosagem de coagulante,

$$S_x = \sqrt{\frac{3.633,6654}{66}}, \text{ logo } S_x = 7,4199$$

$$S_y = \sqrt{\frac{593335,3420}{66}}, \text{ logo } S_y = 94,8152$$

- Calculando o coeficiente de correlação linear  $r_{xy}$ ,

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i x_y}{n S_x S_y}, \sum x_i x_y = 45929,73, n = 66, S_x = 7,4199 \text{ e } S_y = 94,8152$$

$$r_{xy} = \frac{45929,7300}{66 \times 7,4199 \times 94,8152}, \text{ logo } r_{xy} = 0,9892$$

Pode-se concluir que a correlação linear simples é fraca. Analisando a Figura 5.7 que apresenta o gráfico da correlação entre pH e % remoção de turbidez, não há correlação entre as variáveis.

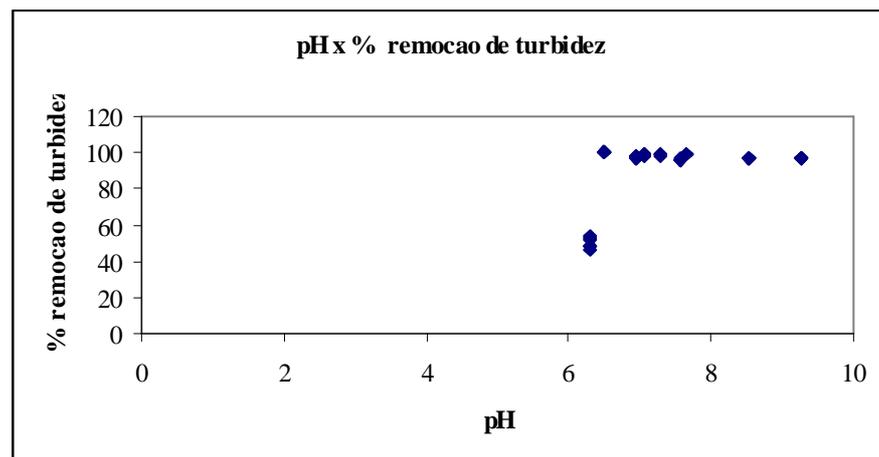


FIGURA 5.7 – Gráfico da correlação entre pH da solução e % de remoção da turbidez.

- Correlação entre Dosagem de coagulante e % de remoção de cor

- Calculando o desvio padrão de cada variável,

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \text{ e } S_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}}$$

Desvio padrão dos dados amostrais da dosagem de coagulante,

$$S_x = \sqrt{\frac{2,7E+08}{66}}, \text{ logo } S_x = 2023,7623$$

$$S_y = \sqrt{\frac{570691,9000}{66}}, \text{ logo } S_y = 92,9884$$

- Calculando o coeficiente de correlação linear  $r_{xy}$ ,

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i x_y}{n S_x S_y}, \text{ } \sum x_i x_y = 10328669,91, n = 66, S_x = 2023,7623 \text{ e } S_y = 92,9884$$

$$r_{xy} = \frac{10328669,9100}{66 \times 2023,7623 \times 92,9884}, \text{ logo } r_{xy} = 0,8315$$

Pode-se concluir que a correlação linear simples é forte. Analisando a Figura 5.8 que apresenta o gráfico da correlação entre pH e % remoção de turbidez, há correlação entre as variáveis, pois tende a uma função linear.

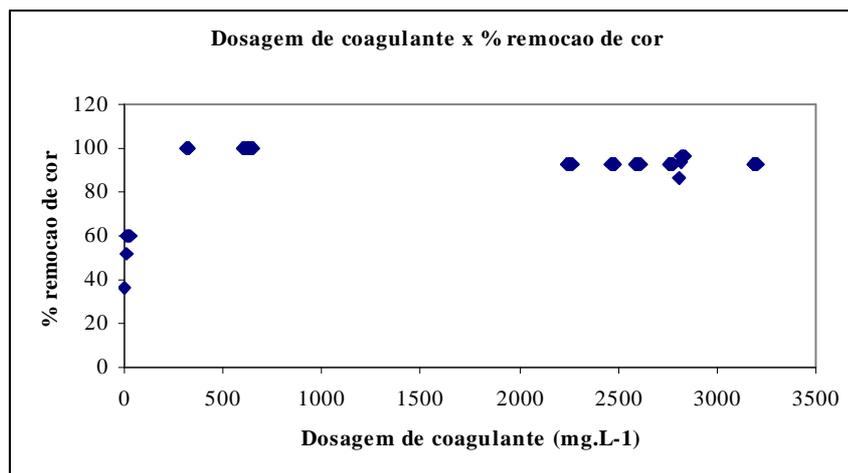


FIGURA 5.8 – Gráfico da correlação entre dosagem de coagulante e % de remoção de cor.

- Correlação entre Dosagem de coagulante e % de remoção de turbidez
- Calculando o desvio padrão de cada variável,

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \text{ e } S_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}}$$

Desvio padrão dos dados amostrais da dosagem de coagulante,

$$S_x = \sqrt{\frac{2,7E+08}{66}}, \text{ logo } S_x = 2023,7623$$

$$S_y = \sqrt{\frac{593335,3420}{66}}, \text{ logo } S_y = 94,8152$$

- Calculando o coeficiente de correlação linear  $r_{xy}$ ,

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i x_y}{n S_x S_y}, \sum x_i x_y = 10740829,69, n = 66, S_x = 2023,7623 \text{ e } S_y = 94,8152$$

$$r_{xy} = \frac{10740829,69}{66 \times 2023,7623 \times 94,8152}, \text{ logo } r_{xy} = 0,8481$$

Pode-se concluir que a correlação linear simples é fraca. Analisando a Figura 5.9 que apresenta o gráfico da correlação entre pH e % remoção de turbidez, não há correlação entre as variáveis.

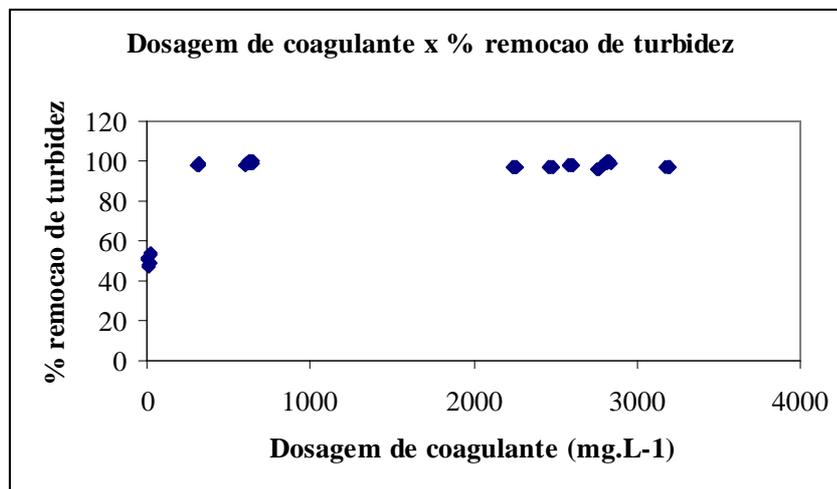


FIGURA 5.9 – Gráfico da correlação entre dosagem de coagulante e % de remoção de turbidez.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para o tratamento físico-químico do efluente de reciclagem de plástico verificou-se que foram obtidas várias condições ótimas de coagulante e pH para o processo de coagulação-floculação. Em vários casos ocorreu a remoção de mais de 90% de cor e de turbidez do efluente.

A água de lavagem de indústrias se sofrerem o tratamento adequado poderão recircular a água, a fim de proporcionar vantagens econômicas e ambientais. Tanto o reuso quanto a reutilização são procedimentos ditos ecologicamente corretos, na medida em que há redução de água doce e potável em ritmo acelerado.

Em decorrência dos dados obtidos nesta pesquisa, considera-se viável a reutilização das águas provenientes de usinas de reciclagem de plásticos, com baixos índices de cor e turbidez. Neste caso, recomenda-se o tratamento físico-químico de coagulação – floculação por batelada, não impedindo que a água retorne ao processo.

Conclui-se também, que não há condições de reutilização por tempo indeterminado para efluentes com esta característica, faz com que haja a necessidade de reposição diária, semana ou mensal, dependendo da utilização e/ou vazão do processo.

Sendo assim, propõe-se a contínua avaliação dos itens avaliados para constatar-se a qualidade dos efluentes após tratamento ao longo do tempo.

A água considerada proveniente do descarte, apesar de não ser de boa qualidade para o processo em questão, poderá ser reusada em outras funções: lavagem de calçadas, equipamentos, descarga sanitária.

Tendo em vista a influência das características da água ou efluente a ser tratado na dosagem de coagulante a ser aplicada, podem ser conduzidos estudos adicionais para a determinação da aplicação ótima de produtos auxiliares de coagulação/floculação, em conjunto com o coagulante primário.

A análise estatística utilizando o método de Pearson, para verificar se há correlação linear entre as variáveis, mostrou que as variáveis pH e dosagem de coagulante possuem correlação linear forte em relação a % de remoção de cor e turbidez, assim como também foi avaliada a eficiência de clarificação do efluente através da correlação linear entre pH e dosagem de coagulante em  $\text{mg.L}^{-1}$ .

Como resultado, o coeficiente de correlação linear entre as variáveis dosagem de coagulante em  $\text{mg.L}^{-1}$  e pH, pH e % de remoção de cor, pH e % de remoção de turbidez,

dosagem de coagulante e % de remoção de cor, dosagem de coagulante e % de remoção de turbidez, foi de  $r_{xy}=0,8496$ ,  $r_{xy} = 0,9885$ ,  $r_{xy} = 0,9892$ ,  $r_{xy} = 0,8315$  e  $r_{xy} = 0,8481$  respectivamente, indicando uma correlação linear forte entre as variáveis. Com isso, pode-se concluir que o pH e a dosagem de coagulante estão fortemente correlacionados com % de remoção de cor e turbidez.

Este trabalho limitou-se ao tratamento dos efluentes líquidos, não considerando os resíduos sólidos gerados no processo de tratamento dos efluentes de reciclagem de plástico. Sendo uma sugestão, a continuidade deste com o tratamento dos resíduos sólidos, como o lodo proveniente do tanque decantador elevado que necessita de uma destinação ambientalmente adequada.

Como uma forma de avaliar não somente a eficiência na clarificação do efluente, recomenda-se incluir o parâmetro de Demanda Química de Oxigênio (DQO) para avaliar a eficiência da remoção de poluentes presentes no efluente da usina de reciclagem de plástico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGNELLI, J. A. M; **Polímeros: Ciência & Tecnologia**, v. 4, n. 9, 1996.

AMIRTHARAJAH, A. Y MILLS, K. M. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. **Journal of the American Water Works Association**. Vol. 74, abril, 1982, pp. 210-216.

AMOO, I.A; AMUDA, O.S.; Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**, 141 (2007) 778–783.

APHA, AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st edition, Washington, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.

AZEVEDO NETO, J.R., POVINELI, J., PARLTORRE, A.C., HESPANOL, I., ROSSIN, A.C., YAGUINUMA,S. **Técnica de abastecimento e tratamento de água**. São Paulo, CETESB, v.2, 951p., 1976.

AZIZ, H.A.; ALIAS, S.; ADLAN, M.N.; FARIDAH, A.H.; ASAARI, M. S. Z. Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. **Bioresource Technology**, 98 (2007) 218–220.

BRAILE, P. M. & CAVALCANTI, J. E. Manual de tratamento de águas residuárias industriais. São Paulo: Cetesb, 1993.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005. Brasília-DF. 2005.

BRASIL - Ministério da saúde. Portaria n° 518, de 25 de março de 2004.

COSSICH, E. S. **Apostila Curso de Especialização em Gestão Ambiental**. Novembro, 2006.

COSTA NETO, P. L.O. **Estatística**. Edgar Blucher: São Paulo, 1977. 280 p.

DI BERNARDO, L. **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, RiMa, 498 p., 2003.

DOMÍNGUEZ, J.R.; GONZÁLEZ, T.; GARCÍA, H. M; SÁNCHEZ, L. F.; HEREDIA, J. B.de. Aluminium sulfate as coagulant for highly polluted cork processing wastewaters: Removal of organic matter. **Journal of Hazardous Materials**, 148 (2007) 15–21.

FEEMA – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE. Coletânea de legislação federal e estadual de meio ambiente. Rio de Janeiro, 1992, 384p.

FIESP. **Manual de conservação e reúso de água**. São Paulo. 2004.

FORLIN, F. J. & FARIA, J. de A. F. Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 12, nº 1, p. 1-10, 2002.

GRADY Jr, C.P.L. & LIN, H.C. Biological wastewater treatment, Pollution engineering and technology, New York: Marcel Decker, inc, 1980, 963p.

GIORDANO, G. Análise e formulação de processos para tratamento dos chorumes gerados em aterros de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro – RJ, 2003. 257 p. Tese de Doutorado (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) PUC-Rio, 2003.

HAMMER, M.J. **Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotos**. Livros Técnicos Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1979.

HASSEMER, E. M. N. & SENS, M. L. Tratamento de efluente de uma Indústria Têxtil. Processo Físico-Químico com Ozônio e Coagulação/Floculação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 7, nº 1, jan-mar, 2002.

LEME, F. P. **Engenharia do saneamento ambiental**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1984.

LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energéticos, Industrial e de Transporte**. Brasília – DF: ANEEL, 2000. 503 p.

MATTEI, M.; GUIDA, M.; ROCCA C. D.; MELLUSO G.; MERIÇ S. Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater. **Desalination**, 211 (2007) 113–127.

MANO, E. B.; MENDES, L. C; **Introdução a polímeros**. 2a ed., Edgard Blücher Ltda: São Paulo, 1999.

MANCUSO, P. C. S & SANTOS, H. F. **Reuso de Água**. Manole: São Paulo, 2003. 550 p.

METCALF & EDDY – Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4a ed. Boston: Mc Graw Hill, 2003, 1819 p.

NAVACHI, J. A. **Reutilização dos efluentes tratados: caso de uma lavanderia industrial**. Blumenau, 2002. 95 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Regional de Blumenau, Brasil.

NUMES, J.A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais** – 2ª ed. – Aracaju – ed. J. Andrade – 1996.

RICHTER, C.A. e AZEVEDO NETTO, J.M. **Tratamento de Água**. Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1991.

ROCHA, E. J. T.; MOTA, S.; SOUSA, S. T. de; AQUINO, M. D. de. Caracterização das águas de lavagem de uma recicladora de plásticos e viabilidade do seu reúso. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Campo Grande, 2005.

SANTOS, I., SOUZA, M.A.A. Reúso de água: uma análise da adequabilidade da utilização das águas residuárias tratadas no Distrito Federal. **XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Porto Alegre. 2000.

SPINACÉ, M. A. da S. & PAOLI, M. A de. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química. Nova**, Vol. 28, Nº. 1, 65-72, 2005.

TUCCI, C. E. M (Org.) **Hidrologia Ciência e aplicação**. 3 ed. 944 p., 2002.

WALLIS, G. Tendências de Consumo de embalagens flexíveis de PE. Rio de Janeiro, 19 de abril de 2006. [http://www.datamark.com.br/newdatamark/ASP/Portuguese/freestuff\\_p.asp](http://www.datamark.com.br/newdatamark/ASP/Portuguese/freestuff_p.asp), site visitado em: 06 de fevereiro de 2008.

