



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



TESE DE DOUTORADO

FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO NA CLARIFICAÇÃO DE
ÁGUAS COM BAIXA TURBIDEZ UTILIZANDO SULFATO DE
ALUMÍNIO E SEMENTES DE MORINGA OLEIFERA COMO
COAGULANTES

Patrícia Guilhermina da Silva Lédo

Orientador: Prof. Dr. João Bosco de Araújo Paulo
Co-orientadora: Prof^a Dr^a Raquel Franco de Souza Lima

Natal/RN
Dezembro/2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Patrícia Guilhermina da Silva Léo

**FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO NA CLARIFICAÇÃO DE
ÁGUAS COM BAIXA TURBIDEZ UTILIZANDO SULFATO DE
ALUMÍNIO E SEMENTES DE MORINGA OLEIFERA COMO
COAGULANTES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor.

Natal/RN
Dezembro/2008

Divisão de Serviços Técnicos
Catalogação da Publicação na Fonte.
UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Lédo, Patrícia Guilhermina da Silva.

Flotação por ar dissolvido na clarificação de águas com baixa turbidez utilizando sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera* como coagulantes / Patrícia Guilhermina da Silva Lédo. – Natal, RN, 2008.

123 f. : il.

Orientador: João Bosco de Araújo Paulo.

Co-orientadora: Raquel Franco de Souza Lima.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

1. Tratamento de água – Tese. 2. Clarificação de água – Tese. 3. Redução de turbidez – Tese. 4. *Moringa oleifera* – Tese. 5. Sulfato de alumínio – Tese. I. Paulo, João Bosco de Araújo. II. Lima, Raquel Franco de Souza. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.16(043.2)

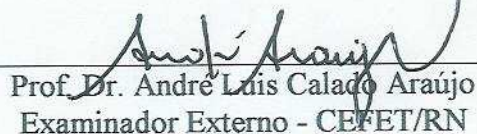
**FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO NA CLARIFICAÇÃO DE
ÁGUAS COM BAIXA TURBIDEZ UTILIZANDO SULFATO DE
ALUMÍNIO E SEMENTES DE *MORINGA OLEIFERA* COMO
COAGULANTES.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

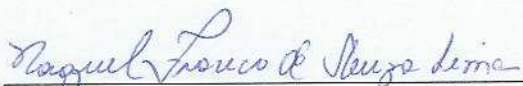
Aprovada em 22 de dezembro de 2008.



Prof. Dr. João Bosco de Araújo Paulo
Orientador - UFRN



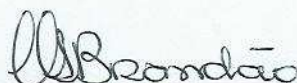
Prof. Dr. André Luis Calado Araújo
Examinador Externo - CEFET/RN



Prof. Dr. Raquel Franco de Souza Lima
Co-orientadora - UFRN



Prof. Dr. Henio Normando de Sousa Melo
Examinador Interno - UFRN



Prof. Dr. Cristina Célia Silveira Brandão
Examinador Externo - UNB



Prof. Dr. Josette Lourdes de Sousa Melo
Examinador Interno - UFRN

LEDO, Patrícia Guilhermina da Silva- Flotação por ar dissolvido na clarificação de águas com baixa turbidez utilizando sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera* como coagulantes. Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Áreas de Concentração: Engenharia Ambiental e Processos de Separação.

Orientador: Prof Dr. João Bosco de Araújo Paulo

Co-orientadora: Prof^a Dr^a. Raquel Franco de Souza Lima

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo investigar o processo da flotação por ar dissolvido sob pressão - FAD para clarificação de águas com baixa turbidez utilizando sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera* como coagulantes. O procedimento experimental foi realizado em uma unidade de flotação em escala de bancada. Foram avaliadas as influências das condições do pré-tratamento (dosagem de coagulante e tempo de floculação) e parâmetros de processo da flotação (taxa de aplicação superficial e taxa de recirculação) na eficiência do processo. A eficiência foi avaliada pela determinação de turbidez nas amostras de água bruta e tratada. Os resultados obtidos mostraram que elevadas eficiências de redução da turbidez podem ser conseguidas com o uso da FAD em águas com baixa turbidez utilizando estes coagulantes. Para o sulfato de alumínio, nos pHs 5,0 e 6,0 as melhores eficiências foram alcançadas com baixas dosagens (15 mg/L), alcançando valores de até 92% de redução. Para a *Moringa oleifera*, as melhores eficiências de redução de turbidez foram à dosagem aproximada de 50 mg/L para todos os pHs, alcançando valores de 86% de redução. Determinou-se também o potencial zeta, com o objetivo de auxiliar na compreensão dos mecanismos envolvidos na coagulação. Os mecanismos de coagulação com sementes de *Moringa oleifera* indicam ser adsorção e neutralização de cargas e adsorção e formação de pontes. No que diz respeito ao sulfato de alumínio os mecanismos predominantes são adsorção e neutralização de cargas e varredura. Os resultados indicam que para águas de baixa turbidez, as sementes de *Moringa oleifera* podem ser um substituto potencialmente viável em relação ao sulfato de alumínio.

Palavras chave: Clarificação de água. Flotação por ar dissolvido. Redução de turbidez. *Moringa oleifera*. Sulfato de alumínio

LEDO, Patrícia Guilhermina da Silva- Dissolved air Flotation , for clarifying water with low turbidity using aluminum sulphate and *Moringa oleifera* seeds as coagulants. Program of Graduate Degree in Chemical Engineering- URFN- Natal/RN- Brazil.

ABSTRACT: This work aims to investigate the process of Dissolved air Flotation (DAF) for clarifying water samples with low turbidity using aluminum sulphate and *Moringa oleifera* seeds as coagulants. The experimental procedure was carried out in a bench scale flotation unit. The influences on the pre-treatment conditions (coagulant dosage and flocculation time) and flotation parameters (superficial application rate and recirculation rate) were evaluated considering the efficiency of the process. The efficiency was evaluated by determining the turbidity of the untreated and treated water samples. The results obtained showed that turbidity reduction can be obtained very efficiently by using DAF and the latter coagulant in low turbidity water. Using aluminum sulphate in pH's 5.0 and 6.0 better efficiencies were obtained with low concentrations (15 mg/L), achieving values of 92% of turbidity reduction. In the case of use of *Moringa oleifera* better efficiencies of reduction of turbidity were reported when using a concentration of 50 mg/L in all range of pH's, achieving 86% of reduction. The zeta potential was also determined, in an attempt to aid comprehension of the coagulation mechanisms involved. The coagulation mechanisms with *Moringa oleifera* seeds were shown to be adsorption and charge neutralization, as well as adsorption and bridging. Concerning aluminum sulphate, the predominant mechanisms are adsorption and charge neutralization and enmeshment in a precipitate. The results indicate that for low turbidity water, *Moringa oleifera* seeds could potentially be a viable substitute for aluminum sulphate.

Key words: Clarification of water. Dissolved air Flotation; Turbidity Reduction; *Moringa oleifera*; Aluminum Sulphate.

Agradecimentos

A todos que contribuíram com a realização do trabalho.

SUMÁRIO

1. Introdução	02
2. Aspectos Teóricos	06
2.1. Conceitos Básicos.....	06
2.1.1. Dupla camada elétrica.....	06
2.1.2. Potencial zeta.....	08
2.1.3. Teoria DLVO.....	08
2.2- Coagulação e Floculação.....	09
2.2.1. Mecanismos de Coagulação.....	12
2.2.1.1. Compressão da camada difusa.....	13
2.2.1.2. Adsorção e neutralização de cargas.....	14
2.2.1.3. Varredura.....	14
2.2.1.4. Adsorção e Formação de Pontes.....	15
2.3. Flotação.....	16
2.3.1. Definição.....	16
2.3.2. Princípios Básicos.....	16
2.3.4. Tipos de flotação.....	17
2.3.4.1. Flotação por ar disperso.....	17
2.3.4.2. Flotação eletrolítica ou eletroflotação.....	18
2.3.4.3. Flotação por ar dissolvido.....	19
2.3.5. Princípios Básicos da FAD.....	19
2.3.5.1. Influência das microbolhas de ar.....	19
2.3.5.2. Influência da coagulação/floculação na FAD.....	20
2.3.6. Tipos de flotação por ar dissolvido.....	21
2.3.6.1. Pressurização total do afluente.....	21
2.3.6.2. Pressurização parcial do afluente.....	22
2.3.6.3. Recirculação e pressurização de parte do afluente.....	22

2.3.7. Principais parâmetros operacionais na flotação por ar dissolvido.....	23
2.3.7.1. Taxa de Recirculação.....	23
2.3.7.2. Razão Ar / Sólidos.....	23
2.3.7.3. Taxa de aplicação superficial.....	25
2.3.7.4. Pressão de saturação.....	26
2.3.8. Diferenças entre decantação e Flotação.....	27
2.4. Produtos utilizados na coagulação/floculação da água.....	28
2.4.1. Sulfato de alumínio.....	28
2.4.2. <i>Moringa oleifera</i>	29
3. Estado da Arte.....	36
3.1. Flotação por ar dissolvido (FAD).....	36
3.2- <i>Moringa oleifera</i> no tratamento de água.....	39
4. Metodologia Experimental.....	46
4.1. Montagem do equipamento flotateste.....	46
4.1.1. Colunas de Flotação.....	49
4.1.2. Câmara de saturação.....	51
4.1.3. Equipamentos complementares.....	53
4.2. Etapas do trabalho experimental.....	55
4.2.1. Lagoa do Jiqui.....	55
4.2.2. Coleta de amostras.....	56
4.2.3. Reagentes utilizados.....	57
4.2.4. Análises Físico-químicas.....	57
4.2.5. Preparação da solução coagulante com sementes de <i>Moringa oleifera</i>	57
4.2.6. Cálculo do gradiente de velocidade.....	57
4.2.7. Etapas experimentais no flotateste.....	58
4.2.7.1. Etapa 1: Avaliação da influência da dosagem de coagulante na eficiência do processo.....	58

4.2.7.2. Etapa 2: Avaliação da influência da taxa de aplicação superficial na eficiência do processo.....	59
4.2.7.3. Etapa 3: Avaliação da influência do tempo de floculação na eficiência do processo.....	59
4.2.7.4. Etapa 4: Avaliação da influência da taxa de recirculação na eficiência do processo.....	59
4.2.8. Operação com flotateste.....	60
4.2.8.1. Saturação da água de recirculação com ar.....	60
4.2.8.2. Ensaio de coagulação, floculação e flotação.....	60
4.2.9. Determinação do potencial zeta.....	63
4.2.9.1. Ensaio de coagulação e floculação.....	63
4.2.9.2. Mobilidade eletroforética e potencial zeta.....	64
4.2.10- Análise estatística dos dados.....	65
5. Resultados e discussões.....	67
5.1. Ensaio de Flotação utilizando sulfato alumínio.....	67
5.1.1. Dosagem.....	67
5.1.2. Taxa de aplicação superficial.....	69
5.1.3- Tempo de floculação.....	70
5.1.4- Taxa de recirculação.....	71
5.2. Ensaio de Flotação utilizando sementes de <i>Moringa oleifera</i>	73
5.2.1. Avaliação da variação da dosagem de coagulante na eficiência do processo.....	74
5.2.2. Taxa de aplicação superficial.....	75
5.2.3. Tempo de floculação.....	76
5.2.4. Taxa de recirculação.....	77
5.3. Medidas de mobilidade eletroforética utilizando sulfato de alumínio.....	80
5.4- Medidas de mobilidade eletroforética utilizando <i>Moringa oleifera</i>	85
6. Conclusões.....	89

Referências.....92

Anexo A.....103

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. A- Representação esquemática da dupla camada elétrica; B-Curvas de atração de Van Der Waals, curva de repulsão eletrostática e a curva de interação entre as partículas coloidais.....	07
Figura 2.2. Definição esquemática da formação de pontes entre partículas com aplicação de polímeros orgânicos.....	15
Figura 2.3. FAD-Pressurização total do afluente.....	21
Figura 2.4. FAD-Pressurização parcial do afluente.....	22
Figura 2.5. FAD-Recirculação e pressurização de parte do afluente.....	22
Figura 2.6. Exemplo de reações de hidrólise do íon Al^{+3}	28
Figura 2.7. Árvore que produz <i>Moringa oleifera</i>	31
Figura 2.8. Vagens com sementes da planta que produz <i>Moringa oleifera</i>	31
Figura 2.9. a- Frutos da planta que produz <i>Moringa oleifera</i> ; b- Folha da planta que produz <i>Moringa oleifera</i> ; c- Flores da planta que produz <i>Moringa oleifera</i> ; d- Semente de <i>Moringa oleifera</i>	32
Figura 4.1. Esquema geral do flotatete.....	47
Figura 4.2. Estrutura do flotatete montado em estrutura metálica.....	48
Figura 4.3. a-Colunas de flotação; b-Base da coluna de flotação com os dispositivos instalados.....	50
Figura 4.4. a- Câmara de saturação, b- Parte superior da câmara de saturação; c- Base da câmara de saturação.....	52
Figura 4.5. Parte superior da câmara de saturação.....	53
Figura 4.6. Conjunto motor e polias que movimentam os eixos.....	54
Figura 4.7. Interligação da câmara de saturação as colunas de flotação.....	54
Figura 4.8. Canal de entrada da Água bruta da ETA-Jiqui; Laboratório onde foram realizados os experimentos e a Lagoa do Jiqui.....	56
Figura 4.9. Seqüência de etapas na coluna de flotação: a-mistura rápida, b-floculação, c-início da flotação, d-término da flotação.....	62
Figura 5.1. Relação das dosagens de sulfato de alumínio e redução de turbidez (%) nos pHs 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.....	68

Figura 5.2. Relação das taxas de aplicação superficial e redução de turbidez (%) nos valores de pH 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.....	69
Figura 5.3. Relação do tempo de floculação e redução de turbidez (%) nos pHs 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.....	70
Figura 5.4. Relação do tempo de recirculação e redução de turbidez (%) nos pHs 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.....	72
Figura 5.5. Relação das dosagens de <i>Moringa oleifera</i> e redução de turbidez (%) nos valores de pH 6,4, 7,0 e 8,0 nos ensaios de Flotação utilizando sementes de <i>Moringa oleifera</i>	74
Figura 5.6. Relação das taxas de aplicação superficial e redução de turbidez (%) nos valores de pH 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de Flotação utilizando sementes de <i>Moringa oleifera</i>	75
Figura 5.7. Relação do tempo de floculação e redução de turbidez (%) nos valores de pH 6,4, 7,0 e 8,0 nos ensaios de Flotação utilizando sementes de <i>Moringa oleifera</i>	76
Figura 5.8. Relação do tempo de recirculação e redução de turbidez (%) nos valores de pH 6,4, 7,0 e 8,0 nos ensaios de Flotação utilizando sementes de <i>Moringa oleifera</i>	77
Figura 5.9. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de sulfato de alumínio em pH = 5,0.....	80
Figura 5.10. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de sulfato de alumínio em pH = 6,0.....	81
Figura 5.11. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de sulfato de alumínio em pH= 7,0.....	83
Figura 5.12. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de <i>Moringa oleifera</i> em pH = 6,4, sem ajuste.....	85
Figura 5.13. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de <i>Moringa oleifera</i> em pH = 7,0.....	86
Figura 5.14. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de <i>Moringa oleifera</i> em pH = 8,0.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Número de espécies vegetais com capacidade coaguladora.....	29
Tabela 2.2. Espécies mais comuns de <i>Moringa</i> e sua distribuição pelo mundo.....	30
Tabela 4.1. Resumo das condições operacionais de cada uma das etapas no flotateste.....	60
Tabela 5.1. Melhores condições de pré-tratamento e parâmetros de projeto e operação da FAD em função dos pHs nas etapas dos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.....	73
Tabela 5.2. Melhores condições de pré-tratamento e parâmetros de projeto e operação da FAD em função dos pHs nas etapas dos ensaios de flotação utilizando sementes de <i>Moringa oleifera</i>	78
Tabela 5.3. Resumo da análise de variância nas etapas dos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio e sementes de <i>Moringa oleifera</i> para a variável turbidez remanescente nos diferentes valores de pH.....	79

LISTA DE SIGLAS E NOMENCLATURA

CAERN-Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
 DLVO-Derjaguin, Landau, Verwey e Overbeek
 ETA-Estação de Tratamento de Água
 ETE-Estação de Tratamento de Esgoto
 FAD-Flotação por ar dissolvido
 MO-*Moringa oleifera*
 RPM-Rotações por minuto
 TAS-Taxa de aplicação superficial, $m^3/m^2.d$
 TES-Taxa de escoamento superficial
 USP-Universidade de São Paulo
 UnB-Universidade de Brasília
 UFRN-Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Letras Latinas

A- massa de ar necessária à flotação, kg
 A/S- relação ar/sólidos
 a- raio das partículas, m
 C- Concentração de sólidos na suspensão influente, kg/m^3
 C_a - Concentração de ar na água de recirculação, kg/m^3
 C_{sat}- Concentração de saturação, kg/m^3
 cd- coeficiente de arrasto
 CV- coeficiente de variação
 d- Diâmetro da partícula, m
 d- distância de separação entre as partículas, m
 dc- densidade do complexo ar- partícula, kg/m^3
 d_a- densidade do ar, kg/m^3
 ds- densidade do sólido, kg/m^3
 d_l- densidade do líquido, kg/m^3

- D- Variação da dosagem de coagulante, kg/m^3
- E_r - Constante dielétrica do solvente, dependendo da temperatura
- E - Intensidade do campo elétrico, definido como U/L
- g- aceleração gravitacional, m/s^2
- G- Gradiente de velocidade, s^{-1}
- k- parâmetro de Debye- Huckel ou o inverso da espessura da dupla camada elétrica
- K- constante de Hamaker
- KDa- Quilo Dalton
- K_H - Constante da lei de Henry
- k_0 - relação entre a velocidade da água e das paletas
- L - Distância entre eletrodos, m
- $m_{A/S}$ - Relação mínima necessária ar/sólidos para flotar, kg de ar /kg SS.
- n- velocidade de rotação das paletas, rpm
- P- Pressão de saturação, kPa
- P_f - Probabilidade de flotação
- P_c - Probabilidade de colisão partícula-bolha
- P_a - Probabilidade de adesão entre partícula-bolha
- P_s - Probabilidade de formação de um agregado partícula-bolha estável
- pH- Potencial hidrogeniônico
- pI- ponto isoelétrico
- q- vazão da água pressurizada encaminhada à coluna de flotação, m^3/s
- Q- vazão da unidade de flotação, m^3/s
- R- Taxa de recirculação
- S- massa de sólidos, kg
- t_c -Tempo de coleta, s
- T_f -Tempo de floculação, s
- uT- Unidade de turbidez
- u_E - Mobilidade eletroforética, $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1} / \text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$
- U- Potencial aplicado, v
- v_f -Velocidades de flotação, m/s
- V_a - Volume de ar aderido a partícula sólida, m^3
- V_s -Volume da partícula sólida, m^3

V_A - energia potencial das interações atrativas
 V_R - energia potencial das interações repulsivas
 V_T - energia potencial total de interação entre as partículas
 V - Velocidade média das partículas, m/s
 V_0 - velocidade da partícula em relação ao meio, m/s
 V_F - volume da câmara de flotação, m³
 V_{casc} - Velocidade crítica ascensional, m/s

Letras Gregas

η - Eficiência da câmara de saturação
 ζ = Potencial zeta, mV
 ν = Viscosidade da solução, kg/m.s
 \emptyset - ângulo de contato
 ρ_1, ρ_2 -densidade da partícula e do meio, kg/m³
 μ - viscosidade do meio, kg/m.s
 μ_0 - viscosidade do líquido, kg/m.s
 ϵ - permissividade da solução

Capítulo 1

Introdução Geral

1- Introdução

A quantidade de água disponível no nosso planeta é limitada. A qualidade da água deve atender aos padrões a que se destina, principalmente aquela destinada ao consumo humano. Diante desta realidade, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que forneçam elementos que venham contribuir com a preservação ambiental e manutenção da qualidade da água, propiciando seu efetivo tratamento para o consumo direto e indireto dos seres humanos.

Tendo como base os resultados obtidos de experiências que comprovam que o processo de flotação por ar dissolvido sob pressão-FAD é uma boa opção para o tratamento de água para abastecimento no Brasil, apresentando vários aspectos positivos como elevada qualidade do efluente final, pouca área demandada para implantação e grande estabilidade operacional. Este trabalho se propõe fazer uma avaliação do desempenho da FAD, através de ensaios em equipamento de bancada, flotateste.

Os sais de alumínio e de ferro são os coagulantes mais amplamente utilizados no tratamento de água e de esgoto em todo o mundo. Porém, existe a hipótese de que a ingestão oral do alumínio é um fator para desenvolvimento ou aceleração do aparecimento da doença de Alzheimer em humanos. De acordo com a OMS, a relação positiva entre alumínio na água potável, e a doença de Alzheimer, foi demonstrada em diversos estudos epidemiológicos, não podendo ser totalmente descartada. Tendo em vista a preocupação com a possível neurotoxicidade do alumínio, torna-se necessário o controle da exposição da população ao mesmo, minimizando os níveis de alumínio na água tratada, através de estudos de otimização de pHs e dosagens, ou o desenvolvimento de coagulantes alternativos. Além disso, o resíduo produzido pelo uso deste coagulante, pode ocasionar riscos devido a sua disposição final sem nenhum tratamento ao solo, podendo se acumular no mesmo, por não ser biodegradável; outro destino para o lodo produzido são os cursos d'água, porém, alguns estudos mostram que o excesso de alumínio pode trazer prejuízo ao desenvolvimento de peixes e algas.

Diante desta realidade, em anos recentes, houve um aumento no interesse do desenvolvimento de coagulantes naturais alternativos, a exemplo do que pode ser extraído das sementes de *Moringa oleifera*. Diversos estudos mostraram que a utilização desta é comparável ao sulfato de alumínio, sendo recomendada como um coagulante eficaz para o tratamento de água em

diversos países (DIAZ *et al.*, 1999; JAHN, 1986; NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995; NDABIGENGESERE; NARASIAH, 1998). É um coagulante comprovadamente ativo e seguro (CASTRO; SILVA, 2004; GHEBREMICHAEL *et al.*, 2005; NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995), sendo possível sua ampla utilização no tratamento de água, o que traz benefícios econômicos para os países produtores, além de se constituir em uma alternativa ambientalmente correta.

Neste trabalho foi construído um equipamento em escala de bancada, flotateste, para investigar a eficiência de dois coagulantes, sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera*, na clarificação de água de baixa turbidez proveniente da Lagoa do Jiqui/RN. Foi determinado também o potencial zeta para diferentes dosagens dos coagulantes utilizados, com o objetivo de auxiliar na compreensão dos mecanismos envolvidos na coagulação. A obtenção do potencial zeta em tratamento de água pode representar uma maneira de se relacionar parâmetros operacionais como pH e dosagem de coagulantes com a eficiência do processo de clarificação.

O desenvolvimento desta pesquisa, envolvendo esta tecnologia, poderá contribuir na busca de uma alternativa viável para a melhoria da qualidade da água produzida em ETAs e fornecimento de elementos que auxiliem na luta pela preservação do meio ambiente, servindo como ponto de partida para estudos da aplicabilidade desta tecnologia na região.

O objetivo geral desta pesquisa foi à concepção de um equipamento, flotateste, para avaliar o potencial da flotação por ar dissolvido sob pressão-FAD no tratamento de águas com baixa turbidez, em escala laboratorial, utilizando sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera*.

Os objetivos específicos estão associados à /ao:

- Verificação da influência das condições de pré-tratamento: dosagem de coagulante, pH de coagulação e tempo de floculação na eficiência da FAD, utilizando os diferentes coagulantes;

- Impacto da variação dos parâmetros de projeto e operação da FAD: taxa de aplicação superficial e a taxa de recirculação, na eficiência do processo, sendo a turbidez o parâmetro a ser considerado no controle da eficiência;
- Estudo dos mecanismos de coagulação dos coagulantes sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera*.

Este trabalho de tese está dividido em 6 capítulos. O capítulo I constitui a introdução incluindo objetivos geral e específico.

O capítulo II refere-se à revisão da literatura relativa ao assunto tratado.

O capítulo III é relativo à revisão do estado da arte sobre a Flotação por ar dissolvido e sobre o potencial de utilização das sementes de *Moringa oleifera*.

O capítulo IV descreve os materiais e métodos empregados para a construção e realização dos ensaios no equipamento flotateste, e as medidas de mobilidade eletroforética.

O capítulo V apresenta os resultados e discussões encontradas no equipamento flotateste e durante as medidas de mobilidade eletroforética.

No capítulo VI é realizada a conclusão do trabalho de tese.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2. Aspectos Teóricos

2.1. Conceitos Básicos

Em tratamento de água, as partículas coloidais são as que ocasionam maiores problemas referentes à remoção de cor e turbidez. Devido ao seu tamanho pequeno, levariam muito tempo para sedimentar, devendo haver uma união destas para que possam ser removidas; isto é feito através da adição de produtos químicos, que desestabilizam o sistema. Para uma melhor compreensão deste processo é necessário que se conheçam as propriedades eletrocinéticas dos colóides, que serão apresentadas a seguir.

2.1.1. Dupla camada elétrica

Para explicar os comportamentos eletrocinéticos dos colóides foi proposto por Gouy & Stern o modelo da dupla camada elétrica. Este é utilizado para visualizar a atmosfera iônica na proximidade de um colóide carregado e explicar como atuam as forças elétricas de repulsão, podendo ser entendido como uma seqüência de fenômenos que ocorrem ao redor de um colóide.

Sabe-se que as partículas coloidais na água geralmente possuem cargas negativas que atraem uma grande quantidade de íons positivos que formam uma camada ao redor da superfície do colóide, chamada camada compacta ou de Stern. À medida que se afasta da superfície do colóide, outros íons positivos são atraídos pelo colóide negativo, em menor concentração formando a camada difusa. Nesta camada difusa, também se tem íons com a mesma carga negativa do colóide. Os íons positivos têm uma alta concentração próxima à superfície do colóide, que diminui gradualmente com a distância, até que se tenha equilíbrio com a solução, ou seja, o número de cargas opostas tende a se igualar. O conjunto das camadas compacta e difusa resulta na denominada dupla camada elétrica. Os íons de carga contrária são atraídos ao colóide, por forças eletrostáticas, enquanto a agitação térmica e o movimento browniano tendem a distribuí-los por toda massa líquida.

A qualquer distância da superfície do colóide, a densidade de carga é igual à diferença de concentração entre íons positivos e negativos, sendo muito maior próximo à superfície do colóide, diminuindo a zero quando as concentrações dos íons positivos e negativos são iguais. A Figura 2.1 A, representa o comportamento da configuração da dupla camada elétrica. Na Figura 2.1 B são mostradas as curvas de atração de Van Der Waals, a curva de repulsão eletrostática e a curva de energia de interação.

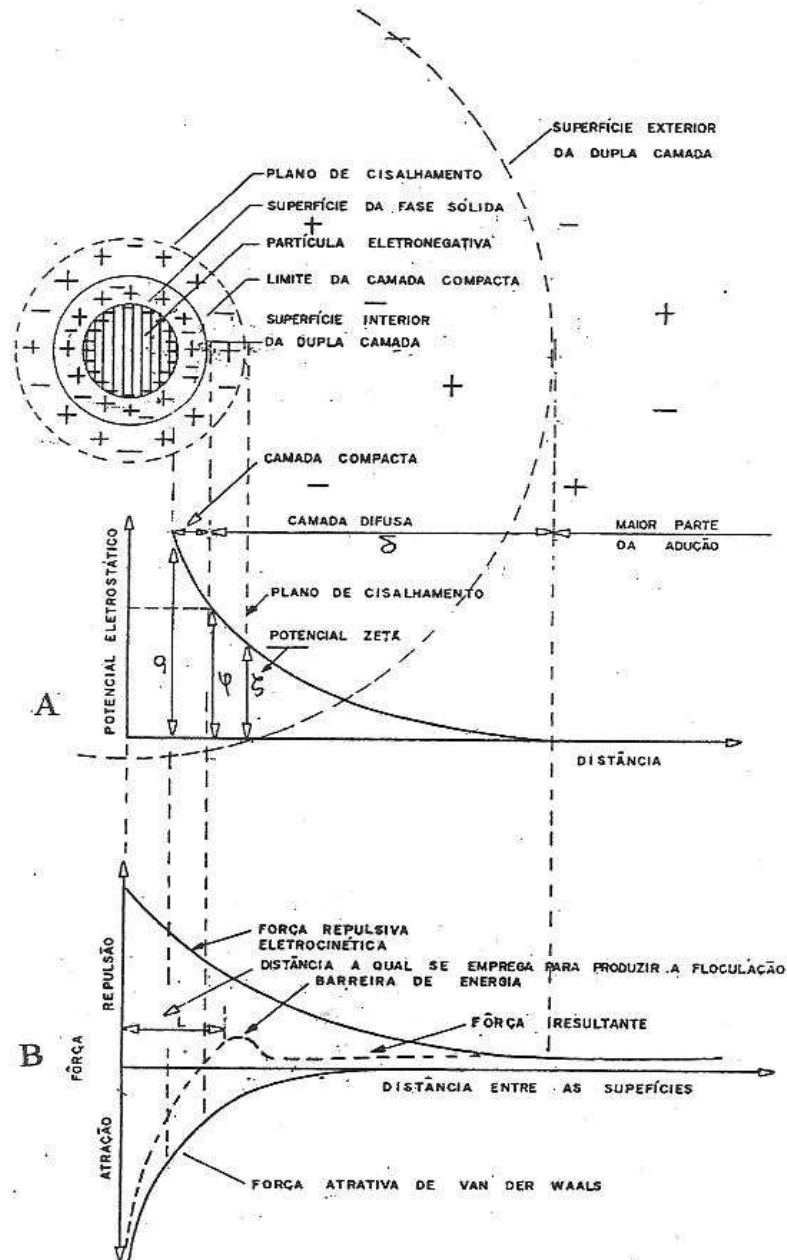


Figura 2.1. A- Representação esquemática da dupla camada elétrica; B-Curvas de atração de Van Der Waals, curva de repulsão eletrostática e a curva de interação entre as partículas coloidais. Fonte: Johnson ; Alexander In: Azevedo Netto, 1976

2.1.2. Potencial Zeta

O colóide negativo e sua atmosfera carregada positivamente produzem um potencial elétrico relativo à solução. Este potencial tem um valor máximo na superfície e diminui gradualmente com a distância, aproximando-se de zero fora da camada difusa.

Na dupla camada elétrica o único potencial que pode ser determinado experimentalmente é o potencial zeta (ζ), isto é, o potencial medido no plano de cisalhamento entre a partícula e a solução, quando os dois estão em movimento relativo, na presença de um campo elétrico (PERES; MONTE, 2004).

O potencial zeta é possivelmente uma das poucas grandezas relacionadas a fenômenos de superfície que podem ser diretamente investigadas por técnicas experimentais muito bem estabelecidas (ARAÚJO; PERES; BRANDÃO, 1990). Este potencial pode ser obtido a partir da medida da velocidade de migração de partículas suspensas em um meio fluido, em direção a um eletrodo de carga oposta, quando aplicada uma diferença de potencial entre dois eletrodos, sendo medido onde se unem a camada difusa e a de Stern. Alguns autores consideram que o plano de cisalhamento, onde são efetuadas as determinações eletrocinéticas do potencial zeta, é o plano de Stern (FUERSTENAU, 1982 *apud* PERES;MONTE, 2004).

A determinação do potencial zeta é uma maneira efetiva de controlar o comportamento do colóide, pois indica mudanças no potencial da superfície e as forças de repulsão dos colóides, sendo em tratamento de água uma maneira de se avaliar se o pH e a dosagem de coagulantes empregados estão sendo favoráveis à eficiência do processo.

2.1.3. Teoria DLVO

A teoria DLVO foi proposta pelos cientistas, Derjaguin, Landau, Verwey e Overbeek, sendo de fundamental importância na ciência dos colóides. Esta teoria sugere que a estabilidade de uma suspensão coloidal pode ser descrita pela interação total resultante das contribuições das interações atrativas (força de Van Der Waals) e repulsivas (forças da dupla camada elétrica).

Assim pela teoria DLVO, para se ter uma suspensão estável é necessário que as forças de interações repulsivas superem as forças de atração de Van Der Waals. Explicando assim a tendência dos colóides a se agregar ou permanecer separados. A teoria DLVO combina as curvas de repulsão e de atração para explicar a interação entre as partículas coloidais, resultando na curva de energia de interação. Na Figura 2.1.B são mostradas as curvas de atração de Van Der Waals, a curva de repulsão eletrostática e a curva de energia de interação.

Existe um ponto de máxima energia de repulsão denominado barreira de energia. Esta barreira indica o quanto o sistema é estável. Para que esta barreira de energia seja minimizada, é necessário que predominem as interações atrativas e conseqüentemente haja a agregação das partículas. Pode-se alterar o entorno do colóide de diversas maneiras tais como:

- abaixamento do potencial zeta: por meio de alterações na atmosfera iônica, pH, ou introduzindo um eletrólito indiferente, para afetar diretamente a carga do colóide;
- fornecimento de energia cinética ao sistema suficiente para incrementar o número de colisões.

2.2. Coagulação e Flocculação

O entendimento dos mecanismos envolvidos nos processos de agregação das partículas coloidais é de grande importância nas operações de separação sólido-líquido, sendo favorecida por uma desestabilização do sistema, representada por uma agregação de partículas, obtida com o auxílio de substâncias químicas. A eficiência do processo de separação sólido-líquido vai depender da eficiência do processo de agregação. Para a agregação das partículas coloidais, existem três alternativas principais:

- Coagulação: ocorre quando as forças superficiais de natureza atrativa superam as de natureza repulsiva. O agregado formado é chamado “coágulo”;

- Aglomeração: as partículas são agregadas por ação de um líquido imiscível, por exemplo, um óleo em uma suspensão aquosa. O agregado formado é chamado “aglomerado”;

- Flocculação: resulta da ação de um polímero de elevado peso molecular que, em geral adsorve-se de forma simultânea na superfície de várias partículas. O agregado é denominado “floc”.

De acordo com a teoria DLVO a energia potencial total de interação entre as partículas (V_T) é obtida por meio de balanço das energias potenciais das interações atrativas (V_A) e repulsivas (V_R):

$$V_T = V_A + V_R \quad (2.1)$$

A agregação ocorre quando $V_A > V_R$ e a dispersão é estável quando $V_A < V_R$. Para o caso de duas partículas esféricas idênticas:

$$V_A = \frac{-Ka}{12d} \quad (2.2)$$

$$V_R = 2\pi\epsilon a \zeta^2 \exp(-kd) \quad (2.3)$$

Onde:

K- constante de Hamaker

a- raio das partículas

d- distância de separação entre as partículas

e- permissividade da solução

ζ - potencial zeta

k- parâmetro de Debye- Huckel ou o inverso da espessura da dupla camada elétrica

Como já foi explicada, a coagulação é obtida com a redução ou eliminação da barreira energética repulsiva (Figura 2.1 B). De acordo com a Equação 2.3, a predominância das interações atrativas, pode ser conseguida através da redução do potencial zeta ou pela redução da dupla camada elétrica. De acordo com Baltar (2004), alguns passos são necessários para a minimização da barreira energética, tais como:

- Alterar a carga elétrica superficial da partícula: em sistemas em que as espécies OH^- e H^+ são determinantes de potencial, a coagulação pode ser obtida por meio do controle do pH;
- Promover a adsorção específica de íons: as presenças destes íons se forem de carga elétrica oposta a da superfície;
- Promover a compressão da dupla camada elétrica: através da adição de eletrólitos, por exemplo, o sulfato de alumínio.

Os termos coagulação e floculação são encontrados na literatura com diferentes interpretações, como mostrado a seguir.

O termo “coagulação” é originário do latim *coagulare*, que significa juntar e “flocular” provém do latim *flocculare*, que exprime produzir flocos (AZEVEDO NETTO, 1976).

A coagulação pode ser obtida pela adição de produtos químicos a uma dispersão coloidal. Esta adição provoca uma desestabilização das partículas coloidais, por meio da redução do potencial zeta. Do ponto de vista eletrostático, a coagulação é a redução do potencial zeta pela adição de íons específicos. A coagulação pode ocorrer quando a adição de um eletrólito catiônico baixa o potencial zeta, pois o mesmo reduz as forças repulsivas permitindo que as forças de atração de Van Der Waals promovam a agregação. A coagulação irá depender das características da água e das impurezas presentes conhecidas através de parâmetros como pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, temperatura, mobilidade eletroforética, força iônica, sólidos totais dissolvidos, tamanho e distribuição de tamanhos das partículas em estado coloidal e em suspensão.

A etapa da agregação das partículas é feita após a coagulação (mistura rápida), sendo um processo continuado da coagulação que consiste na formação de flocos, através de introdução de energia mecânica ocorrendo choques com as impurezas presentes, formando partículas maiores, denominadas flocos, que podem ser removidas por sedimentação, flotação ou filtração. Esta etapa é denominada floculação, sendo que a agitação é muito mais suave do que na mistura rápida, sendo por isto chamada de mistura lenta. As etapas de coagulação e floculação são chamadas de pré-tratamento. O processo de floculação envolve dois estágios, a floculação pericinética que acontece pela agitação térmica das partículas (movimento browniano) e pela floculação ortocinética devido os gradientes de velocidade durante a agitação.

Em uma estação de tratamento de água a coagulação é realizada na unidade de mistura rápida, consiste em se distribuir de maneira rápida e homogênea o coagulante, utilizando-se energia hidráulica ou mecânica.

Em estações de tratamento de água a coagulação/floculação é entendida como a transformação das impurezas invisíveis, em partículas maiores, sendo etapas de grande importância em ETAs, porque delas depende a eficiência das unidades subsequentes, tais como sedimentação ou flotação e filtração.

2.2.1. Mecanismos de Coagulação

Como visto anteriormente, partículas coloidais possuem cargas elétricas negativas em suas superfícies, impedindo a aproximação das mesmas. Tornando-se necessário promover a alteração das suas características superficiais, principalmente, pela adição de sais de alumínio ou de ferro ou de polímeros sintéticos, caracterizando o fenômeno da coagulação, para que sejam posteriormente removidas por meio de sedimentação, flotação ou filtração.

Segundo Di Bernardo; Dantas (2005) a coagulação pode ser considerada como resultado individual ou combinado da ação de quatro mecanismos distintos: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização de cargas, adsorção e formação de pontes e varredura.

O mecanismo de coagulação predominante irá depender do valor do pH de coagulação, do tipo e dosagem de coagulante utilizado, das características da água, carga e concentração das partículas (O´ MÉLIA, 1972).

2.2.1.1. Compressão da camada difusa

Este mecanismo de coagulação ocasiona a desestabilização das partículas coloidais através da adição de íons de carga contrária. Segundo Di Bernardo; Dantas (2005), por volta de 1900, por meio da teoria DLVO foi mostrado que a desestabilização coloidal por um eletrólito ocorre em decorrência de interações eletrostáticas: íons de mesma carga são repelidos e íons de carga contrária são atraídos pelos colóides; quanto maior a carga do íon, menor a quantidade requerida para a coagulação. Ao desestabilizar colóides negativos, as concentrações molares dos metais sódio, cálcio e alumínio variam de 1000:10:1. Este fenômeno é explicado pela grande concentração de cargas positivas que causam excesso de íons na camada difusa, fazendo com que reduza o volume de sua esfera para manter-se eletricamente neutra, reduzindo o potencial elétrico e predominando a força de Van Der Waals. Um exemplo típico deste mecanismo ocorre quando águas doces com força iônica pequena misturam-se a água do mar, promovendo a formação de depósitos nas desembocaduras.

De acordo com os autores vale destacar dois aspectos relacionados com este mecanismo de coagulação:

- A quantidade de eletrólitos para conseguir-se a coagulação é, praticamente, independente da concentração de colóides na água;
- Para qualquer quantidade adicionada de eletrólitos, é difícil causar a reestabilização das partículas coloidais, ou seja, a reversão da carga das mesmas que passa a ser positiva.

Em geral, compressão da camada difusa, não é uma técnica de coagulação prática para tratamento de água, sendo mais utilizada no tratamento de efluentes industriais.

2.2.1.2. Adsorção e neutralização de cargas

Algumas espécies químicas são capazes de serem adsorvidas na superfície das partículas coloidais. Como tais espécies são de carga contrária à superfície dos colóides, ocorrerá à desestabilização.

De acordo com Di Bernardo *et al.* (2002), existem três diferenças básicas entre os mecanismos de compressão da camada difusa e adsorção e neutralização das cargas:

- as espécies adsorvíveis são capazes de desestabilizar os colóides em dosagens muito inferiores às necessárias para a compressão da camada difusa;
- a relação existente entre as concentrações dos colóides e a quantidade necessária de espécies desestabilizantes por adsorção segue relação estequiométrica;
- é possível ocorrer à reversão da carga superficial das partículas coloidais (reestabilização) quando ocorre dosagem excessiva do coagulante.

Para Di Bernardo; Dantas (2005) este mecanismo é muito importante quando o tratamento é realizado através da tecnologia de filtração direta, pois não há necessidade de produção de flocos para posterior sedimentação ou flotação, mas de partículas desestabilizadas que serão retidas no meio filtrante.

2.2.1.3. Varredura

Neste mecanismo, conforme a quantidade de coagulante, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons presentes na água poderá ocorrer à formação de hidróxidos metálicos como $\text{Al}(\text{OH})_3$, que possuem espaços vazios capazes de envolver o colóide e as partículas suspensas. É intensamente utilizado nas estações de tratamento em que se tem a floculação e a sedimentação antecedendo a filtração, pois os flocos resultantes são de maior tamanho e apresentam velocidades de sedimentação relativamente maiores do que os dos agregados obtidos com a coagulação realizada no mecanismo de adsorção neutralização de cargas.

2.2.1.4. Adsorção e Formação de Pontes

Este mecanismo é desenvolvido por intermédio da utilização de compostos orgânicos (polímeros) sintéticos ou naturais, utilizados como coagulantes; que podem apresentar sítios ionizáveis ao longo de suas cadeias podendo ser classificadas como: catiônicas, aniônicas e anfóteras.

A desestabilização por adsorção e formação de pontes ocorre quando um sítio de adsorção disponível na superfície do colóide é coberto, deixando outros sítios disponíveis para uma segunda adsorção. Um composto de cadeia longa (polímero) pode ser adsorvido na superfície de uma partícula, deixando segmentos livres para serem adsorvidos por outras partículas, fazendo a ligação entre elas, formando as pontes.

Para Di Bernardo; Dantas (2005) esse mecanismo caracteriza-se por envolver o uso de polímeros de grandes cadeias moleculares (massa molar $> 10^6$), os quais servem de ponte entre a superfície a qual estão aderidos e outras partículas. A figura 2.2 mostra uma definição esquemática da formação de pontes entre partículas com aplicação de polímeros orgânicos.

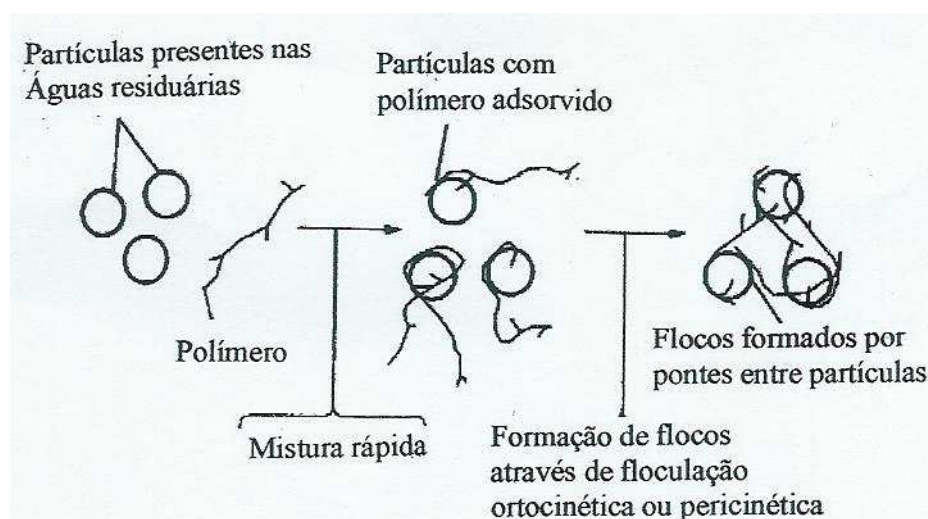


Figura 2.2. Definição esquemática da formação de pontes entre partículas com aplicação de polímeros orgânicos.

Fonte: Metcalf & Eddy (1991)

2.3. Flotação

2.3.1. Definição

A flotação é uma operação unitária que envolve três fases: líquida, sólida e gasosa, sendo utilizada para separar partículas suspensas ou materiais graxos ou oleosos de uma fase líquida. A separação é produzida pela combinação de bolhas de gás, geralmente o ar, com as partículas, resultando num agregado, cuja densidade é menor que a do líquido e sobe à superfície do mesmo, podendo ser coletada em uma operação de raspagem superficial (METCALF; EDDY, 1991).

A flotação é definida como um processo de remoção de partículas, no qual ocorre à introdução de microbolhas de ar que, quando em contato com as partículas, formam um aglomerado partícula-bolha de densidade aparente menor que o da água, que tende a flutuar até a superfície do tanque de flotação, onde é removido.

A flotação é a operação pela qual se consegue em um determinado sistema, a separação de “partículas” líquidas ou sólidas de uma fase líquida, introduzindo-se pequenas bolhas de gás, as quais aderem à superfície das “partículas”, aumentando o seu empuxo e provocando sua ascensão à superfície da fase líquida (REALI; CAMPOS, 1986).

2.3.2. Princípios Básicos

A interação partícula-bolha é o processo fundamental em flotação (NGUYEN, 2003). É um processo que depende muito das características superficiais /interfaciais do sistema partícula-bolha, envolvendo fenômenos que envolvem a hidrodinâmica do sistema, movimento de bolhas e partículas, adesão das bolhas às partículas e outros fatores cinéticos.

O processo da flotação pode ser analisado como uma probabilidade destes fenômenos, dada pela seguinte Equação:

$$P_f = P_c \cdot P_a \cdot P_s \quad (2.4)$$

Onde:

P_f = probabilidade de flotação

P_c = probabilidade de colisão partícula-bolha

P_a = probabilidade de adesão entre partícula-bolha

P_s = probabilidade de formação de um agregado partícula-bolha estável

Várias variáveis afetam estas probabilidades podendo citar (CHAVES; LEAL FILHO, 2002):

- A probabilidade de adesão, P_a está diretamente relacionada ao ambiente químico predominante em um dado sistema de flotação. Isto é, poderá ser influenciada pelos reagentes, sendo controlada predominantemente pelas forças superficiais;
- A probabilidade de colisão, P_c é especialmente influenciada pelo tamanho da partícula, da bolha e, em geral, pelas condições hidrodinâmicas, sendo independente da hidrofobicidade da partícula;
- Já a probabilidade de formação de um agregado partícula-bolha estável, P_s apresenta uma relação direta entre a força de adesão do agregado partícula-bolha e o ângulo de contato. Quanto maior o valor do ângulo maior é esta força e, neste caso, maior é o valor de P_s na Equação.

2.3.4- Tipos de flotação

Dependendo da forma como são geradas as bolhas, a flotação pode ser classificada em vários tipos.

2.3.4.1. Flotação por ar disperso

A flotação por ar disperso é bastante difundida na indústria mineral. É uma separação feita em suspensão aquosa (polpa), através da qual bolhas de ar são introduzidas.

A formação de bolhas de ar é feita por agitação do líquido, a pressão atmosférica; os diâmetros das bolhas são relativamente grandes, cerca de $1\mu\text{m}$, quando comparados com o tamanho dos sólidos (MAIA; BEZERRA, 1981 *apud* SOBRINHO *et al.*, 2001).

As partículas são agitadas e, dependendo de sua capacidade de se prenderem a bolhas de gás (geralmente ar), podem ser ascendentemente conduzidas por estas até a interface líquido-ar, onde ficam retidas em uma espuma. As partículas de espécies hidrofóbicas têm maior facilidade de adesão às bolhas de ar e, conseqüentemente de serem flotadas, enquanto que as partículas das demais espécies mantêm inalteradas a sua rota, permanecendo na polpa.

A propriedade de determinadas espécies aderirem às bolhas de ar no seio da polpa é designada por hidrofobicidade, e exprime a tendência dessa espécie ter maior afinidade pela fase gasosa que pela fase líquida. Este comportamento, entretanto, não é regra no reino mineral, pois praticamente todas as espécies minerais imersas em água tendem a molhar sua superfície, ou seja, tem maior afinidade pela fase líquida, comportamento este designado por hidrofiliidade. A experiência mostra, entretanto, que o comportamento hidrofílico das espécies minerais pode ser bastante alterado pela introdução de substâncias adequadas no sistema. Pode-se afirmar, com certeza, que qualquer substância mineral pode ser tornada hidrofóbica mediante a adição de substâncias à polpa. Ainda mais, é possível, estando presentes duas espécies minerais, induzir a hidrofobicidade em apenas uma delas, mantendo a outra hidrofílica, o que significa na prática, a possibilidade de se induzir uma hidrofobicidade seletiva (CHAVES; LEAL FILHO, 2002).

As desvantagens da flotação por ar disperso são geração de elevado grau de turbulência, capaz de quebrar os flocos formados, excessivo tamanho das bolhas geradas e baixa concentração de sólidos totais no lodo flotado, trazendo dificuldades de manejo, inadequada, portanto, para o tratamento de água para abastecimento (ZABEL, 1984).

2.3.4.2. Flotação eletrolítica ou eletroflotação

O processo se baseia na eletrólise, ou seja, a geração de bolhas de hidrogênio e oxigênio em uma solução aquosa diluída, pela passagem de uma corrente elétrica, de baixa voltagem, entre dois eletrodos imersos. O diâmetro das bolhas é geralmente menor que o observado nos outros processos de geração de bolhas e FAD, ficando ao redor de 30 μm , sendo liberadas com pouca turbulência. Estes aspectos tornam o sistema conveniente para remoção de flocos frágeis e de baixa densidade (ZABEL, 1984). Esse autor ressalta que o processo não tem sido empregado no tratamento de água potável, face ao risco de contaminação com metais pesados

oriundos da dissolução dos eletrodos, ficando sua aplicação restrita ao adensamento de lodos e a situações particulares.

2.3.4.3. Flotação por ar dissolvido

No sistema de flotação por ar dissolvido as partículas sólidas são removidas da água fazendo-as flutuar (flotar) reduzindo sua densidade pela adesão de pequeníssimas bolhas de ar. Neste processo, as bolhas de ar são geradas pela súbita redução de pressão na corrente líquida saturada de ar, proveniente da câmara ou tanque de saturação. Por meio de uma bomba, uma pequena quantidade de água clarificada é elevada à pressão de 4 a 5,5 atm e conduzida ao tanque de saturação, onde se torna saturada de ar alimentado por um compressor. Esta água tem sua pressão diminuída bruscamente, liberando uma grande quantidade de microbolhas de ar, que aderem aos flocos já formados, fazendo-os flutuar. Os flocos sobem e se acumulam na superfície do tanque, formando uma capa de lodo de espessura crescente, que se move periodicamente mediante raspadores superficiais. A FAD permite maior flexibilidade ao processo, já que pode utilizar uma maior faixa de pressão, possibilitando um controle mais eficiente da quantidade de ar desprendido que, aliado ao pequeno tamanho das bolhas, constitui a principal vantagem no tratamento de efluentes (SOBRINHO *et al.*, 2001).

2.3.5. Princípios Básicos da FAD

2.3.5.1. Influência das microbolhas de ar

As dimensões das microbolhas de ar formadas na FAD são um dos fatores que determinam o sucesso do processo. A faixa recomendável de tamanho está entre 10 e 100 μm , com valor médio de 50 μm . De acordo com Rijk *et al.* (1994) *apud* Lacerda (1997) podem ser citadas uma série de vantagens das bolhas menores com relação as maiores:

- Menor ângulo de contato com as partículas;
- Maior facilidade de penetração nos espaços vazios dos flocos;
- Para uma mesma quantidade de ar dissolvido, bolhas menores produzem uma maior concentração;
- Menor velocidade ascensional, levando a um maior tempo de detenção da bolha no tanque de flotação.

Além disso, as bolhas de ar menores, além de apresentarem maior superfície específica para uma mesma quantidade de ar dissolvido, necessitam deslocar menor quantidade de água da superfície das partículas onde vão aderir, facilitando a agregação floco-bolha (DI BERNARDO, 1993). De acordo com Longhurst & Grahan (1987) *apud* Assis (2006) as bolhas de ar devem ter diâmetro menor que os flocos para permitir sua aderência na superfície das partículas.

De acordo com Adamson (1967) *apud* Teixeira (2003), quanto maior o ângulo de contato entre a partícula e a bolha, maior a hidrofobicidade das partículas, facilitando a adesão das mesmas as bolhas. É também conhecido que o sucesso da aderência das bolhas de gás na superfície das partículas depende, além da hidrofobicidade dos flocos, da hidrodinâmica do sistema.

2.3.5.2. Influência da coagulação/floculação na FAD

Além do tamanho das microbolhas de ar, o sucesso da FAD irá depender também das etapas de coagulação/floculação.

Em geral, no tratamento de água, o pH de coagulação deve ser investigado para que se obtenha eficiente clarificação do efluente, isto pode ser feito através da adição de um ácido ou de uma base. A otimização dos demais parâmetros de coagulação/floculação (dosagem, gradiente de velocidade, tempos de coagulação e floculação) é de fundamental importância na eficiência do processo, o que pode ser conseguido por meio da realização de estudos criteriosos em laboratório.

De acordo com Edzwald (1995) existem diferenças entre um floco preparado para ser sedimentado e outro para ser flotado. Este autor considera que os flocos a serem flotados devem possuir tamanho pequeno, já que na flotação, a densidade do agregado partícula-bolha deve ser inferior à da água. De acordo com Ødegaard (1995), para a formação de flocos pequenos, ideais para a flotação, é necessária a utilização de gradientes de velocidade (G) maiores do que os utilizados na sedimentação.

O tempo de floculação apropriado para a geração de flocos com características adequadas para a flotação diverge entre os pesquisadores, podendo estar relacionado à qualidade da água bruta pesquisada, particularmente com relação à concentração e distribuição do tamanho das

partículas e o mecanismo de coagulação predominante (LACERDA, 1997). De acordo com Richter (2001) o tempo de floculação adotado na prática nos sistemas FAD na América Latina, em geral, assume valores entre 3,5 a 24 minutos.

Em relação ao mecanismo de coagulação, não há uma concordância entre os pesquisadores sobre qual o melhor mecanismo de coagulação para FAD, pois cada um dos mecanismos oferece vantagens distintas com relação à adesão flocos-bolha, podendo levar a bons resultados no tratamento da água (LACERDA, 1997). De acordo com Janssens (1992) *apud* Lacerda (1997), o mecanismo de adsorção por neutralização de cargas leva a formação de flocos com características ideais para a remoção por FAD (hidrofobicidade e neutralização de cargas). Já o mecanismo de varredura tende a formar flocos maiores e de estrutura aberta, ocasionando menor densidade e maiores áreas de contatos com as bolhas, favorecendo a adesão flocos-bolha (FUKUSHI; TAMBO; MATSUI, 1995).

2.3.6. Tipos de flotação por ar dissolvido

A flotação por ar dissolvido pode ser classificada de três formas dependendo do método de pressurização empregado: pressurização total, parcial e com recirculação, como mostrado nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5.

2.3.6.1. Pressurização total do afluente

Na FAD com pressurização total do afluente, toda a vazão afluente é pressurizada. Esse arranjo é utilizado quando o líquido a ser clarificado possui material em suspensão que possa ser submetido à intensa agitação, o que é realizado na bomba de pressurização.

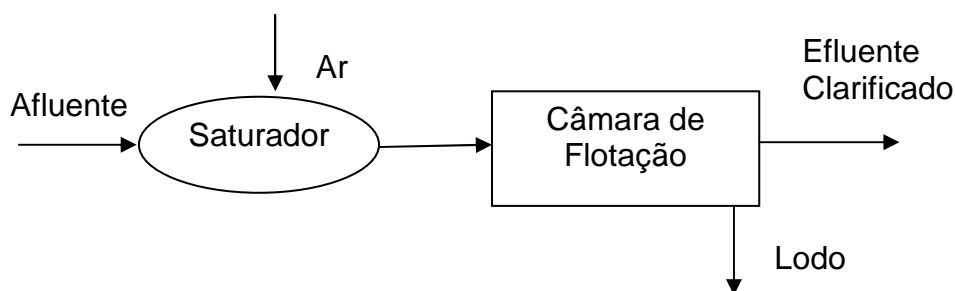


Figura 2.3. FAD - Pressurização total do afluente.

2.3.6.2. Pressurização parcial do afluente

Na FAD com pressurização parcial do afluente, apenas uma parte da vazão afluente é pressurizada. Esse arranjo, tal como no caso da pressurização total do afluente, não deve ser aplicada em situações onde às etapas de coagulação e floculação, necessária a eficiência do processo, antecede a flotação, pois a passagem pelos dispositivos de saturação e injeção causa a ruptura dos flocos (GOCHIN, 1990 *apud* PINTO FILHO, 1999). Outra desvantagem desses dois arranjos, segundo o autor, reside na presença de sólidos em suspensão na água bruta afluente a unidade de FAD, favorecendo o entupimento dos dispositivos de injeção.

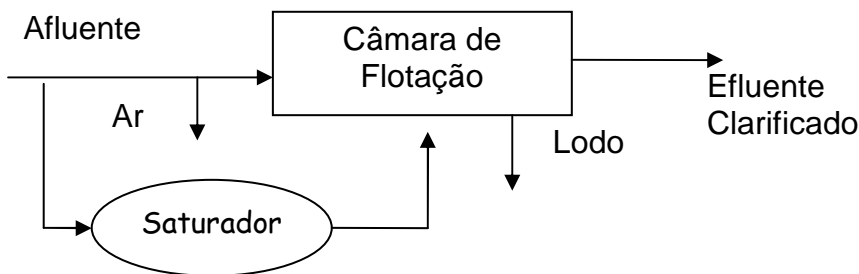


Figura 2.4. FAD-Pressurização parcial do afluente.

2.3.6.3. Recirculação e pressurização de parte do efluente

É o arranjo mais utilizado para o tratamento de esgotos e água para abastecimento, devido à presença de flocos frágeis. Nesse sistema, parte do efluente clarificado é recirculado, pressurizado e saturado de ar, sendo então introduzido na câmara de flotação, onde a redução de pressão provoca a liberação de microbolhas.

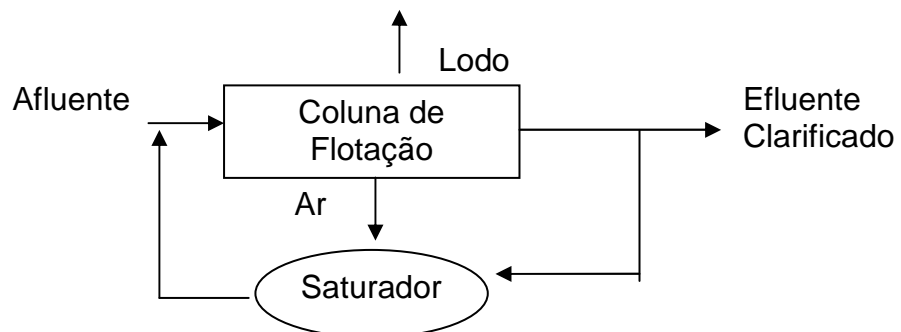


Figura 2.5. FAD-Recirculação e pressurização de parte do efluente.

2.3.7. Principais parâmetros operacionais na flotação por ar dissolvido

A seguir serão descritos os principais parâmetros operacionais da FAD: taxa de recirculação, razão ar-sólido, taxa de aplicação superficial e pressão de saturação.

2.3.7.1. Taxa de recirculação

A relação entre a vazão da água pressurizada (q) encaminhada à coluna de flotação e a vazão (Q) da unidade de flotação são denominadas taxa ou razão de recirculação (R), como mostrado na Equação 2.5:

$$R = \frac{q}{Q} \quad (2.5)$$

A quantidade de água a ser introduzida na coluna de flotação é então calculada em função do volume da mesma. A taxa mínima de recirculação recomendada é de 5% (DI BERNARDO, 2002).

A quantidade de ar fornecida a câmara de flotação pode ser variada mediante alteração da taxa de recirculação, da pressão na câmara de saturação ou por ambas. De acordo com Zabel (1984) *apud* Pinto Filho(1999), experimentos variando a fração de recirculação e a pressão demonstraram que a qualidade da água tratada era dependente somente da quantidade de ar fornecido ao sistema, independente dos valores individuais de pressão e de recirculação. Entretanto, em estudo realizado por Reali (1994) recomenda-se que antes de serem adotados valores elevados de fração de recirculação, seja maximizada a pressão de operação na câmara de saturação.

2.3.7.2- Razão ar / sólidos

De acordo com Sobrinho *et al.* (2001), a eficiência de um sistema de FAD depende, principalmente, da relação ar-sólido (A/S), pois o desempenho do sistema de flotação depende de se ter uma quantidade de bolhas de ar suficiente para flotar substancialmente todos os sólidos suspensos presentes. Se a quantidade de ar for insuficiente, poderá resultar apenas numa flotação parcial dos sólidos; uma quantidade de ar excessiva poderá não produzir

qualquer melhoria ao sistema, sendo este parâmetro definido como a relação entre a quantidade de ar liberada da solução e a quantidade de sólidos presentes no afluente (kg de ar /kg SS).

Richter (2001) explica que a quantidade de ar necessária para flotar uma suspensão é aquela em que a densidade do complexo ar-partícula é menor do que a densidade do líquido. A densidade do complexo ar-partícula pode ser dada por:

$$d_c = \frac{V_a \cdot d_a + V_s \cdot d_s}{V_a + V_s} \quad (2.6)$$

Onde:

d_c - densidade do complexo ar- partícula

d_a - densidade do ar

d_s - densidade do sólido

V_a - volume de ar aderido a partícula sólida

V_s - volume da partícula sólida

A relação entre as massas de ar e do sólido é, por definição:

$$\frac{A}{S} = \frac{V_a d_a}{V_s d_s} \quad (2.7)$$

Combinando estas duas equações e sabendo que a quantidade mínima de ar requerida para flotar é aquela em que a densidade do complexo ar-partícula é igual à densidade do líquido ($d_c = d_l$), resulta:

$$m_{A/S} = \frac{1 - \frac{d_l}{d_s}}{\frac{d_l}{d_s} - 1} \quad (2.8)$$

onde:

d_l - densidade do líquido; $m_{A/S}$ - relação mínima necessária ar/sólidos para flotar

Uma vez definida a relação ar/sólidos, a taxa de recirculação requerida para uma determinada pressão de saturação é:

$$R = \frac{q}{Q} = m_{A/S} \frac{C}{C_a} \quad (2.9)$$

Onde:

$$C_a = K_H (\eta P - 1) \quad (2.10)$$

Substituindo 2.10 em 2.9, resulta:

$$R = \frac{m_{A/S} \cdot C}{K_H (\eta P - 1)} \quad (2.11)$$

Onde:

C- concentração de sólidos na suspensão influente

C_a - concentração de ar na água de recirculação

A- massa de ar necessária para flotar

K_H - constante da lei de Henry

η - eficiência da câmara de saturação

P- pressão de saturação

2.3.7.3- Taxa de aplicação superficial

A taxa de aplicação superficial (TAS), também chamada de taxa de escoamento superficial (TES) ou taxa de carregamento hidráulico, é a vazão de líquido sobre a área do flotor por unidade de tempo, sendo dada por $m^3/m^2 \cdot dia$. De acordo com Di Bernardo (1993), semelhante aos conceitos desenvolvidos para os decantadores, segundo o qual a taxa de escoamento

superficial é numericamente igual à velocidade crítica de sedimentação, no caso da flotação, a velocidade crítica ascensional (V_{casc}) é também numericamente igual a TES, isto é, todas as partículas com velocidade maior ou igual a V_{casc} serão removidas na flotação. Portanto, para uma determinada vazão, quanto maior a velocidade ascensional das partículas, maior será a TES e menor será a área requerida para a câmara de flotação.

2.3.7.4- Pressão de saturação

De acordo com Richter (2001) quando se introduz o ar e a água na câmara de saturação a uma pressão absoluta P , o ar se dissolve na água até uma concentração de saturação C_{sat} de acordo com a lei de Henry:

$$C_{sat} = \eta K_H P \quad (2.12)$$

Onde:

K_H - constante da lei de Henry, dada para o ar

η - eficiência da câmara de saturação

P - pressão de saturação

Pela lei de Henry:

- A massa de gás dissolvido é diretamente proporcional à pressão;
- O gás em liberdade e a mesma pressão ocupa o mesmo volume que quando dissolvido;
- Diminuindo a pressão, o gás se liberta.

A solubilidade do ar na água depende, das variáveis: temperatura, pressão e salinidade.

Se a pressão for reduzida a taxa de recirculação tem que ser aumentada de modo a fornecer a mesma quantidade de ar no sistema de flotação (BRATBY, 1982).

De acordo com Edzwald, 1995, a faixa de pressão de saturação deve ficar entre 400kPa e 600kPa, nunca devendo ser inferior a 300, para que seja garantida a formação de bolhas.

Para Di Bernardo (1993) a pressão de saturação irá influenciar no tamanho das bolhas. De acordo com Rick et al. (1994) *apud* Edzwald (1995) o aumento da pressão de saturação leva a redução do diâmetro médio das bolhas, embora o ganho na redução do tamanho de bolha vá ficando cada vez menor, à medida que a pressão de saturação se eleva. Pressões acima de 500 kPa pouco alteram o diâmetro da bolha.

2.3.8. Vantagens e desvantagens entre decantação e flotação

A FAD apresenta algumas vantagens, motivo pelo qual tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores da área de saneamento, visando determinar e otimizar os parâmetros influentes no processo e descobrir novas aplicações na área. A seguir serão citadas algumas dessas vantagens.

De acordo com Edzwald; Wingler (1990) *apud* Lacerda (1997), a FAD apresenta maiores custos operacionais que a decantação quanto a consumo energético. Porém apresenta algumas vantagens tais como: opera a altas taxas de aplicação superficial, levando a menores tempos de detenção (ou retenção), sendo mais econômica em termos de custos de investimento, por apresentar, menores gastos com construção civil; a não necessidade de formação de flocos grandes implica tanto na redução do tempo de floculação quanto no menor consumo de coagulantes.

O custo de uma nova estação de tratamento com FAD equivale a 50-60% de uma estação com decantação. Para conversão de uma unidade existente, o custo seria de 10 a 30 % de uma unidade convencional de capacidade equivalente ao acréscimo obtido por FAD. O custo operacional de unidades FAD é comparável ao custo de estações convencionais, com possibilidade de produção de uma água de qualidade não inferior a de uma estação convencional; por esta razão a FAD vem sendo considerada uma alternativa atraente em novos projetos ou na ampliação de estações existentes (RICHTER, 2001).

2.4. Produtos utilizados na coagulação/floculação da água

A maior parte dos coagulantes utilizados no tratamento de água são sais, sulfato ou cloreto que contêm os íons Al^{+3} e Fe^{+3} , polieletrólitos ou coagulantes naturais. A seguir serão descritas algumas características dos coagulantes, sulfato de alumínio e *Moringa oleifera*.

2.4.1. Sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio já era utilizado pelos egípcios para tratamento de água 2000 anos a.C., sendo fácil o seu transporte e manejo. Seu custo é baixo e produz-se em várias regiões brasileiras.

O sulfato de alumínio quando adicionado à água libera íons metálicos trivalentes Al^{+3} . Estes íons sofrem reações de hidrólise, como as expressas na Figura 2.6, que são algumas das que podem ocorrer se houver o íon Al^{+3} .

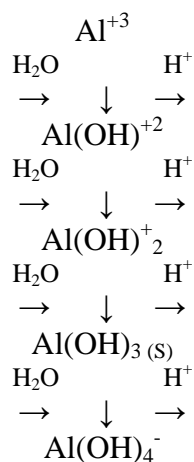


Figura 2.6. Exemplo de reações de hidrólise do íon Al^{+3} .

2.4.2. *Moringa oleifera*

Em muitos países do mundo, diferentes espécies de plantas já são utilizadas como coagulantes naturais para clarificação de águas que se destinam ao consumo humano. A maioria dessas plantas é usada de forma tradicional e algumas foram descobertas em laboratório (GERDES, 1997). A Tabela 2.1 apresenta as famílias botânicas e o número de espécies por família, que são conhecidas pelas propriedades coagulantes das suas sementes.

Tabela 2.1 – Número de espécies vegetais com capacidade coaguladora (JAHN, 1986).

Família	Número de espécies usadas para clarificar água bruta
<i>Acanthaceae</i>	3
<i>Anacardiaceae</i>	5
<i>Annonaceae</i>	3
<i>Araceae</i>	2
<i>Cactaceae</i>	11
<i>Capparidaceae</i>	8
<i>Malvaceae</i>	5
<i>Moringaceae</i>	7
<i>Papilionideae</i>	13
<i>Tiliaceae</i>	7

Das muitas espécies de plantas testadas em todo mundo, as da família das *Moringaceae*, principalmente, as espécies *Moringa oleifera* e a *Moringa stenopetola* apresentam grande capacidade de clarificar águas que contenham impurezas. A *Moringa oleifera* é uma planta tropical, originária do noroeste indiano, amplamente distribuída em diversos países, como mostra a Tabela 2.2.

Na região do nordeste brasileiro é conhecida como “Quiabo de quina” ou “Lírio branco” (PIO CÔRREA, 1984). Trata-se de uma planta arbórea, de crescimento rápido, com propagação feita por meio de sementes, mudas ou estacas. A *Moringa* suporta longos períodos de seca, solos pobres e cresce bem em condições semi-áridas. A espécie é forte, cresce rapidamente e não requer tratos (GERDES, 1997).

Tabela 2.2-Espécies mais comuns de *Moringa* e sua distribuição pelo mundo (JAHN, 1986).

Ordem: Cappridales. Família: Moringaceae	
Espécies	Distribuição pelo mundo
<i>Moringa oleifera Lam</i>	Pantropical
<i>Moringa concanensis</i>	Índia
<i>Moringa peregrina</i>	Egito, Sudão, Península arábica
<i>Moringa stenopetala</i>	Etiópia, Quênia
<i>Moringa longituba</i>	Somália
<i>Moringa ovalifolia</i>	Namíbia
<i>Moringa drouhardii</i>	Madagáscar

É uma planta com grande importância econômica na indústria e na medicina; muitas partes da planta têm sido usadas. Folhas, flores e vagens verdes são comestíveis; efeito hipocolesterolêmico foi encontrado em extrato de folhas e frutos; as sementes contêm atividades hipotensiva, antioxidante, e constituem um poderoso agente quimio-preventivo (SANTOS, 2007).

Segundo Jahn (1998), as sementes contém, entre 27 e 40% de óleo que apresenta a característica de não secar. Esta propriedade permitiu o uso em mecanismos de precisão como os dos relógios. A partir do século XIX, foi usada também no Haiti como óleo de cozinha e ingredientes na fabricação de sabão durante a Primeira Guerra Mundial. Atualmente, é usada na indústria de cosméticos para fixar substâncias.

As suas flores são bastante perfumadas, de cor branca ou bege, pintada de amarelo na base. O fruto é uma espécie de vagem normal, com um grande número de sementes. Suas folhas são ricas em vitamina “A” e “C”, fósforo, cálcio, ferro e proteínas, servindo como alimento para o ser humano e para os animais por seu teor nutritivo. Especialistas dizem que a solução para acabar com a desnutrição é o uso de alimentos ricos em nutrientes essenciais ausentes na dieta das pessoas. Na Índia, todas as partes da planta são usadas na medicina natural, porém, a química e a farmacologia das diferentes partes da planta são ainda pouco conhecidas (RANGEL, 2003). As Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 mostram algumas partes da *Moringa oleifera*.



Figura 2.7. Árvore que produz *Moringa oleifera*



Figura 2.8. Vagens com sementes da planta que produz *Moringa oleifera*

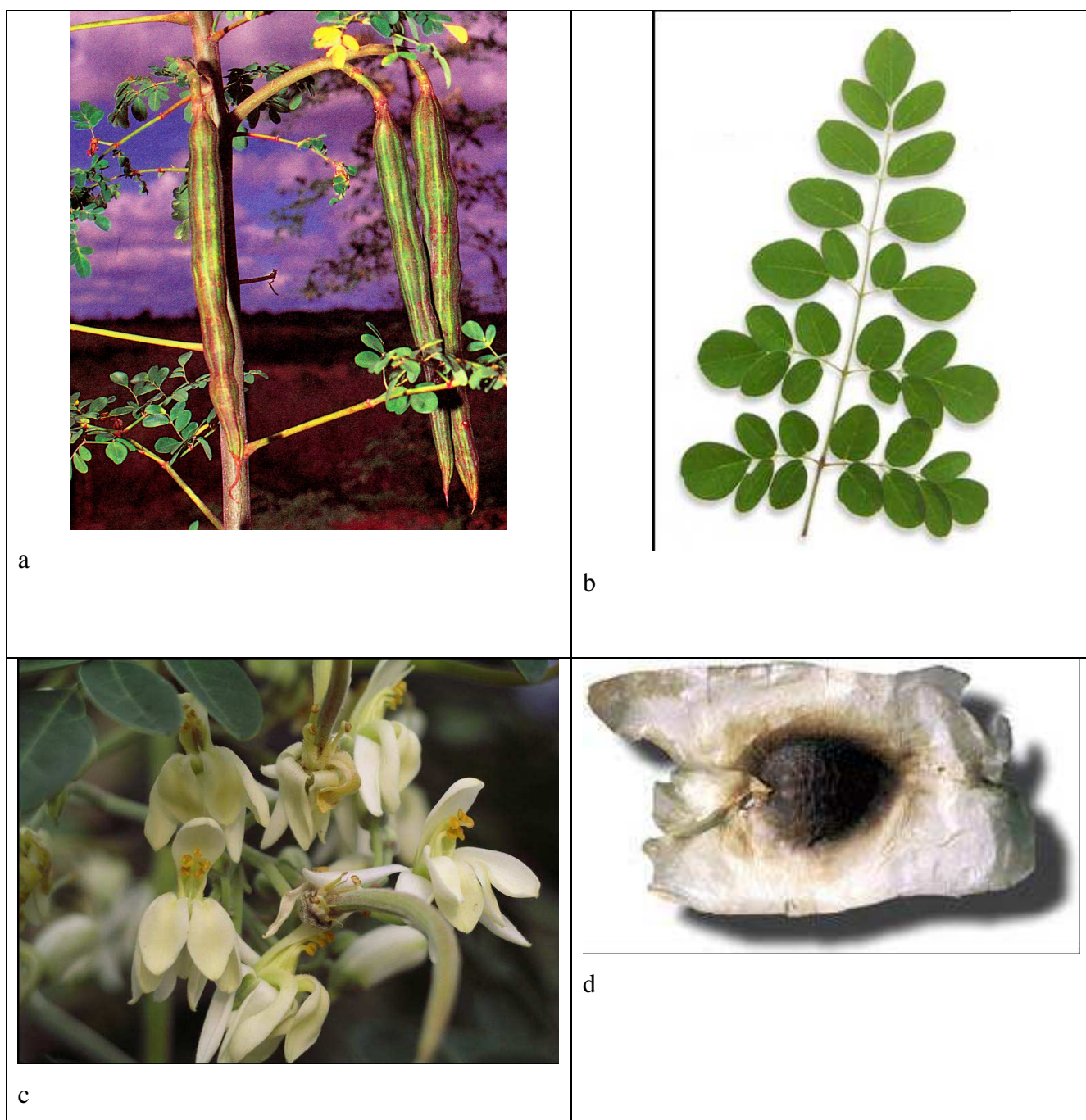


Figura 2.9.a- Frutos da planta que produz *Moringa oleifera*; b- Folha da planta que produz *Moringa oleifera*; c- Flores da planta que produz *Moringa oleifera*; d- Semente de *Moringa oleifera*.

O uso tradicional das sementes de *Moringa oleifera* para tratamento doméstico da água foi iniciado em áreas rurais do Sudão, onde as mulheres armazenam água do Rio Nilo em recipientes de barro e acrescentavam as sementes pulverizadas contidas em um saco de pano pequeno fixado por um fio (GERDES, 1997).

A capacidade da *Moringa* de coagular colóides em águas que apresentam cor e turbidez é atribuída a uma proteína isolada por diversos pesquisadores. Jahn (1998) identificou seis polipeptídios na *Moringa oleifera* de peso molecular entre 6-16 kDa. Gassenschmidt *et al.* (1995) caracterizaram a proteína como uma molécula catiônica de massa molecular 6,5 kDa (daltons) e ponto isoelétrico em pH 10. Ndabigengesere; Narasiah; Talbot (1995) identificaram a presença de uma proteína catiônica dimérica de alto peso molecular (12-14 kDa) e ponto isoelétrico entre 10 e 11. Ghebremichael *et al.* (2005), verificaram que as proteínas têm ponto isoelétrico 9,6 e massa molecular menor que 6,5 kDa.

Estudos realizados por Jahn (1986) demonstraram a não existência de toxicidade da *Moringa oleifera* para humanos e animais e a presença de propriedades coagulantes e bactericidas nas sementes. De acordo com Schwarz (2000) a *Moringa oleifera* pode clarificar não somente águas com alta turbidez, mas também com média ou baixa turbidez.

Dentre as vantagens da utilização da *Moringa oleifera* no tratamento de água podem ser citadas:

- O processo não modifica o pH da água e a condutividade após o tratamento;
- Não se tem alteração no sabor da água;
- Não causa problemas de corrosão;
- Como coagulante, a *Moringa oleifera* é não tóxica sendo biodegradável;
- O lodo formado é biodegradável e conseqüentemente processos envolvendo este coagulante representam uma tecnologia ambientalmente correta. Observa-se ainda um volume de quatro a cinco vezes menor do que o volume de lodo químico produzido pelo alumínio;
- Como coagulante, a *Moringa oleifera* pode ser um substituto potencial viável ao alumínio, sendo um método fácil e de baixo custo para países em desenvolvimento;

Dentre as desvantagens, podem ser citadas:

- Possibilidade de aumento de teor de carbono total da água tratada devido à incorporação da matéria orgânica adicional originária das sementes e que acompanha o agente coagulante efetivo, podendo causar problemas de cor, odor e sabor, se a dose adicionada for muito alta;

- O coagulante não pode ser utilizado na sua forma pura, ele deve ser preparado antes, sendo que o extrato aquoso permanece ativo por pouco tempo após ser preparado, 3- 4 dias (Okuda et al. 2001 a).

A idade da árvore na primeira frutificação é variável, em geral, considera-se que a *Moringa oleifera* frutifica no primeiro ano nas condições ideais de manejo. Nas regiões semi-áridas da África, considera-se que a *Moringa oleifera* frutifica a partir do segundo ano (WOLFROM NIGG, 1993 *apud* ALMEIDA NETO, 2008). A floração acontece geralmente no final da estação úmida, a perda das folhas ocorre no início do período seco. Segundo Jahn (1986) o comprimento das vagens da *Moringa oleifera* é muito variável e pode ser classificado em três grupos: vagens curtas com um comprimento variando entre 15 a 25 cm; vagens médias com um comprimento variando entre 25 a 40cm e vagens longas com um comprimento variando entre 50 a 90 cm.

Foi estimado que o número máximo de vagens por árvore é de 300 vagens no Egito, Sudão e Quênia (WOLFROM NIGG, 1993 *apud* ALMEIDA NETO, 2008). Porém, na Índia, Jahn (1986) chegou a calcular produção de 1000 até 1600 vagens por árvore, podendo-se considerar que o número satisfatório de sementes oscila entre 10 e 20 por vagem. O mesmo autor classificou o nível de produção anual em três níveis aproximados: baixo-2000 sementes/planta, médio-8000 sementes/ planta e elevado-24000 sementes/ planta. Estes números de produtividade apresentam grandes variações de acordo com os países, o clima, a disponibilidade de água e o manejo da árvore.

De acordo com Goh (2005) *apud* Katayon *et al.* (2005), o custo aproximado do cultivo produzindo 1 quilograma (3400 sementes) da *Moringa oleifera* é aproximadamente US\$2. Embora o custo da *Moringa oleifera* pareça mais caro do que o alumínio (1 quilograma:aproximadamente US\$1), é mais benéfico às comunidades em termos de saúde e da economia. As comunidades poderiam se beneficiar da venda das sementes às companhias ou às instituições que processam para produzir o coagulante ou o óleo.

Sem dúvida, esta não seria uma proposta aplicável imediatamente porque necessita numerosas pesquisas e ajustes. Porém, não é uma proposta utópica já que algumas experiências no mundo estão se revelando positivas como no Malawi (SUTHERLAND *et al.* 1994). Assim, a

possibilidade de utilizar um coagulante natural, produzido no local representa um grande potencial na luta contra os problemas ligados ao consumo de água não potável.

No Nordeste é possível plantar a *Moringa oleifera* em qualquer lugar da propriedade. Só não deve ser plantada nos solos mais úmidos porque não agüenta solos encharcados e com espaçamento de 3 a 5 metros entre as plantas. Realizar a poda das plantas todo ano, na altura de 1 metro e meio a 2 metros, evita que cresça demais e que suas sementes fiquem muito altas e difíceis de colher. A poda também faz com que essa árvore produza mais ramos e mais sementes. Realizar a poda depois de cada colheita pode levar à produção de até três colheitas por ano (CAPRINET, 2004).

Capítulo 3

Estado da Arte

3. Estado da arte

3.1. Flotação por ar dissolvido (FAD)

O processo de flotação é utilizado há mais de 100 anos na indústria de mineração para separar certo mineral de uma mistura heterogênea (RICHTER, 2001). A flotação por ar dissolvido é um dos vários métodos de flotação. Segundo Gregory (1997) a patente para o processo de flotação por ar dissolvido foi registrada em 1924, sendo utilizado inicialmente para recuperação das fibras na indústria papelreira.

O uso da FAD para clarificação de água é uma técnica utilizada primeiramente em 1960 na África do Sul e Escandinávia (LONGHURST; GRAHAM, 1987 *apud* EDZWALD, 1995; WORTEL, 1991 *apud* EDZWALD, 1995; HAARHOFF; VAN VUUREN, 1993 *apud* EDZWALD, 1995). Offringa (1995) descreve as experiências com FAD, aplicadas nas estações de tratamento de água no sul da África, há mais de trinta anos, incluindo espessamento de lodo, tratamento de águas eutrofizadas e vários efluentes industriais. Zabel (1985) cita que até 1985, só na Grã Bretanha já existiam mais de vinte estações de tratamento de água em operação ou em construção que utilizavam FAD como processo de pré-tratamento. Na Finlândia, a FAD substituiu a decantação no tratamento de água desde o início de 1970 (KIURU, 2001). Sendo amplamente utilizada na Bélgica, Noruega, Reino Unido, Ásia e Austrália (GREGORY, 1997).

No Brasil, as pesquisas se iniciaram desde 1976 no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, USP (REALI; CAMPOS, 1986). Lobato; Faitanin; Moreschi (1995), relatam que a primeira unidade em escala industrial para clarificação de água potável no Brasil foi a ETA-Meaípe, no Espírito Santo, operando desde 1994. Atualmente a flotação por ar dissolvido é utilizada em diversas estações de tratamento de água do Brasil, podendo citar: ETA-Iraí-PR, ETA -Meaípe-ES, ETA -Mantenópolis-ES, ETA-Manaus-AM e ETA-Brasília-DF.

De acordo com Reali (1991) e vários outros autores a FAD se constitui eficiente para clarificação de águas de abastecimento, nos casos em que se tem águas com baixa turbidez e

cor elevada ou com alta concentração de algas, fornecendo grande vantagem em relação à sedimentação.

Bunker *et al.* (1995) investigaram parâmetros do pré-tratamento como tempo de floculação e intensidade da mistura na floculação utilizando diferentes coagulantes, sulfato de alumínio, sais de ferro e vários policloreto de alumínio (PACs). Os autores verificaram que estes coagulantes foram efetivos na FAD sob condições favoráveis como pH, dosagem e tempo de floculação. A performance da flotação aumentou significativamente com o aumento da intensidade da mistura na floculação (gradiente de velocidade).

Edzwald (1995) discutiu alguns princípios da FAD como tamanho e formação de bolhas, interação partícula-bolha, quantidade de ar fornecido, modelagem das zonas de reação e clarificação no tanque de flotação. O autor verificou, dentre outras coisas, que a FAD não pode ser considerada como um processo separado, mas integrado com a planta de todo o tratamento. Condições favoráveis de flotação para ligação ou adesão das bolhas às partículas requerem a redução de carga das partículas e produção de partículas hidrofóbicas ou pontos hidrofóbicos na superfície das partículas.

Lacerda (1997) avaliou a influência do pH de coagulação, da dosagem de coagulante e do tempo de floculação no tratamento por FAD de águas de baixa turbidez e presença de algas, utilizando sulfato de alumínio como coagulante, em equipamento em escala de bancada e piloto. Os resultados encontrados mostraram que elevadas eficiências de remoção, tanto de turbidez quanto de algas, podem ser conseguidas para diferentes valores de pH, desde que se trabalhe na faixa ótima de dosagem de coagulante. A adoção de tempos de floculação longos levou a melhores eficiências de remoção da turbidez e algas na FAD seguida de filtração.

Marchetto; Reali (1997) avaliaram o desempenho de uma unidade FAD em escala piloto, com escoamento horizontal entre placas (com baixo número de Reynolds), aplicada ao tratamento de água para abastecimento contendo cor aparente moderadamente elevada (100 uC) e baixa turbidez (6,0 uT), investigando alguns parâmetros como taxa aparente de aplicação superficial e quantidade de ar fornecida, na eficiência da flotação. A unidade proposta apresentou excelente desempenho no tratamento da água em estudo, operando com altas taxas e requerendo valores de quantidade de ar menores que aqueles exigidos em unidades convencionais de flotação.

A FAD pode ser utilizada como sistema de pós-tratamento em processos distintos de tratamento de esgotos. Pinto Filho (1999) avaliou a eficiência do processo para efluente secundário do processo de lodos ativados da ETE-Sul e efluentes de reator UASB e lagoa de alta taxa da ETE Paranoá, estações de tratamento de esgotos operadas pela CAESB em Brasília, DF. Foi avaliada a influência das condições do pré-tratamento (dosagem e tempo de floculação), e a influência dos parâmetros de processo de flotação (taxa de aplicação superficial e taxa de recirculação) na eficiência do processo, utilizando sulfato de alumínio como coagulante, em equipamento em escala de bancada. Os resultados encontrados comprovaram o potencial da FAD em produzir efluentes de qualidade tratando amostras com características físico-química distintas.

Reali *et al.* (2000) verificaram a influência do gradiente médio de velocidade e do tempo de floculação na eficiência de uma unidade de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório aplicada para o tratamento de água de abastecimento. Foram otimizadas dosagens de coagulante (sulfato de alumínio) e pH de coagulação, condições de mistura rápida (tempo e gradiente médio de velocidade) e quantidade de ar fornecida. Os melhores resultados encontrados em termos de remoção de cor aparente foram tempo de floculação de 20 min e gradiente médio de velocidade de $60s^{-1}$. Os autores ressaltam a importância das pesquisas referentes às condições de floculação que devem ser aplicadas quando a clarificação é realizada por flotação, levando em consideração as características da água a ser clarificada, taxa de aplicação superficial, quantidade de ar fornecida, entre outros.

Marchetto; Reali (2001) investigaram a utilização da FAD para tratamento de água com baixa turbidez e cor elevada utilizando o sulfato de alumínio como coagulante. Na primeira etapa da investigação foi utilizado um equipamento em escala de bancada, flotateste, e a segunda etapa foi realizada em escala piloto. Os autores verificaram que nestes casos a substituição da sedimentação por flotação produz excelentes resultados requerendo baixas dosagens de sulfato.

Teixeira (2003) investigou, em equipamento de escala de bancada, flotateste, o desempenho da FAD na remoção dos principais poluentes, presentes nas instalações de lavagem automática de veículos, com a finalidade de reciclar o efluente tratado. O autor verificou a influência das condições de dosagem de coagulante e pH na eficiência de flotação utilizando cloreto férrico, sulfato de alumínio e PAC. Determinou-se também as melhores condições

operacionais no sistema de FAD. O autor observou que sob as mesmas condições de coagulação e floculação, o desempenho da FAD foi superior ao encontrado para decantação, indicando o potencial do uso desta tecnologia para a reciclagem da água.

Schoenhals (2006) avaliou a eficiência do processo de flotação em escala laboratorial aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola. Avaliou-se o desempenho de diferentes coagulantes e a taxa de recirculação no processo. O processo FAD mostrou ser muito eficiente para condicionamento do efluente em questão, atingindo altos índices de remoção dos parâmetros físico-químicos, destacando-se a elevada redução da carga de nutrientes.

Moruzzi; Reali (2008) investigaram em escala de laboratório, as condições adequadas de coagulação e floculação visando a flotação por ar dissolvido (FAD) de água contendo cor moderada e baixa turbidez, dos seguintes parâmetros: tipo de coagulante; dosagem, condição de mistura e recirculação e condições adequadas de floculação. A FAD apresentou excelentes resultados com eficiência maior que 90% nos parâmetros analisados. Os resultados apontaram para a utilização do sulfato de alumínio na dosagem de 25 mg/L em valor de pH em torno de 6,25 e recirculação de 8% v/v (8,4g de ar/m³ de água bruta). As condições adequadas de floculação obtidas foram: gradiente médio de velocidade (G) de 50 e 90 s⁻¹ para tempo de floculação de 8 minutos.

3.2- *Moringa oleifera* no tratamento de água

Jahn (1986) relatou diversas pesquisas realizadas por diferentes pesquisadores no Sudão, referentes à utilização da *Moringa oleifera* em comunidades rurais na África. Abordando diferentes aspectos como o cultivo, pesquisas laboratoriais, transferência dos conhecimentos adquiridos para as comunidades, etc., o autor verificou que o desempenho das sementes de *Moringa oleifera* é comparável ao do sulfato de alumínio como coagulante eliminando um alto percentual de bactérias paralelamente a redução da turbidez durante o tratamento da água. Neste estudo também são relatados diversos estudos toxicológicos das sementes, comprovando a sua não toxicidade.

Sani (1990) *apud* Silva (2006) realizou testes em jarros utilizando sementes de *Moringa oleifera*, em amostras de água com turbidez variando de 80 a 800 NTU e dureza variando de

300 a 900 mg/L de $\text{Ca}(\text{CO}_3)_3$. O autor verificou remoções de turbidez de 92 a 99% e redução entre 60-70% na dureza após coagulação e duas horas de sedimentação.

Uma proteína das sementes de *Moringa oleifera* foi isolada por Gassenschmidt *et al.* (1995), e comparada com um polímero sintético catiônico, sendo caracterizada como uma molécula catiônica de massa molecular 6,5 kDa (quilo- daltons), ponto isoelétrico em pH 10, tendo atividade floculante similar a do polímero catiônico.

Experimentos realizados por Sutherland *et al.* (1994), em um sistema de tratamento de água em Malawi, demonstraram que sementes de *Moringa oleifera* podem ser utilizadas para tratar altos volumes de água ($60\text{m}^3/\text{h}$), produzindo água tratada de qualidade similar utilizando-se o coagulante convencional sulfato de alumínio. A faixa de turbidez da água bruta era de 270-380 NTU, ao final do tratamento a água apresentou turbidez de 4 NTU, mostrando o potencial da utilização da *Moringa oleifera* em larga escala para o tratamento de águas.

Muyibi; Evison (1995) estudaram a otimização dos parâmetros relacionados com a coagulação da água usando as sementes de *Moringa oleifera*. Entre os parâmetros analisados estavam: dosagem do coagulante, gradiente de velocidade e tempo de mistura rápida e lenta. Os resultados mostraram que para dosagens variando entre 50-300 mg/L, as melhores dosagens foram 50 e 100 mg/L respectivamente, para turbidez inicial de 50-150 NTU e 250-550 NTU. Dentre os parâmetros investigados os mais significantes foram a turbidez inicial da água e a dosagem de *Moringa oleifera*.

Ndabigengesere; Narasiah; Talbot (1995) compararam a eficiência e as propriedades da *Moringa oleifera* com o sulfato de alumínio. Foi identificada nas sementes da *Moringa oleifera* a presença de uma proteína catiônica dimérica de alto peso molecular (12-14 kDa) e ponto isoelétrico entre 10 e 11. Os autores sugerem que o principal mecanismo de coagulação com a *Moringa oleifera* é o de adsorção e neutralização de cargas. Observaram também que o lodo produzido é consideravelmente menor do que o lodo produzido pelo alumínio, mostrando que a *Moringa oleifera* pode ser um substituto viável ao alumínio, sendo não tóxica e biodegradável, podendo ser um potencial substituto ao sulfato de alumínio.

Ndabigengesere; Narasiah (1996) sugerem que a presença de íons é necessária para que ocorra a coagulação com sementes de *Moringa oleifera*. Esta investigação indica que algumas

concentrações de íons resultam em menores eficiências de redução da turbidez. A dosagem de coagulante foi fixada e não há informação sobre como a razão dosagem: força na concentração iônica afeta a turbidez final. A função dos íons necessita maior investigação.

Ndabigengesere; Narasiah (1998) avaliaram a qualidade da água tratada utilizando teste em jarros para a redução da turbidez, comparando o desempenho das sementes de *Moringa oleifera* e sulfato de alumínio. Os autores verificaram que a água tratada com sementes de *Moringa oleifera* não apresentou nenhuma mudança significativa no pH, condutividade, alcalinidade, concentração de ânions e cátions, exceto o ortofosfato, nitrato e a matéria orgânica que aumentou consideravelmente. Eles sugerem que a utilização da *Moringa oleifera* seja realizada somente após purificação adequada da proteína catiônica ativa. Segundo os autores a maior desvantagem na utilização do extrato de *Moringa oleifera* é o incremento no teor de matéria orgânica na água tratada, que aumenta a demanda de cloro e pode levar a formação de trihalometanos durante a desinfecção por esse agente químico.

Diaz *et al.* (1999) investigaram duas plantas *Cactus latifaria* e sementes de *Prosopis juliflora* como coagulantes naturais para clarificação de água. As duas plantas produziram remoções de turbidez comparáveis com as obtidas por sementes de *Moringa oleifera*. As dosagens destes coagulantes se mostraram inferiores às necessárias para aquela com sulfato de alumínio.

Okuda *et al.* (1999) desenvolveram um método diferente de extração do componente ativo das sementes de *Moringa oleifera*, através de sais como o NaCl, KNO₃, KCl e NaNO₃. Os autores confirmaram que o componente ativo extraído de qualquer uma dessas formas é proteína, não havendo diferença na eficiência de coagulação entre estes sais. Os autores verificaram que o coagulante extraído com NaCl tem melhor atividade de coagulação, com dosagens 7,4 vezes menor do que utilizando o coagulante extraído em água para redução da turbidez.

De acordo com Schwarz (2000) para águas com turbidez menores do que 50 NTU a faixa de dosagens de sementes de *Moringa oleifera* empregadas é de 10- 50 mg/L; para turbidez na faixa de 50-150 NTU a dosagem varia de 30-100 mg/L; e para turbidez maiores do que 150 NTU a dosagem pode variar de 50-200 mg/L. O autor ressalta o fato de que a utilização da *Moringa oleifera* não garante que a água esteja livre de germes patogênicos.

Okuda *et al.* (2001a) isolaram e purificaram o componente ativo das sementes de *Moringa oleifera* utilizando solução salina. Os componentes ativos encontrados nos dois métodos de extração (extração salina e com água) são diferentes, sendo que a eficiência de extração com solução salina foi superior à realizada com água. Os autores observaram também que, diferente do coagulante extraído com água, a extração salina não aumenta a concentração orgânica residual após a coagulação, sendo um polieletrólito orgânico de peso molecular 3 kDa.

Okuda *et al.* (2001b), investigaram o mecanismo de coagulação do componente ativo extraído e purificado das sementes de *Moringa oleifera* com solução salina. Os experimentos foram conduzidos em Jar test. O mecanismo de coagulação parece ser o de varredura. Os autores sugerem que o mecanismo de adsorção e formação de pontes não é provável para este componente ativo devido ao seu baixo peso molecular e os outros mecanismos como compressão da dupla camada e adsorção e neutralização de cargas não são responsáveis pela coagulação com a solução salina.

Borba (2001) estudou a viabilidade da *Moringa oleifera* como coagulante natural para clarificação de água de muita cor e elevada turbidez realizando ensaios de coagulação/floculação com cinco componentes da *Moringa oleifera*: a semente integral (A), a polpa da semente (B), a casca da semente (C); a parte interna (DI) e externa (DE) da vagem, para verificar qual apresentava melhor capacidade de coagulação. O componente (B) apresentou excelentes resultados em termos de redução da turbidez e cor, atingindo a faixa de 91 a 98 %, sendo considerado muito bom coagulante. Apesar, do componente (B) e seus derivados apresentarem um bom resultado quando testados, o autor conclui que o uso da *Moringa oleifera*, como coagulante natural, bem como auxiliar de coagulação é inviável para sistemas comunitários, considerando a grande problemática de obtê-los em quantidades suficientes para operar sistemas desse porte. Também foram realizados ensaios bacteriológicos e se verificou que ela também não é suficiente como bactericida.

A utilização da *Moringa oleifera* no tratamento de águas superficiais com teores elevados de minerais de ferro, provenientes da atividade mineira, foi investigada por Guedes (2004). O autor verificou que a eficiência do extrato aquoso da *Moringa* é comparável à do sulfato de alumínio na coagulação/floculação de águas superficiais com turbidez elevada e o mecanismo envolvido na coagulação com sementes de *Moringa oleifera* parecem incluir duas etapas: a

formação de uma monocamada de proteína que desestabiliza as partículas, sucedida, na presença de excesso de coagulante, por multicamadas responsáveis pela redispersão das partículas. A fração ativa deste coagulante é constituída por proteínas catiônicas que adsorvem sobre a superfície das partículas de óxido.

Silva (2005) avaliou o uso de sementes de *Moringa oleifera* como coagulante alternativo no tratamento de águas, variando-se a concentração do extrato, o tempo e temperatura de extração e o pH na etapa de coagulação, buscando-se as melhores condições para redução da turbidez das amostras de águas analisadas. Os resultados obtidos mostraram a redução de turbidez de 92-96%, mostrando que as sementes de *Moringa oleifera* podem ser usadas como coagulante natural efetivo no tratamento simplificado de águas.

Ghebremichael *et al.* (2005) realizaram a extração da proteína coagulante presente nas sementes de *Moringa oleifera*, extraídas com água e com sal. Os agentes coagulantes para os dois extratantes são proteínas catiônicas com ponto isoelétrico 9,6 e massa molecular menor que 6,5 kDa. Eles verificaram que para águas com alta turbidez, a atividade de coagulação das sementes de *Moringa oleifera* é similar à encontrada com o sulfato de alumínio e a proteína tem propriedades antibacterianas. Os autores citam que no trabalho de Okuda *et al.* (2001a), foi encontrado que o componente ativo da extração salina não é uma proteína, polissacarídeo ou lipídeo, mas um polieletrólito com massa molecular de 3,05 kDa. Sugerindo que os extratos da água e do sal podem ser de natureza diferente, necessitando assim de maiores investigações das proteínas coagulantes.

Katayon *et al.* (2006) realizaram pesquisas sobre as condições de armazenamento e sua influência no desempenho da *Moringa oleifera* como coagulante e verificaram que sementes armazenadas por um mês mostraram melhor desempenho do que sementes armazenadas por três e cinco meses e que não houve diferença entre as mantidas no refrigerador ou temperatura ambiente. Os autores verificaram também que a eficiência de coagulação utilizando a *Moringa oleifera* é dependente da turbidez inicial de amostras de água. As remoções mais elevadas de turbidez foram obtidas para água com turbidez alta.

Amaral *et al.* (2006) avaliaram o uso de sementes de *Moringa oleifera* e da radiação solar na clarificação e desinfecção da água com diferentes níveis de turbidez. Os resultados

comprovaram que a eliminação da turbidez pela sedimentação através das sementes de *Moringa oleifera* tem efeito positivo no processo de desinfecção da água pela energia solar

Galão; Damasceno; Brito (2006) realizaram avaliação química e estrutural das sementes de *Moringa oleifera*, observando que se caracterizam por um elevado teor de proteínas (aproximadamente 40%), compostos de maior importância no processo de clarificação da água e lipídeos (aproximadamente 19%). Com a análise morfológica observaram o material protéico presente no citoplasma das células das sementes.

Capítulo 4

Metodologia Experimental

4. Metodologia Experimental

São apresentados neste capítulo, metodologia, equipamentos e materiais utilizados para a realização desta pesquisa, que foi desenvolvida em duas etapas. A primeira etapa foi à construção de um equipamento, denominado flotateste, realizada na oficina mecânica do Núcleo de Tecnologia da UFRN. A segunda etapa consistiu nos experimentos de flotação, que foram desenvolvidos na Estação de Tratamento de Água do Jiqui (ETA-Jiqui), pertencente à companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte-CAERN/RN e nos experimentos de medidas de mobilidade eletroforética que foram realizados no Laboratório de Tensoativos do Departamento de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

4.1. Montagem do equipamento flotateste

O equipamento flotateste foi construído em escala de bancada para ser utilizado inicialmente nesta pesquisa, sendo formado, basicamente, por três colunas de flotação associadas a uma câmara de saturação, onde ocorrem as etapas de mistura rápida, floculação e flotação. A construção foi baseada em equipamentos utilizados por Lacerda (1997) e Pinto Filho (1999) do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Brasília (UnB). A Figura 4.1 mostra um esquema geral do flotateste. A Figura 4.2 mostra a unidade de flotateste já montada em estrutura metálica. Anteriormente, outros pesquisadores também desenvolveram equipamentos similares (HYDE *et al.* 1977; EDZWALD; WINGLER, 1990; MALLEY; EDZWALD, 1991; REALI; GIANOTTI, 1993; REALI; CAMPOS, 1985 *apud* LACERDA, 1997).

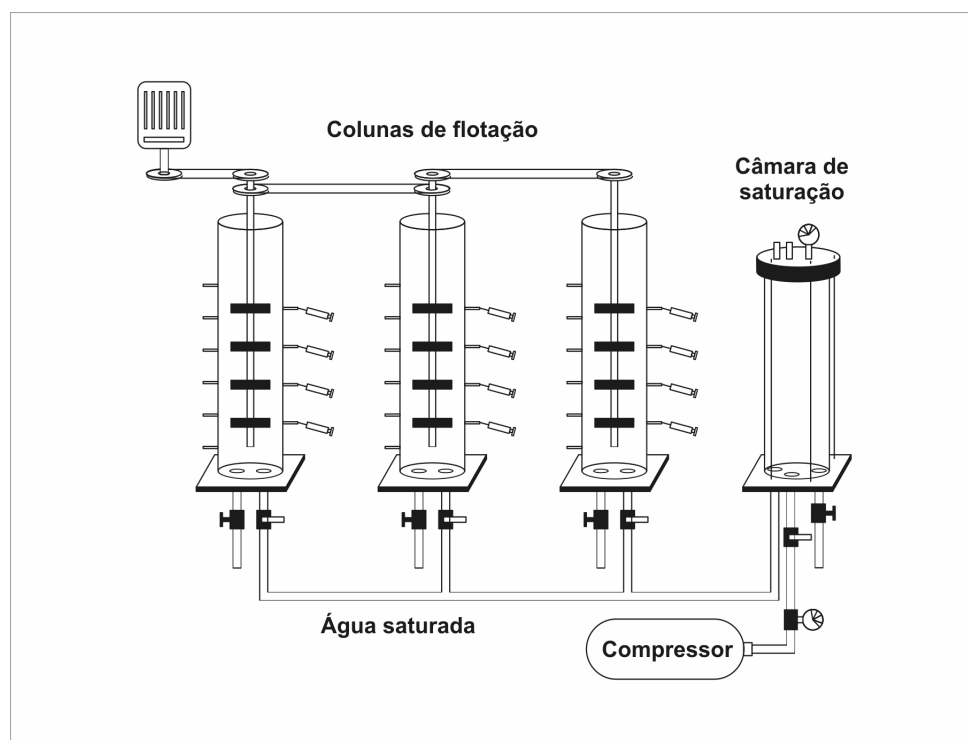


Figura 4.1- Esquema geral do flotateste. Fonte: adaptado de Pinto Filho, 1999.

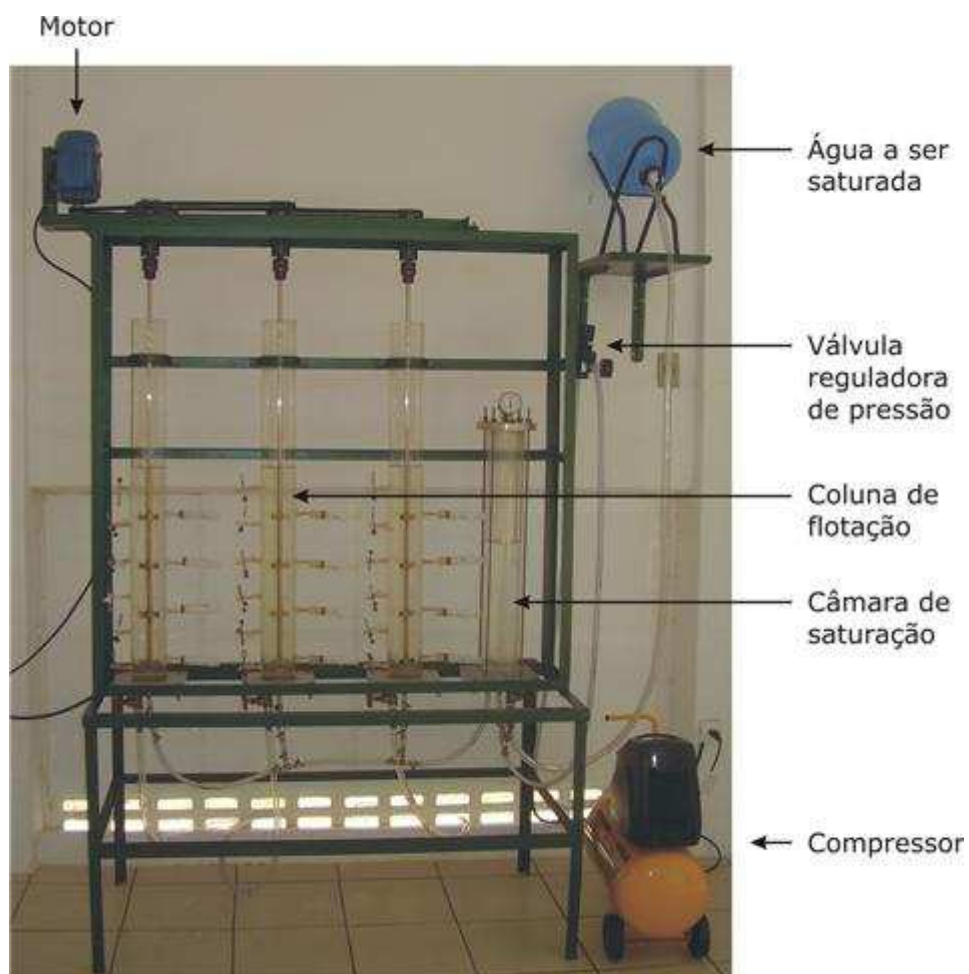


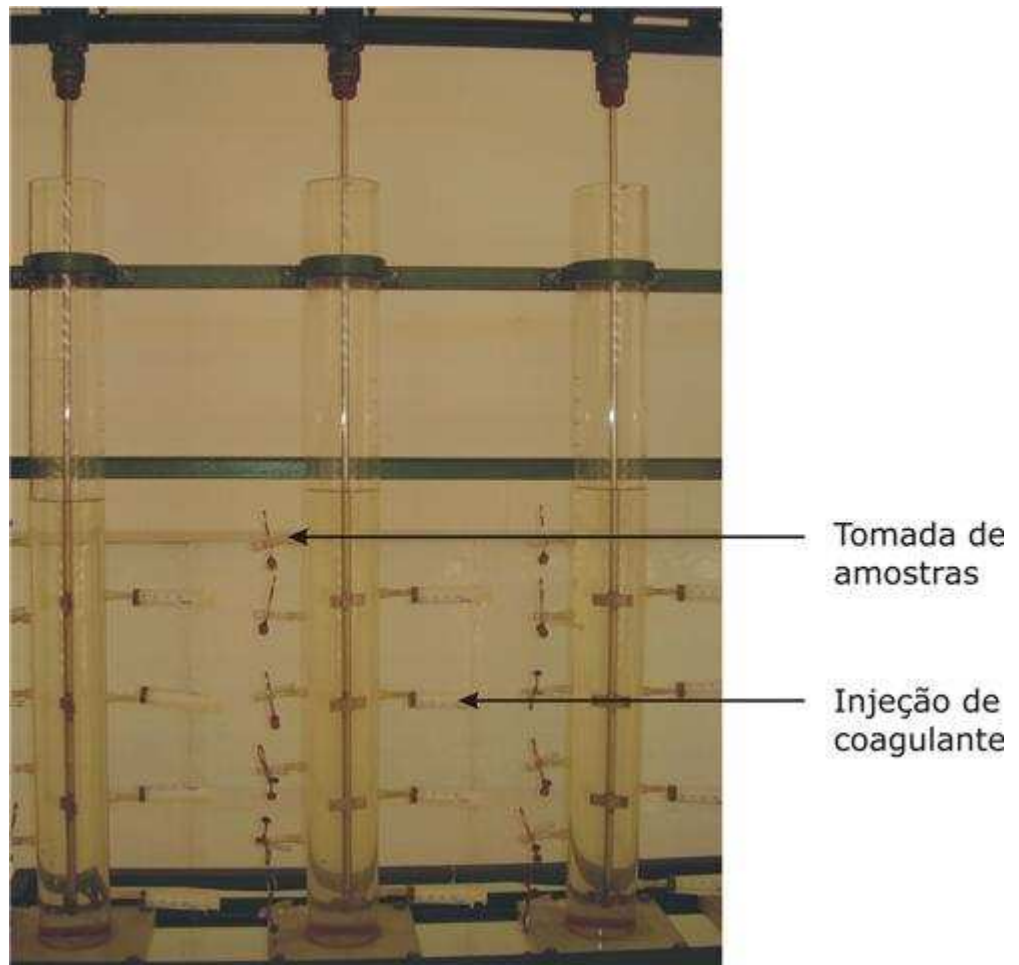
Figura 4.2. Estrutura do flotatesto montado em estrutura metálica.

4.1.1. Colunas de Flotação

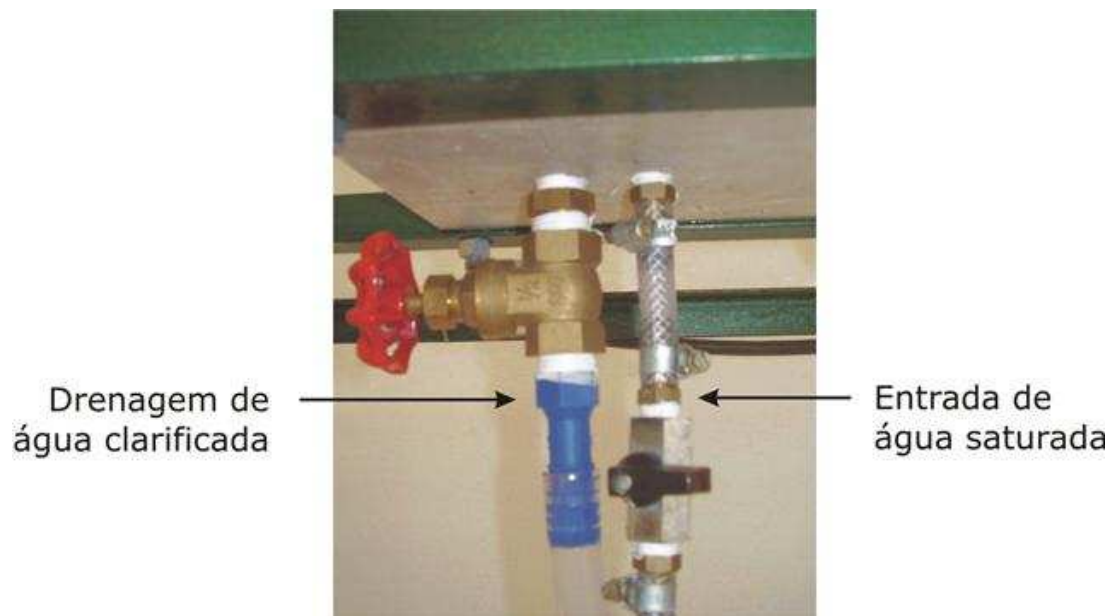
Foram construídas três colunas de flotação, onde ocorrem as etapas de mistura rápida, floculação e flotação. Com o objetivo de se visualizar o processo, foi construído em acrílico transparente com as seguintes dimensões: diâmetro interno de 80 mm, 1000 mm de altura, volume útil de 4 litros. Cada coluna é fixada por uma base de alumínio, onde foram instalados dispositivos de entrada de água saturada e drenagem de água clarificada.

A agitação necessária nos processos de coagulação e floculação foi realizada por meio de paletas de aço inox preso a mandris, podendo ser retiradas e colocadas facilmente durante o processo.

Em cada coluna foram realizados 10 furos laterais em torno mecânico, quatro do lado direito, onde foram instaladas seringas de 20 ml para injeção de coagulante; e seis furos do lado esquerdo, onde foram instaladas mangueiras para retirada de amostras. A Figura 4.3 mostra as três colunas e as bases de alumínio com os dispositivos instalados.



a



b

Figura 4.3. a- Colunas de flotação; b-Base da coluna de flotação com os dispositivos instalados.

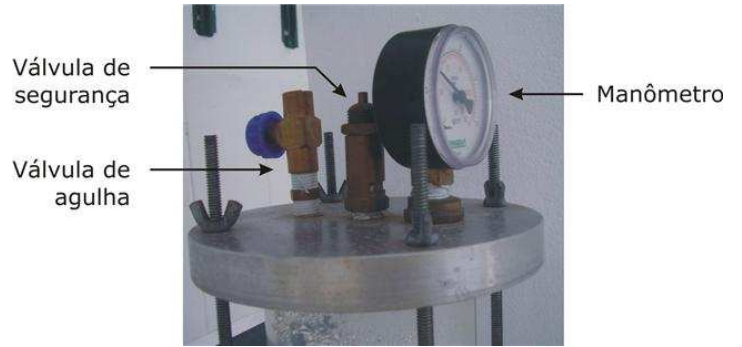
4.1.2. Câmara de saturação

A câmara de saturação foi construída em acrílico transparente, com as seguintes dimensões: 84 mm de diâmetro, 700 mm de altura, volume útil de 04 litros, podendo suportar altas pressões. Na parte superior, construída em alumínio, foi fixado um manômetro, uma válvula de agulha, para manter a pressão dentro da faixa desejada, e uma válvula de segurança. Na base inferior da câmara foi instalada entrada de ar comprimido, entrada de água e saída de água saturada. Ao longo da câmara de saturação foram colocadas hastes laterais para garantir a estanqueidade.

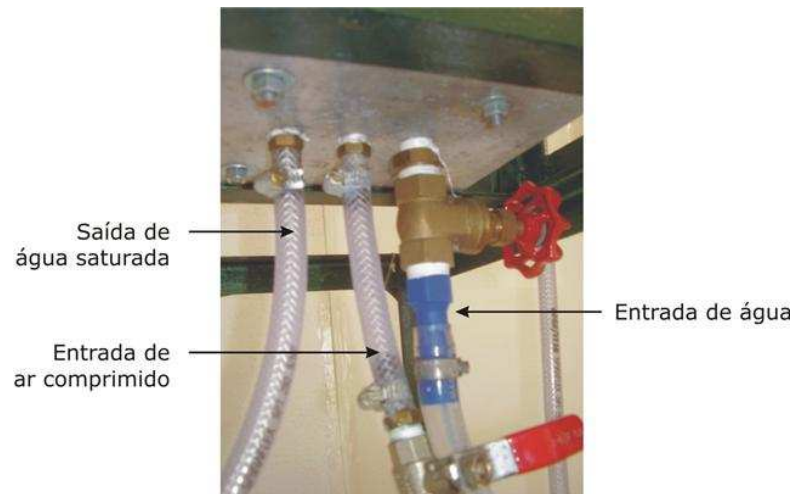
As colunas de flotação são interligadas à câmara de saturação por meio de mangueiras resistentes a alta pressão. A Figura 4.4 mostra a câmara de saturação, a sua parte superior e base de alumínio com os dispositivos instalados. A figura 4.5 mostra a interligação da câmara de saturação às colunas de flotação.



a



b



c

Figura 4.4. a- Câmara de saturação, b- Parte superior da câmara de saturação; c- Base da câmara de saturação.

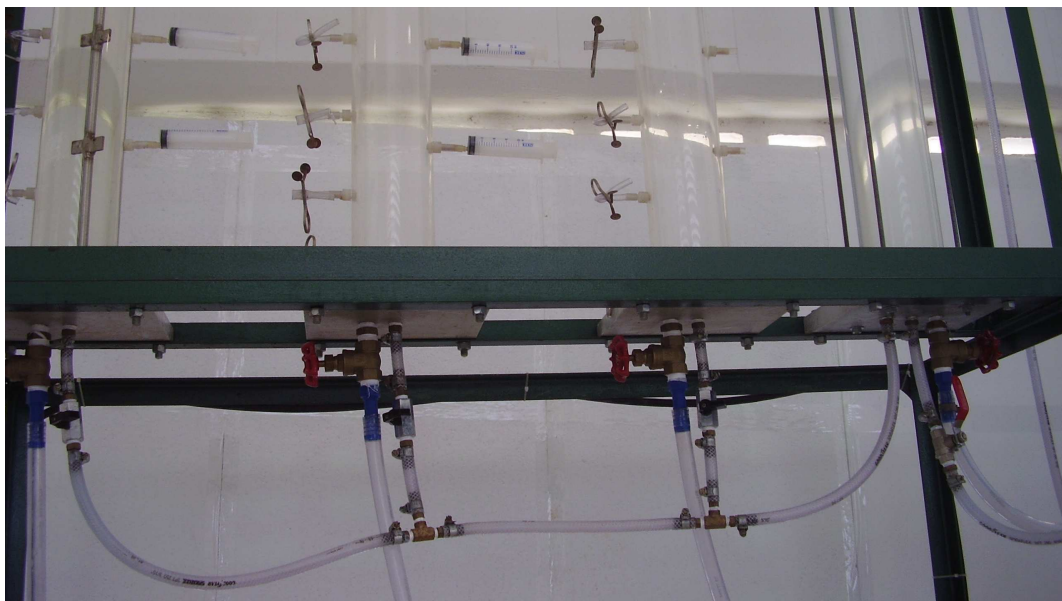


Figura 4.5. Interligação da câmara de saturação as colunas de flotação.

4.1.3. Equipamentos complementares

Foi utilizado um motor da marca Weg, para movimentar os três eixos onde eram fixadas as paletas, as quais eram conectadas a mandris. O variador de velocidade, da marca Weg-CFW 08, permitia uma faixa de variação de cerca de 0 a 360 RPM.

O ar comprimido foi fornecido por um compressor de ar da marca Twister-Schulz, com faixa de atuação de 0 a 1000kPa. A válvula reguladora de pressão foi presa à estrutura metálica de suporte do flotatete.

A Figura 4.6 mostra o conjunto motor e polias que movimentam os eixos. A Figura 4.7 mostra a válvula reguladora de pressão.



Figura 4.6. Conjunto motor e polias que movimentam os eixos.



Figura 4.7. Válvula reguladora de pressão.

4.2. Etapas do trabalho experimental

4.2.1. Lagoa do Jiqui

A Lagoa do Jiqui se localiza no município de Parnamirim-RN, cerca de 13 Km ao sul da cidade de Natal. Desde o ano de 1960, esta lagoa é utilizada como manancial para abastecimento público. Atualmente, a Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) explora água desse manancial, visando atender a demanda de uma população de aproximadamente 500 mil habitantes da zona sul da cidade de Natal, representando cerca de 32% de todo fornecimento de água da CAERN. A lagoa é alimentada pelo Rio Pitimbu, que possui uma bacia hidrográfica de 98 km² de área, ambos fazem parte da bacia hidrográfica do Rio Pirangi (que totaliza uma área de 458km²). O rio Pitimbu nasce no município de Macaíba deságua na lagoa do Jiqui e parte em direção à praia de Pirangi, lançando suas águas no mar (EGITO, 2006).

Além de ser fonte direta de captação de água para abastecimento, atualmente a lagoa serve de fonte para diluição dos poços que estão com índices de nitrato acima do recomendado pela legislação vigente, se constituindo em um importante manancial para o abastecimento de água potável da cidade de Natal.

Neste trabalho optou-se por clarificar as águas provenientes desta Lagoa, que são de baixa turbidez. Atualmente a tecnologia de tratamento na ETA-Jiqui é a de filtração direta precedida de coagulação com sulfato de alumínio.

Os experimentos foram realizados no período de setembro de 2006 a janeiro de 2007, sendo que nesta época do ano não houve variações significativas no parâmetro turbidez. A idéia inicial era a de abranger as variações sazonais típicas do nordeste brasileiro e trabalhar com águas de maior turbidez. Porém, no ano de 2007, no período das chuvas, verificou-se que este parâmetro, não apresentou grandes modificações, motivo pelo qual o presente trabalho se limitou a clarificar águas com baixa turbidez.

4.2.2. Coleta de amostras

Todas as amostras foram provenientes da Estação de Tratamento de Água do Jiqui (ETA-Jiqui), pertencente a CAERN/ RN. Para facilitar o desenvolvimento do trabalho, foi instalada uma tubulação que conduzia a água bruta do canal de entrada da ETA até o laboratório, onde eram realizados os experimentos. A Figura 4.8 mostra o canal de entrada da água bruta da ETA-Jiqui, o laboratório onde foram realizados os experimentos de flotação e a Lagoa do Jiqui.



Figura 4.8. Canal de entrada da Água bruta da ETA-Jiqui; Laboratório onde foram realizados os experimentos e a Lagoa do Jiqui.

4.2.3. Reagentes utilizados

Os reagentes utilizados nos ensaios foram: sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3 \text{ H}_2\text{O}$) a 1% adquirido pela ETA-Jiqui, Natal/RN e sementes de *Moringa oleifera* fornecidas pela Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju/SE. Para a correção do pH foram utilizados cal (0,5%) e ácido clorídrico (0,1 N). As principais características físico-químicas médias da água bruta, utilizada nos experimentos: pH entre 6,1 e 6,4; alcalinidade variando de 13,0 a 16,5 mg/L CaCO_3 ; e turbidez de 2,0 a 4,0 uT.

4.2.4. Análises Físico-químicas

As medidas de turbidez e pH foram realizados com turbidímetro marca Policontrol modelo AP 2000 e pH- metro digital marca Tecnal modelo 3MP, respectivamente.

4.2.5. Preparação da solução coagulante com sementes de *Moringa oleifera*

As sementes secas foram selecionadas, descascadas manualmente e em seguida misturadas à água destilada na proporção de 25 g por litro. Essa mistura foi batida em liquidificador doméstico por 15 minutos. A suspensão resultante foi filtrada através de papel de filtro (28 μm), de acordo com procedimento adaptado de Lopes; Silva (2004). A concentração final aproximada da suspensão é de 25mg/ml, considerando a massa das sementes descascadas utilizadas para preparar a solução.

4.2.6. Cálculo do gradiente de velocidade

De acordo com Richter; Azevedo Netto (1991) *apud* Pinto Filho, 1999, o gradiente de velocidade (G), irá depender das dimensões e posição das paletas e da rotação adotada. O variador de velocidade mostra uma variação numérica de 0 a 40. Com o objetivo de se determinar à velocidade correspondente a este valor fornecido, aferiu-se o número de rotações

por minuto das paletas, através de um tacômetro. O cálculo utilizado para determinação desta relação se encontra no Anexo A.

4.2.7. Etapas experimentais no flotatesto

O trabalho experimental foi dividido em 4 etapas, como mostrado na Tabela 4.1, sendo mantidos constantes os seguintes parâmetros do processo: mistura rápida -1 minuto com gradiente de velocidade (G) = $1000s^{-1}$; mistura lenta -15 minutos com $G= 40s^{-1}$; pressão de saturação= $5,5 \text{ kgf} / \text{cm}^2$. A escolha destes parâmetros foi baseada em trabalhos realizados anteriormente (EDZWALD, 1995; LACERDA, 1997; RICHTER, 2001). Para os experimentos realizados com sementes de *Moringa oleifera* o tempo de mistura rápida foi de 2 minutos e a mistura lenta 20 minutos, os demais parâmetros permaneceram iguais. A eficiência do processo foi avaliada a partir de medidas de turbidez da água antes e após os experimentos, em todas as etapas. Foram realizados ensaios de flotação para valores de pH 5,0, 6,0 e 7,0 com o sulfato de alumínio, e ensaios com *Moringa oleifera* nos pHs 6,4 (livre), 7,0 e 8,0. A turbidez da água bruta utilizada nos experimentos com sulfato de alumínio para todas as etapas foi: 3,2 uT (pH= 5,0), 3,4 uT (pH= 6,0) e 2,7 uT (pH= 7,0) e com a *Moringa oleifera*: 3,2 uT (pH= 6,4), 3,1 uT (pH= 7,0) e 3,0 uT (pH= 8,0).

A seguir são apresentadas as quatro etapas para execução dos ensaios de flotação. Em cada uma delas era encontrada a melhor condição, ou seja, aquela em que se tinha a melhor eficiência de redução da turbidez, que foi o parâmetro de controle escolhido. A cada etapa, utilizavam-se as melhores condições determinadas anteriormente e assim, sucessivamente.

4.2.7.1. Etapa 1: Avaliação da variação da dosagem de coagulante na eficiência do processo

Nesta etapa a dosagem de coagulante foi variada para cada pH, a turbidez medida, antes e após os ensaios de flotação e calculada a redução da turbidez. Os demais parâmetros operacionais foram mantidos constantes: taxa de recirculação de 10% e velocidade de flotação de 11,17cm/min.

4.2.7.2. Etapa 2: Avaliação da influência da taxa de aplicação superficial na eficiência do processo

Esta avaliação foi realizada por meio de coletas a 33,5 cm da base da coluna de flotação, escolheram-se as taxas de aplicação desejadas, 80,35 a 482,4 m³/m².d. O tempo de coleta (t_c) correspondente a essas velocidades de flotação (v_f) é calculado através da seguinte equação:

$t_c = 33,5 \text{ cm}/v_f \text{ (cm/min)}$. Os experimentos foram conduzidos utilizando a melhor dosagem de coagulante, os demais parâmetros operacionais permaneceram iguais.

4.2.7.3. Etapa 3: Avaliação da influência do tempo de floculação na eficiência do processo

Nesta etapa os tempos de floculação testados foram de 0, 5, 10, 15, 20 e 25 minutos. Esta etapa era efetuada com as melhores condições encontradas nas etapas anteriores.

4.2.7.4. Etapa 4: Avaliação da influência da taxa de recirculação na eficiência do processo

Nesta etapa as taxas de recirculação testadas foram de 5, 10, 15, 20 e 25%. Foi feita uma marcação na coluna de flotação, representando cada uma dessas variações. Por exemplo, uma taxa de 10% de recirculação, significava introduzir um volume de água saturada na coluna de flotação de 350 ml, considerando 3500 ml o volume de água a ser tratada na coluna.

A Tabela 4.1 mostra um resumo das condições operacionais de cada uma das etapas descritas anteriormente, sendo: D- dosagem de coagulante; T_f – tempo de floculação; TAS – taxa de aplicação superficial; R-taxa de recirculação; * (sulfato de alumínio); ** (*Moringa oleifera*).

Tabela 4.1. Resumo das condições operacionais de cada uma das etapas no flotateste.

Etapas	Mistura Rápida	Floculação	Flotação	
	$G = 1000s^{-1}$; $t = 1^*$ e 2^{**} min.	$G = 40s^{-1}$	TAS ($m^3/m^2 \cdot d$)	R (%)
	D(mg/L)	T_f (min)		
1	variável	$15^*/20^{**}$	161	10
2	D ótima da etapa 1	$15^*/20^{**}$	variável	10
3	D ótima da etapa 1	variável	TAS ótima da etapa 2	10
4	D ótima da etapa 1	T_f ótimo etapa 3	TAS ótima da etapa 2	variável

*Sulfato; **Moringa

4.2.8. Operação do flotateste

A operação do flotateste envolve etapas de coagulação, floculação e flotação que serão descritas a seguir.

4.2.8.1. Saturação da água de recirculação com ar

- A primeira etapa é a saturação da água de recirculação com ar. A câmara de saturação é cheia com água.
- Liga-se o compressor de ar para atingir a pressão desejada (550 kPa) no interior da câmara, utiliza-se o manômetro e a válvula reguladora de pressão. Satura-se a água por, no mínimo, 10 minutos;
- As mangueiras condutoras de água saturada para as colunas de flotação são pressurizadas, abrindo-se as válvulas localizadas nas bases das mesmas.

4.2.8.2. Ensaio de coagulação, floculação e flotação

- As colunas de flotação são cheias com a água a ser tratada, em sistema batelada, com o auxílio de uma mangueira fixa em uma torneira que recebe a água bruta diretamente do canal de entrada da ETA;

- O coagulante, alcalinizante ou acidificante, se necessário, são dosados nas seringas ao longo da coluna de flotação;

- São fixadas as paletas, aos mandris, sendo a rotação ajustada no variador de velocidade correspondente ao G de mistura rápida;

- Aciona-se um cronômetro simultaneamente a adição do coagulante, no tempo determinado para esta etapa de mistura rápida.

- Após este tempo, a rotação é reduzida, ao valor correspondente ao gradiente de velocidade na floculação;

- A agitação é desligada, no variador de velocidade, retiradas as hastes dos mandris e abertos os registros das colunas de flotação imediatamente, para a aplicação da água de recirculação com a taxa de recirculação prevista;

- Terminada a recirculação, o tempo de flotação é cronometrado, sendo realizadas coletas de acordo com a taxa de aplicação desejada. Para cada amostra a qualidade da água é analisada e correlacionada com a velocidade de flotação;

- A partir daí as colunas são limpas, com o auxílio de uma mangueira e escova apropriada, para a realização de um novo ensaio.

A Figura 4.9 mostra a seqüência de etapas que ocorre na coluna de flotação: a mistura rápida, detalhes de flocos formados durante a etapa da floculação, o início da flotação, onde se observa a ascensão do conjunto bolha-partícula e ao final da flotação, a camada de lodo flotada na superfície do líquido clarificado.

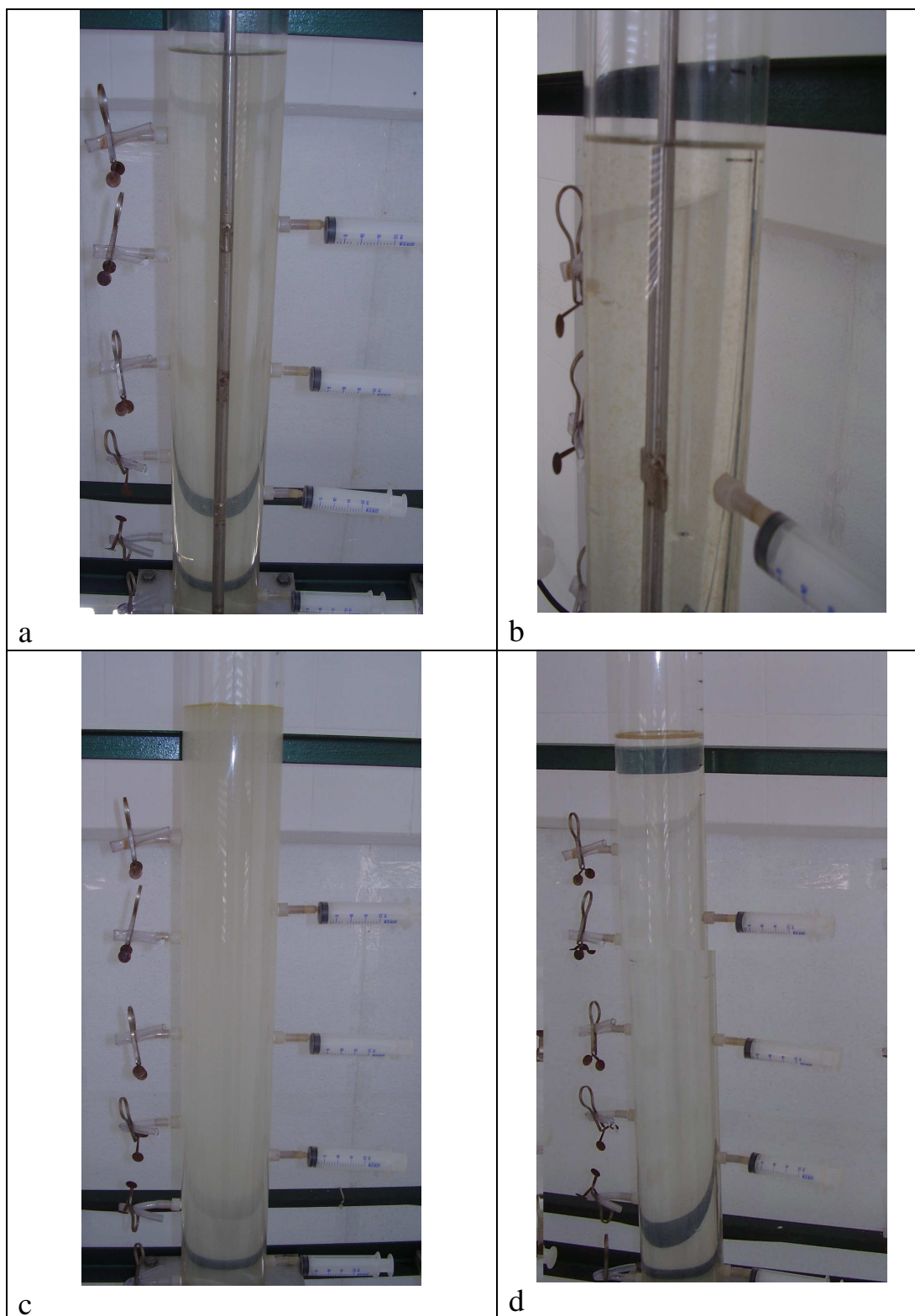


Figura 4.9. Seqüência de etapas na coluna de flotação: a- mistura rápida, b- floculação, c- início da flotação, d- término da flotação.

4.2.9. Determinação do potencial zeta

Investigou-se o potencial zeta com o objetivo de avaliar se parâmetros como pH e dosagem de coagulante empregados estão sendo favoráveis à eficiência do processo e estudar os diferentes mecanismos de coagulação. Por meio de uma técnica denominada microeletroforese, mede-se a mobilidade eletroforética e calcula-se o potencial zeta como será explicado a seguir.

4.2.9.1. Ensaios de coagulação e floculação

Sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera* foram utilizados nestes testes como coagulantes. Em cada experimento, as dosagens dos coagulantes foram variadas sob pH controlado. Os experimentos com sulfato de alumínio foram realizados nos pHs 5,0, 6,0 e 7,0. No caso da *Moringa oleifera* os experimentos foram realizados nos pHs 6,4, 7,0 e 8,0. O pH da suspensão resultante de *Moringa oleifera* foi de 6,4, não necessitando ajuste. A investigação com sementes de *Moringa oleifera* em pHs mais alcalinos foi realizada para avaliar esta influência na eficiência no processo.

Um equipamento tipo Jar Test foi utilizado nos ensaios de coagulação. As amostras foram agitadas a 100 rpm, por 2 minutos. Durante esse tempo os coagulantes foram adicionados com o auxílio de uma seringa para chegar à dosagem e pH requeridos. A medida do pH realizada neste momento era considerada a do experimento. A velocidade de agitação era então diminuída para 50 rpm durante 15 minutos, após os quais a amostra era decantada durante 15 minutos. O sobrenadante líquido era então filtrado e a turbidez remanescente medida.

A amostra utilizada para as medidas de mobilidade eletroforética era retirada após a mistura rápida (100 rpm) no Jar Test, e imediatamente transferida para a célula em que se procedia às medidas.

4.2.9.2. Mobilidade eletroforética e potencial zeta

Os dados de potencial zeta foram obtidos pela técnica de microeletroforese através do equipamento “Zeta-Meter System 3.0”. Este aparelho permite a medida da mobilidade eletroforética, cálculo do potencial zeta e observações microscópicas dos flocos. Um microscópio estereoscópico é usado para observar as partículas coloidais dentro de uma câmara, chamada célula de eletroforese. Eletrodos colocados em cada câmara são conectados a uma fonte de energia pela qual se cria um campo elétrico na câmara. Colóides carregados mudam de posição e suas velocidades e direções estão relacionadas ao potencial zeta. O equipamento fornece a mobilidade eletroforética das partículas que é expressa em $\mu\text{m.s}^{-1}/\text{V.cm}^{-1}$. O primeiro termo é simplesmente a medida de velocidade, enquanto o segundo é uma expressão da força do campo elétrico. O potencial zeta (em milivolts) é calculado a partir da mobilidade eletroforética segundo a equação de Helmholtz-Smoluchowski (HUNTER, 1981):

$$\zeta = \frac{112890}{E_r \nu \left(\frac{V}{E} \right)} \quad (4.1)$$

$$u_E = \frac{V}{E} \quad (4.2)$$

Substituindo (4.2) em (4.1)

$$\zeta = \frac{112890}{E_r \nu u_E} \quad (4.3)$$

Onde:

ζ = Potencial zeta (mV)

E_r = Constante dielétrica do solvente, dependente da temperatura

ν = Viscosidade da solução (poise)

u_E = Mobilidade eletroforética ($\mu\text{m.s}^{-1} / \text{V.cm}^{-1}$)

V = Velocidade média das partículas (cm/s)

E = Intensidade do campo elétrico, definido como U/L

U= Potencial aplicado (Volts)

L = Distância entre eletrodos (cm)

Cada medida foi realizada 15 vezes e foram considerados os resultados cujo desvio padrão foi inferior a 4. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Tensoativos do Departamento de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

4.2.10- Análise estatística dos dados

O tratamento estatístico para cada uma das etapas experimentais foi realizado como descrito a seguir.

Em todas as etapas foi utilizado o delineamento inteiramente ao acaso, para a etapa 1 (dosagem x pH) no esquema fatorial 12×3 (12 dosagens e 3 pHs), para a etapa 2 (tempo de floculação x pH) esquema fatorial 5×3 (5 tempos de floculação e 3 pHs), para a etapa 3 (taxa de aplicação superficial x pH) esquema fatorial 6×3 (6 taxas de aplicação superficial e 3 pHs). Para a etapa 4 (taxa de recirculação x pH) esquema fatorial 5×3 (5 taxa de recirculação e 3 pHs). Para os dados obtidos relativos a turbidez remanescente foi realizada análise de variância. Para a comparação dos fatores quantitativos, em todas as etapas foram ajustados equações de regressão polinomial na análise de variância e o teste t a 5% de probabilidade para comparação das médias entre sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera*.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

5. Resultados e discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no flotatestes, onde a FAD foi investigada para redução de turbidez em amostras de água provenientes da Lagoa do Jiqui/RN. Foi avaliada a influência das condições de pré-tratamento (dosagem de coagulante e tempo de floculação) e parâmetros de processo da flotação (taxa de aplicação superficial e taxa de recirculação). Serão apresentados também os resultados obtidos nos ensaios *Jar Test*, medidas de mobilidade eletroforética para determinação do potencial zeta e discussão dos possíveis mecanismos envolvidos no processo de agregação das partículas.

Os coagulantes testados foram sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera*, sendo que o parâmetro escolhido para a avaliação da eficiência dos ensaios foi o percentual de redução de turbidez. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

5.1. Ensaios de Flotação utilizando sulfato alumínio

Foram realizados testes com sulfato de alumínio em três diferentes valores de pH (5,0, 6,0 e 7,0) com o objetivo de verificar se esta alteração poderia trazer ganhos ao processo no que diz respeito à melhoria na eficiência de redução de turbidez. Os resultados são mostrados a seguir.

5.1.1. Dosagem

Nesta etapa da pesquisa, foram estudadas diferentes dosagens de sulfato de alumínio e sua influência na redução de turbidez. Na Figura 5.1 são mostrados os resultados encontrados para os três valores de pH.

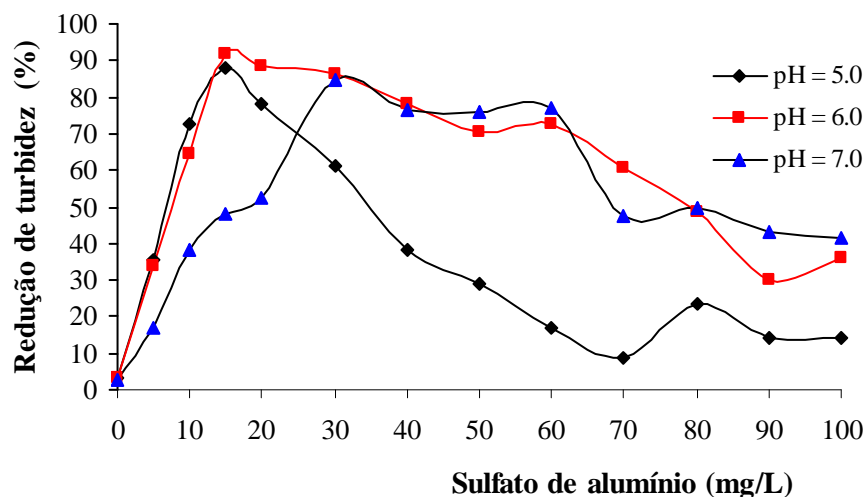


Figura 5.1. Relação das dosagens de sulfato de alumínio e redução de turbidez (%) nos pHs 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.

Para o pH 5,0 observou-se nas dosagens que variam de 0 a 15 mg/L um aumento no percentual de redução de turbidez, sendo que a maior redução encontrada foi de 88,3%. Na faixa de dosagens de 15 a 70 mg/L, verificou-se uma diminuição na eficiência do processo. Acima desta dosagem a máxima redução alcançada foi de 23,5%.

Para o pH = 6,0, verifica-se que até 15 mg/L, um aumento na dosagem do sulfato de alumínio é acompanhado pelo aumento no percentual de redução de turbidez, alcançando uma eficiência de 91,8% na dosagem de 15 mg/L. Com dosagens variando de 20 a 60 mg/L, verificou-se que o maior percentual de redução de turbidez encontrado foi em 20 mg/L, correspondendo a uma eficiência de 88,4 %. Dosagens acima de 60 mg/L caracterizaram-se pela diminuição da eficiência do processo.

Para o pH = 7,0 verificou-se a existência de três regiões na curva de redução de turbidez. Inicialmente, um aumento na dosagem é acompanhado pelo aumento no percentual de redução de turbidez, alcançando um máximo de eficiência de 84,8%, com dosagem de sulfato de alumínio de 30 mg/L. Na segunda região da curva, com dosagens variando de 30 a 60 mg/L, as eficiências variaram de 84,8% a 76,0%. Acima de 60 mg/L verifica-se a diminuição da eficiência do processo.

Por meio dos resultados apresentados na Figura 5.1 observou-se que a maior eficiência do processo encontrada foi a de 91,8%, no pH = 6,0.

Considerando estes resultados, para os experimentos subseqüentes, foram adotadas as dosagens de sulfato de alumínio de 15 mg/L para o pH 5,0, 15 mg/L para o pH 6,0 e 30 mg/L para o pH 7,0.

5.1.2. Taxa de aplicação superficial

Na Figura 5.2 são mostrados os resultados encontrados para os pHs 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios com flotateste para avaliação da variação da taxa de aplicação superficial. Nesta segunda etapa foi mantida fixa a dosagem de coagulante que apresentou maior redução de turbidez para cada um dos valores de pH. As taxas de aplicação superficial variaram na faixa de 80 a 482 m³/m².d.

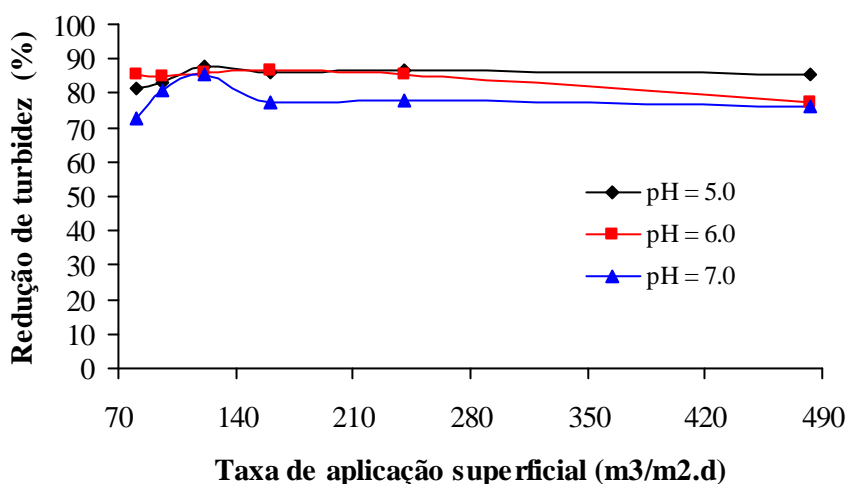


Figura 5.2. Relação das taxas de aplicação superficial e redução de turbidez (%) nos valores de pH 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.

Para o pH = 5,0 observou-se que as variações das taxas praticamente não afetaram a eficiência do processo na faixa de 121 a 482 m³/m².d, obtendo variações de eficiência de 85,3 a 87,6%. Escolheu-se, então, a taxa de aplicação superficial de 482 m³/m².d, para dar continuidade às etapas seguintes, que forneceu uma redução de turbidez de 85,3%.

Para o pH = 6,0 verificaram-se os melhores resultados na faixa de variação de 80 a 241m³/m².d, com variações entre as remoções de 84,9 a 86,6%; sendo escolhida então a taxa de aplicação superficial de 241 m³/m².d para as etapas seguintes.

Para o pH = 7,0 observou-se o maior valor de redução de turbidez de 85,5% com taxa de aplicação superficial de 121 m³/m².d. Nas velocidades maiores, a eficiência diminuiu aproximadamente 34%. Foi escolhida então a taxa de aplicação superficial de 121 m³/m².d para as etapas seguintes.

Nos três valores de pH testados, verificou-se uma diminuição na taxa de aplicação superficial à medida que o pH aumentou, o que implica em menor quantidade de água tratada para redução da turbidez, com o aumento do pH. Lacerda (1997) também verificou para águas de baixa turbidez, que eficiências de redução altas podem ser atingidas com taxas de aplicação superficial maiores, quando se utilizam valores de pH mais baixos.

De acordo com Richter (2001) a taxa de aplicação superficial na faixa de 96 a 320 m³/m².d são valores utilizados em sistemas FAD na América Latina.

5.1.3- Tempo de floculação

Na Figura 5.3 são apresentados os resultados de avaliação do tempo de floculação.

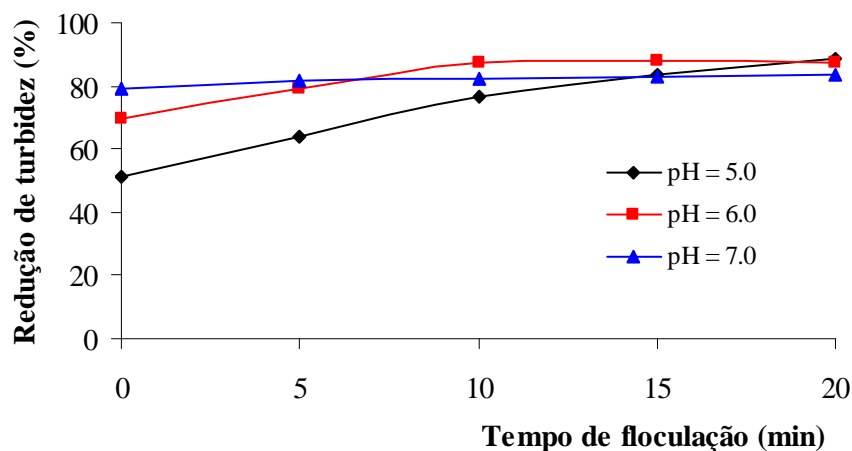


Figura 5.3. Relação do tempo de floculação e redução de turbidez (%) nos pHs 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.

Os resultados obtidos para o pH = 5,0 mostraram um aumento no percentual de redução de turbidez com o aumento do tempo de floculação, para a dosagem testada (15 mg/L). Escolheu-se então o tempo de 20 minutos de floculação, que apresentou uma eficiência de 88,7%, para a continuidade dos experimentos.

Para o pH = 6,0 os resultados obtidos mostraram um aumento na eficiência da flotação com o aumento do tempo de floculação. Entre os tempos de 10 e 20 minutos de flotação as reduções de turbidez variaram de 87 a 88 %. Escolheu-se, então o tempo de 15 minutos de floculação para a continuidade dos experimentos.

Os resultados obtidos para o pH = 7,0 mostraram que o aumento do tempo de floculação praticamente não afetou a eficiência do processo, para as dosagens testadas, sendo encontradas variações de 82 a 84%. Escolheu-se então o tempo de 10 minutos de floculação, para a continuidade dos experimentos, com eficiência de 82%.

De uma maneira geral, observou-se uma diminuição no tempo de floculação com o aumento do pH. Este tempo irá depender também das espécies hidrolisadas formadas e dos mecanismos predominantes. De acordo com Richter; Gross (2000) *apud* Richter (2001), nas instalações de FAD no Brasil, os tempos de floculação variam entre 3,5 a 20 minutos, com uma média de 12 minutos, não se verificando influência significativa do tempo de flotação nos resultados obtidos na flotação. Segundo Al-Shamrani; James; Xiao (2002) *apud* Teixeira (2003), ainda não são claras quais as condições ótimas para a flotação por ar dissolvido. Há divergências quanto ao tempo de floculação, gradiente de velocidade e tamanho dos flocos.

5.1.4. Taxa de recirculação

Nesta etapa foram testadas as taxas de recirculação de 5, 10, 15 e 20% e sua influência na redução de turbidez. Na Figura 5.4 são mostrados os resultados encontrados.

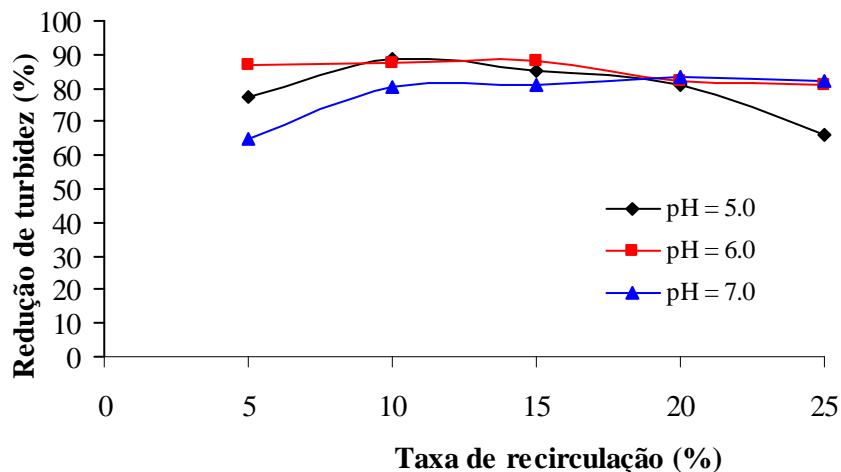


Figura 5.4. Relação do tempo de recirculação e redução de turbidez (%) nos pHs 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.

Os resultados encontrados para o pH = 5,0 mostram que, para a dosagem estudada, a taxa de recirculação que apresentou melhores eficiências foi de 10%, com eficiência de redução de turbidez de 88,5%.

Para o pH = 6,0 os resultados encontrados mostram que a variação de 5 a 15% na taxa de recirculação apresentou pouca variação de redução de turbidez. Sendo escolhida a taxa de 10% que apresentou uma eficiência de redução de 88%.

Para o pH = 7,0 os resultados encontrados mostraram pouca variação na redução de turbidez para a dosagem testada, com a variação da taxa de recirculação na faixa de 10 a 25%. A taxa de recirculação escolhida foi de 10% com eficiência de redução de turbidez de 81%.

De acordo com Richter (2001), a taxa de recirculação usualmente utilizada no sistema de flotação para clarificação de água está entre 6 a 15%. Longhurt ;Graham (1987) *apud* Edzwald (1995) verificaram que o aumento da taxa de recirculação implica em maior turbulência no ponto de introdução da corrente saturada na câmara de flotação, podendo causar a ruptura dos flocos.

A Tabela 5.1 mostra as melhores condições de pré-tratamento e parâmetros de projeto e operação da FAD nos três valores de pH estudados, sendo: D- dosagem de coagulante; T_f – tempo de floculação; TAS – taxa de aplicação superficial; R-taxa de recirculação

Tabela 5.1. Melhores condições de pré-tratamento e parâmetros de projeto e operação da FAD em função dos pHs nas etapas dos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio.

pH	D(mg/L)	TAS ($m^3/m^2 \cdot d$)	T_f (min)	R (%)
5,0	15	482	20	10
6,0	15	241	15	10
7,0	30	121	10	10

Nos valores de pH 5,0 e 6,0 as melhores eficiências foram alcançadas com baixas dosagens (15 mg/L); observou-se que com o aumento do pH, o tempo de floculação se apresentou cada vez menor; as taxas de aplicação superficial diminuiram com o aumento do valor dos três pH; as taxas de recirculação foram às mesmas para os três valores de pH estudados. Para se determinar a melhor condição operacional, deve-se levar em conta alguns fatores tais como: otimização das dosagens, significando menores gastos com produtos químicos; a adoção de uma taxa de aplicação maior implica em menor área para implantação de uma coluna ou tanque de flotação; a utilização de menores tempos de floculação representa menores dimensões para os floculadores; a adoção de menores taxas de recirculação representa menores custos de energia para a saturação da água, ou seja, é necessário se levar em conta à relação custo-benefício para cada situação específica.

5.2. Ensaios de Flotação utilizando sementes de *Moringa oleifera*

Foram realizados testes com *Moringa oleifera* em três diferentes valores de pH: 6,4 (sem ajuste), 7,0 e 8,0 com o objetivo de verificar se esta alteração poderia trazer ganhos ao processo no que diz respeito a melhoria na eficiência de redução de turbidez . Os resultados são apresentados nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

5.2.1. Avaliação da variação da dosagem de coagulante na eficiência do processo

Na Figura 5.5 são mostrados os resultados encontrados para diferentes dosagens de *Moringa oleifera* e sua influência na redução de turbidez.

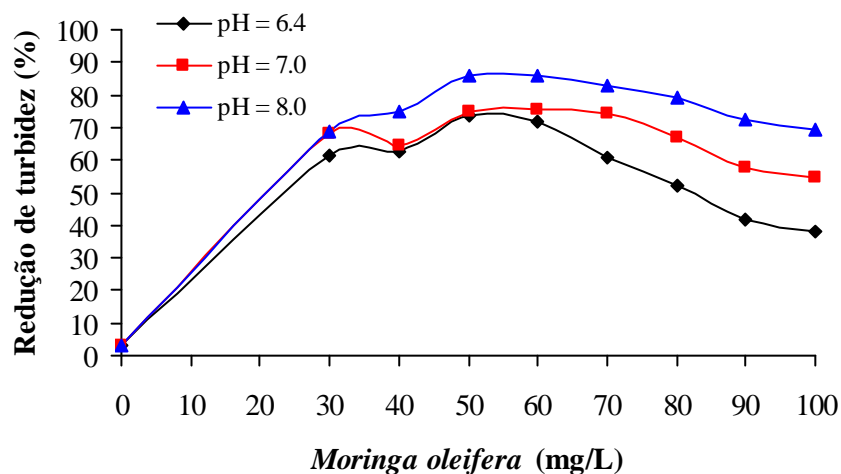


Figura 5.5. Relação das dosagens de *Moringa oleifera* e redução de turbidez (%) nos valores de pH 6,4, 7,0 e 8,0 nos ensaios de Flotação utilizando sementes de *Moringa oleifera*.

Para o pH 6,4 verificou-se um aumento no percentual de redução de turbidez até chegar a uma eficiência de 74% na dosagem de 50 mg/L. Acima desta dosagem verifica-se uma diminuição da eficiência do processo.

No pH 7,0 verificou-se um aumento no percentual de redução de turbidez com o aumento da dosagem atingindo eficiências de redução de 75% nas dosagens de 50, 60 e 70 mg/L.

Para o pH 8,0 o comportamento foi semelhante aos pHs anteriores, sendo que as dosagens de 50 e 60 mg/L apresentaram um maior percentual de redução de turbidez (86%).

Diante dos resultados, observou-se que com o aumento do valor do pH, a eficiência de redução de turbidez aumentou alcançando valores que variaram da faixa de 74 a 88%.

Considerando estes resultados, para as etapas seguintes foi adotada a dosagem de 50 mg/L de *Moringa oleifera* em todos os valores de pH.

5.2.2. Taxa de aplicação superficial

Nesta etapa as taxas de aplicação superficial variaram de 80 m³/m².d a 482 m³/m².d. A Figura 5.6 mostra os resultados obtidos.

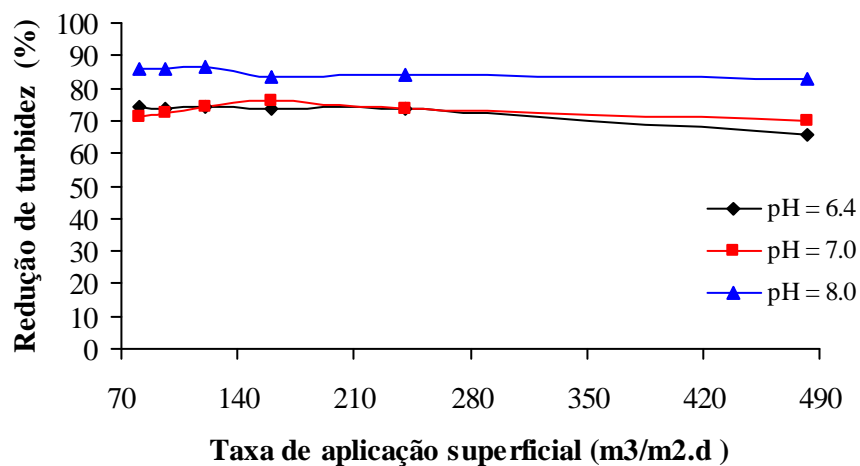


Figura 5.6. Relação das taxas de aplicação superficial e redução de turbidez (%) nos valores de pH 5,0, 6,0 e 7,0 nos ensaios de Flotação utilizando sementes de *Moringa oleifera*.

As variações das taxas de aplicação superficial de 80 a 241 m³/m².d no pH 6,4 praticamente não afetaram a eficiência do processo. Foi escolhida então a taxa de aplicação superficial de 241 m³/m².d para as etapas seguintes, que apresentou um percentual de redução de turbidez de 74% .

A taxa de aplicação superficial que apresentou menor turbidez remanescente no pH 7,0 foi de 161 m³/m².d, com redução de turbidez de 76%, sendo escolhida para dar continuidade aos experimentos.

Para o pH 8,0 observou-se pouca variação na faixa de 80 a 121 m³/m².d. Foi escolhida então a taxa de aplicação superficial de 121 m³/m².d para as etapas seguintes, que proporcionou uma redução de turbidez de 86%.

Observou-se também a mesma tendência observada com o sulfato de alumínio em relação à taxa de aplicação superficial, que diminuiu com o aumento do pH.

5.2.3. Tempo de floculação

Nesta etapa os tempos de floculação testados foram de 0, 5, 10, 15 e 20. Esta etapa foi efetuada com as melhores condições encontradas nas etapas anteriores.

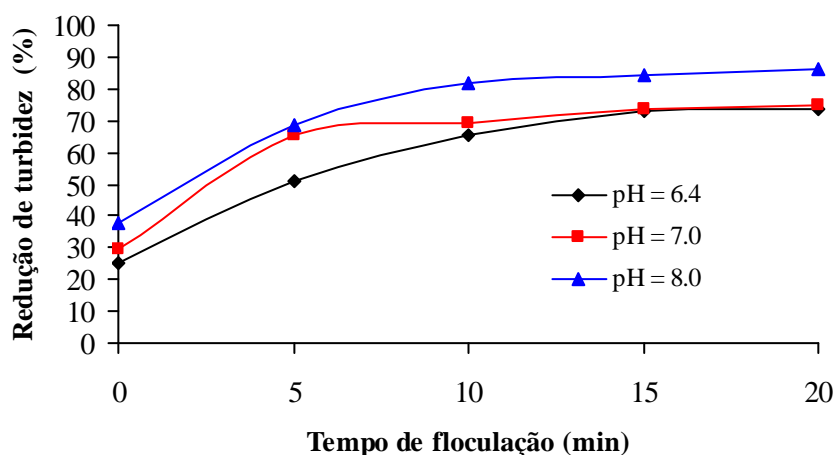


Figura 5.7. Relação do tempo de floculação e redução de turbidez (%) nos valores de pH 6,4, 7,0 e 8,0 nos ensaios de Flotação utilizando sementes de *Moringa oleifera*.

Verificou-se para o pH 6,4 um aumento na eficiência do processo com o aumento do tempo de floculação, alcançando maiores valores nos tempos de 15 e 20 minutos. Escolheu-se o tempo de floculação de 15 minutos para dar continuidade aos experimentos, que apresentou uma eficiência de 74%.

Para o pH 7,0 os tempos de floculação de 10 a 20 minutos apresentaram variações de remoções de 69 a 75%. Escolheu-se o tempo de floculação de 20 minutos para dar continuidade aos experimentos, que apresentou um percentual de redução de turbidez de 75%.

Para o pH 8,0 os resultados obtidos mostraram aumento na redução de turbidez com o aumento do tempo de floculação. Escolheu-se então o tempo de 20 minutos que se mostrou adequado para a continuidade dos experimentos, com redução de turbidez de 86%.

5.2.4. Taxa de recirculação

Nesta etapa as taxas de recirculação testadas foram de 5, 10, 15, 20 e 25%. Os resultados encontrados são mostrados na Figura 5.8.

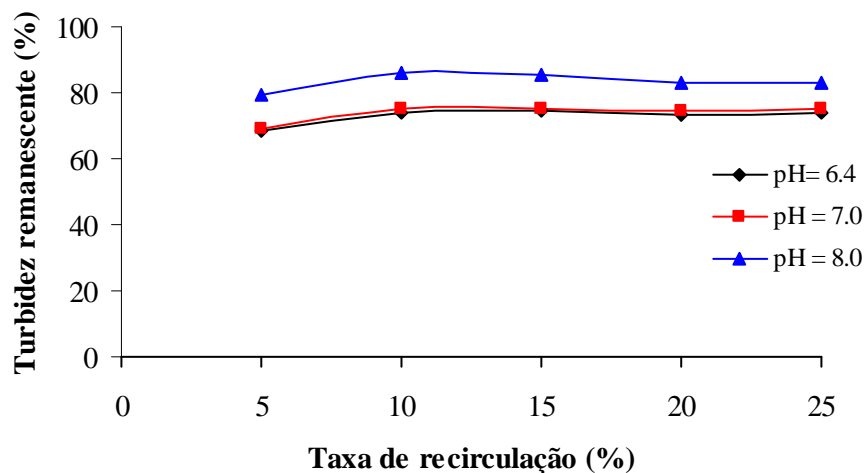


Figura 5.8. Relação do tempo de recirculação e redução de turbidez (%) nos valores de pH 6,4, 7,0 e 8,0 nos ensaios de Flotação utilizando sementes de *Moringa oleifera*.

Verifica-se pouca variação na eficiência do processo com a variação da taxa de recirculação. Escolheu-se a taxa de recirculação de 10% para todos os valores de pH que tiveram eficiências de redução de turbidez variando de 74 a 86 %. Para ambos coagulantes foi escolhida a mesma taxa, o que implica em menores gastos energéticos na saturação da água.

A Tabela 5.2 mostra as melhores condições otimizadas de pré-tratamento e parâmetros de projeto e operação da FAD nos três valores de pH estudados, sendo: D-dosagem de coagulante; T_f —tempo de floculação; TAS—taxa de aplicação superficial; R—taxa de recirculação.

Tabela 5.2. Melhores condições de pré-tratamento e parâmetros de projeto e operação da FAD em função dos pHs nas etapas dos ensaios de flotação utilizando sementes de *Moringa oleifera*.

Etapas/ pH	D(mg/L)	TAS (m³/m². d)	T_f (min)	R (%)
6,4	50	241	15	10
7,0	50	161	20	10
8,0	50	121	20	10

Para a *Moringa oleifera* verificou-se que as melhores eficiências de redução de turbidez foram à dosagem aproximada de 50 mg/L para todos os pHs; os tempos de floculação, taxas de aplicação superficial e taxas de recirculação se mantiveram na faixa recomendada por diversos pesquisadores utilizando ambos coagulantes. Diante dos resultados verifica-se que a alteração do pH trouxe ganhos ao processo, no sentido de aumento do percentual de redução de turbidez, porém, mesmo sem a alteração de pH as sementes de *Moringa oleifera* se mostraram eficientes na redução de turbidez em amostras de baixa turbidez utilizando FAD, alcançando valores de 88% de redução.

Neste trabalho, nos ensaios com *Moringa oleifera*, verificou-se que as dosagens utilizadas para se atingir as melhores reduções de turbidez foram maiores do que as utilizadas com o sulfato de alumínio. Verificou-se também que para a dosagem aproximada de 50 mg/L de *Moringa oleifera* existe uma situação de máxima redução da turbidez para os três valores de pH.

Na Tabela 5.3 são apresentados os resumos da análise de variância para os ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera* para a variável turbidez remanescente (uT) nos diferentes valores de pH.

Tabela 5.3. Resumo da análise de variância nas etapas dos ensaios de flotação utilizando sulfato de alumínio e sementes de *Moringa oleifera* para a variável turbidez remanescente nos diferentes valores de pH.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio	
		Sulfato de alumínio	<i>Moringa oleifera</i>
Etapa 1 - Dosagem (mg/L)			
Dosagem	11 (7) ¹	1,6308**	0,3441**
pH	2	2,1244**	0,1420**
Dosagem x pH	22 (14) ¹	0,5870**	0,0606**
Erro	28 (21) ¹	0,0044	0,0034
CV (%)		4,85	5,93
Média geral		1,3595 a	0,9818 b
Etapa 2 - Tempo de floculação (TF), em min			
TF	4	0,4256**	0,7162**
pH	2	0,3770**	1,0424**
TF x pH	8	0,1032**	0,5527**
Erro	15	0,0047	0,0047
CV (%)		10,46	6,93
Média geral		0,6533 b	0,9887 a
Etapa 3 - Taxa de aplicação superficial (TAS), em m ³ /m ² .d			
TAS	5	0,0349**	0,0233**
pH	2	0,0353**	0,6471**
TAS x pH	10	0,0159**	0,0063*
Erro	18	0,0013	0,0018
CV (%)		6,89	5,87
Média geral		0,5322 b	0,7272 a
Etapa 4 - taxa de recirculação (TC), em %			
TC	4	0,1148**	0,0354**
pH	2	0,0596**	0,4133**
TC x pH	8	0,0759**	0,0010 ^{ns}
Erro	15	0,0035	0,0018
CV (%)		10,23	5,80
Média geral		0,5800 b	0,7267 a

** e * significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. ^{ns} não significativo. Médias gerais seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

¹ grau de liberdade relativo à *Moringa Oleifera*.

Observa-se que houve efeito significativo de todos os fatores com exceção da interação entre taxa de recirculação e pH ($P > 0,05$) para o ensaio com sementes de *Moringa oleifera*, indicando que o comportamento das taxas de recirculação com relação a turbidez remanescente segue uma mesma tendência independente dos pHs como pode ser observado na Figura 5.8. Os coeficientes de variação variaram de 4,85 a 10,46%, indicando boa precisão nos ensaios. Observa-se que, para todas as etapas, as médias dos ensaios com sementes de *Moringa oleifera* foram estatisticamente superiores aos ensaios com sulfato de alumínio ($P < 0,05$), com exceção da etapa 1, em que o coagulante sulfato de alumínio apresentou redução de turbidez superior ao coagulante com sementes de *Moringa oleifera*.

5.3. Medidas de mobilidade eletroforética utilizando sulfato de alumínio

Os resultados de potencial zeta e turbidez remanescente dos testes realizados em três valores diferentes de pH (5,0, 6,0 e 7,0) são apresentados nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11.

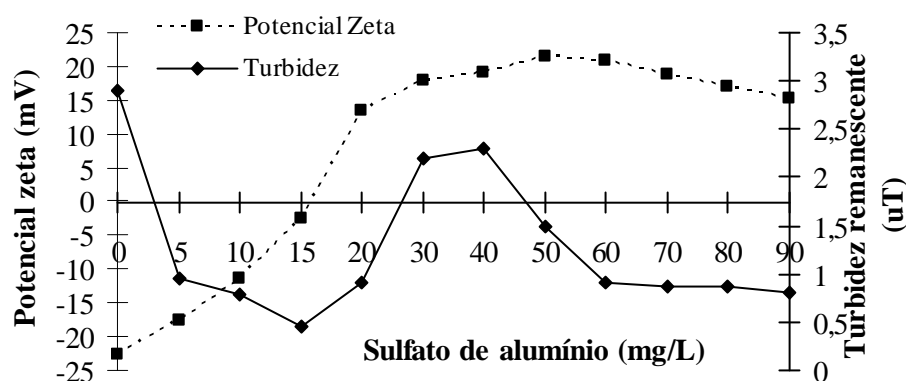


Figura 5.9. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de sulfato de alumínio em pH = 5,0.

Observa-se na Figura 5.9 que o potencial zeta variou entre -22,50 mV a +21,57 mV, aumentando com o aumento da dosagem do coagulante. O ponto isoelétrico e a reversão da carga coloidal são observados na dosagem aproximada de 16 mg/L. A melhor eficiência foi observada na dosagem de 15 mg/L; correspondendo a um percentual de redução de 84%.

O típico diagrama de coagulação desenvolvido por Amirtharajah; Mills (1982) considerando dosagens de $\text{Al}_2(\text{SO})_4 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}$ versus pH da mistura é utilizado para melhor compreensão dos mecanismos envolvidos na coagulação. Observa-se a existência de regiões distintas para diferentes mecanismos de coagulação, seja na adsorção-neutralização de cargas, varredura, ou na combinação de ambos. A predominância de um mecanismo de coagulação depende do valor do pH de coagulação, do coagulante usado e sua dosagem e, também das características da qualidade da água, carga e concentração das partículas, em termos de área superficial (O'Melia, 1972).

Por meio do diagrama de coagulação e dos resultados mostrados na figura 5.9, que mostram que a melhor eficiência de redução está próxima ao ponto onde o potencial zeta é nulo (ponto isoelétrico), o mecanismo de coagulação predominante neste pH é o de adsorção-neutralização de cargas. Neste mecanismo ocorre a neutralização da carga das partículas coloidais pelas espécies hidrolisadas de alumínio, que são adsorvidas na superfície dos colóides.

A Figura 5.10 mostra os resultados das variações das dosagens de sulfato de alumínio e o efeito destas sobre o potencial zeta e na eficiência de redução de turbidez obtidos no pH = 6,0.

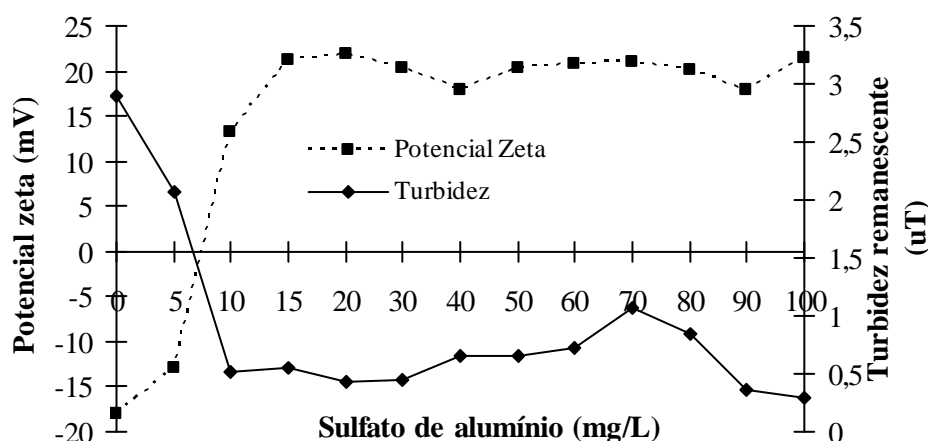


Figura 5.10. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de sulfato de alumínio em pH = 6,0.

Observa-se na curva do potencial zeta, a reversão da carga coloidal na dosagem de coagulante aproximada de 7 mg/L. O potencial zeta variou de -17,90 mV a +22,94 mV. A faixa de

dosagem ótima de coagulante foi de 10 a 30 mg/L, com variações de eficiência entre 81 e 85%. O diagrama de coagulação desenvolvido por Amirtharajah; Mills (1982), mostra que neste pH podem-se obter duas faixas de valores de dosagens de sulfato de alumínio em que se consegue uma boa coagulação, na inferior a coagulação é realizada pelo mecanismo de adsorção neutralização de cargas e na superior a coagulação é devida ao efeito de varredura.

Após a reversão da carga coloidal (7mg/L), os valores da turbidez continuam reduzidos, sugerindo que a redução de turbidez não está controlada predominantemente por forças eletrostáticas. Os resultados das medidas de mobilidade eletroforética sugerem a predominância do mecanismo de adsorção-neutralização de cargas para baixas dosagens de sulfato, podendo haver uma combinação dos mecanismos de adsorção neutralização de cargas e varredura até a dosagem de 80 mg/L. Acima da dosagem de 80 mg/L, verificou-se uma melhora na redução de turbidez (90%). Nesta faixa, sugere-se a predominância do mecanismo de varredura, no qual ocorre a formação de precipitados de hidróxidos de alumínio, juntamente com as partículas coloidais aprisionadas aos mesmos.

Lacerda (1997) também verificou a presença de duas faixas de valores de dosagens em que se têm melhores eficiências de redução de turbidez neste pH. A presença de duas faixas de valores de dosagens em que se têm melhores eficiências de remoção de turbidez (Figura 5.10), coincide com o observado no diagrama de coagulação neste pH, confirmando a predominância destes dois mecanismos.

Na Figura 5.11 são mostradas as variações do potencial zeta em diferentes dosagens de sulfato de alumínio, testadas em pH = 7,0.

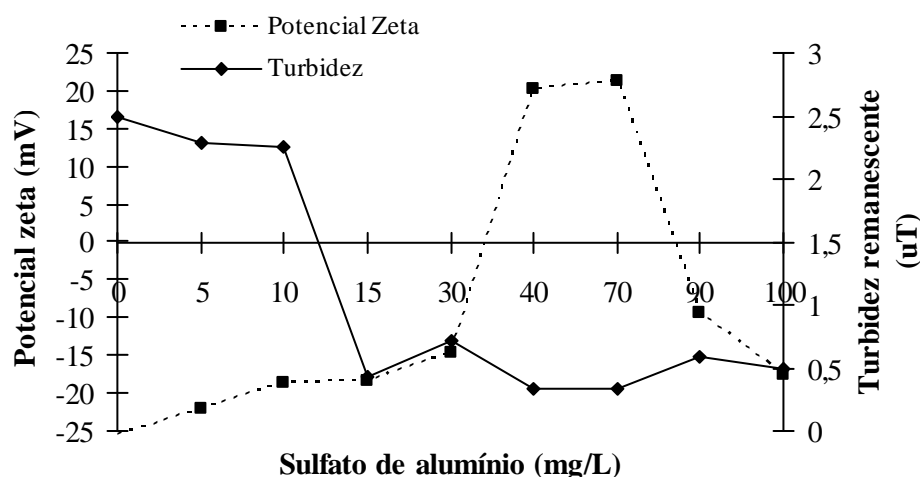


Figura 5.11. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de sulfato de alumínio em pH= 7,0.

Verificou-se que o Potencial zeta variou de $-25,4$ a $+21,37$ mV, até a dosagem de 70 mg/L. As melhores eficiências ocorreram nas dosagens de 15 a 70mg/L, correspondendo a uma variação de eficiência de 79 a 86%. Observa-se a melhora na eficiência do processo com o aumento da dosagem, caracterizando o mecanismo de varredura. De acordo com o diagrama de coagulação, no pH 7,0, verifica-se a predominância do mecanismo de varredura. Nas dosagens acima de 80 mg/L foi observado um potencial zeta negativo. Sabe-se que na coagulação com sulfato de alumínio, as reações de hidrólise formam diferentes compostos, dependendo do pH de origem da água, alcalinidade, temperatura, outras partículas, matéria orgânica, dosagem de coagulante e pH de coagulação (DI BERNARDO, 1993). É provável que o potencial zeta negativo observado nas dosagens acima de 80 mg/L, seja dos complexos hidroximetálicos presentes nessa dosagem e pH.

Neste trabalho também foram feitas observações microscópicas durante as medidas de mobilidade eletroforética, que auxiliaram na compreensão dos mecanismos de coagulação. Diversos pesquisadores verificaram que os flocos formados no mecanismo de varredura são maiores do que os formados no mecanismo de adsorção neutralização de cargas (DI BERNARDO, 1993, FUKUSHI *et al.*, 1995, PAVANELLI, 2001, TEIXEIRA, 2003). Wang, Jin; Gregory (2002) verificaram que os flocos formados com alumínio no pH 5 parecem mais compactos com alta dimensão fractal, enquanto que os formados no pH 7 são largos, com baixa dimensão fractal.

No pH 5,0, as observações microscópicas durante as medidas realizadas, revelam a presença de pequenos flocos dispersos no meio para todas as dosagens testadas. As características dos flocos formados indicam que o mecanismo predominante neste pH é o de adsorção neutralização de cargas. No pH 6,0, as observações microscópicas durante as medidas revelaram a formação de pequenos flocos dispersos no meio até a dosagem de 80 mg/L. Acima desta dosagem observou-se a formação de flocos mais volumosos e agrupados, indicam a predominância do mecanismo de adsorção-neutralização de cargas para baixas dosagens de sulfato, podendo haver uma combinação dos mecanismos de adsorção neutralização de cargas e varredura até a dosagem de 80 mg/L. Acima da dosagem de 80 mg/L, verificou-se a formação de flocos maiores e uma melhora na redução de turbidez, sugerindo a predominância do mecanismo de varredura. No pH 7,0, as características dos flocos formados observados no microscópio, flocos maiores do que os observados no mecanismo adsorção-neutralização de cargas, sugerem a predominância do mecanismo de varredura.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 observa-se que o mecanismo de adsorção neutralização de cargas predomina a baixas dosagens de sulfato de alumínio, enquanto que o mecanismo de varredura predomina em maiores dosagens de coagulante. Diversos pesquisadores observaram a predominância de mecanismos de coagulação distintos, para diferentes valores de pH, utilizando coagulante a base de alumínio, apresentando resultados similares, podendo-se citar: AMIRTHARAJAH; MILLS, 1982; EDZWALD; WINGLER 1990; PAVANELLI, 2001; TEIXEIRA, 2003 entre outros.

5.4- Medidas de mobilidade eletroforética utilizando *Moringa oleifera*

Foram realizados testes com sementes de *Moringa oleifera* em três valores diferentes de pH 6,4 (sem ajuste), 7,0 e 8,0, com o objetivo de verificar se esta alteração poderia trazer ganhos ao processo no que diz respeito a melhoria na eficiência de redução de turbidez. Os resultados são mostrados nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14.

Na Figura 5.12 são mostradas as variações das dosagens de *Moringa oleifera* e suas influências sobre o potencial zeta e na eficiência de redução de turbidez no pH 6,4.

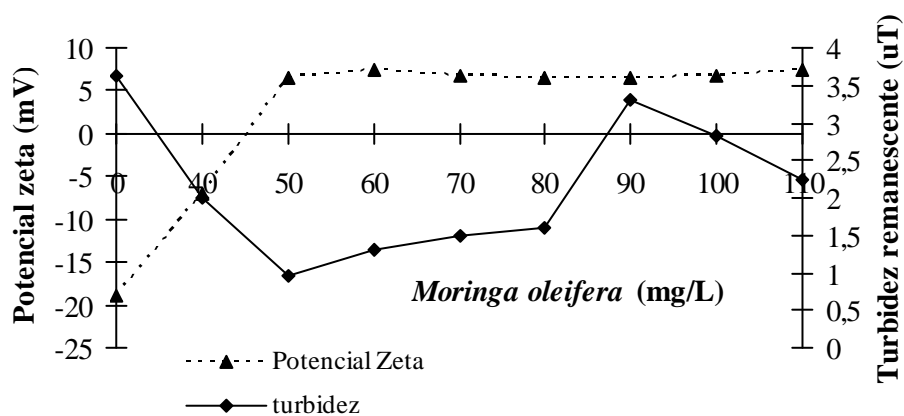


Figura 5.12. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de *Moringa oleifera* em pH = 6,4, sem ajuste.

Observa-se na curva do potencial zeta a passagem pelo ponto isoelétrico e a reversão da carga coloidal, que em termos de potencial variou de -18,90 mV a +7,40 mV. A melhor eficiência de redução foi observada na dosagem de 50 mg/L, próxima ao ponto onde o potencial zeta é nulo, correspondendo a um percentual de redução de turbidez de 74%.

A Figura 5.13 mostra as variações das dosagens de *Moringa oleifera* e suas influências sobre o potencial zeta e na eficiência de redução de turbidez no pH 7,0.

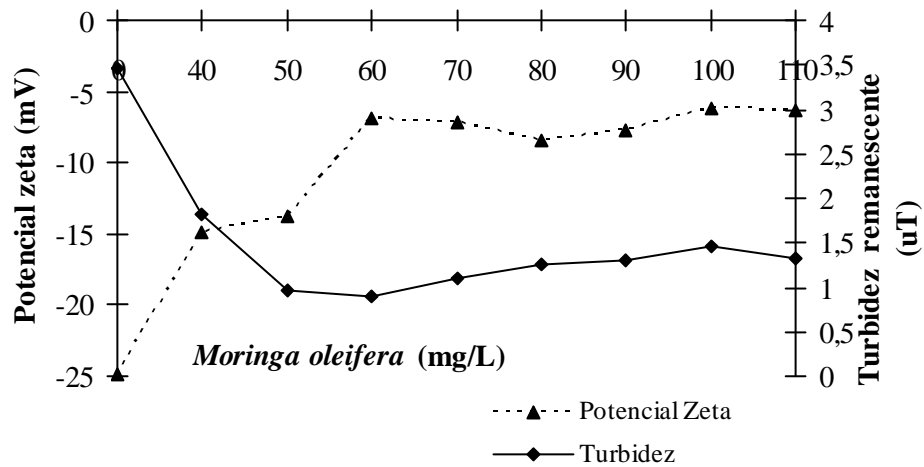


Figura 5.13. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de *Moringa oleifera* em pH = 7,0.

Observa-se que o potencial zeta variou de -24,90 mV a -6,30 mV, não ocorrendo reversão da carga coloidal. As dosagens ótimas de coagulante foram de 50 e 60 mg/L; correspondendo a percentuais de redução de 72 e 74%.

Na Figura 5.14 são mostradas as variações do potencial zeta nas dosagens de *Moringa oleifera* testadas em pH= 8,0.

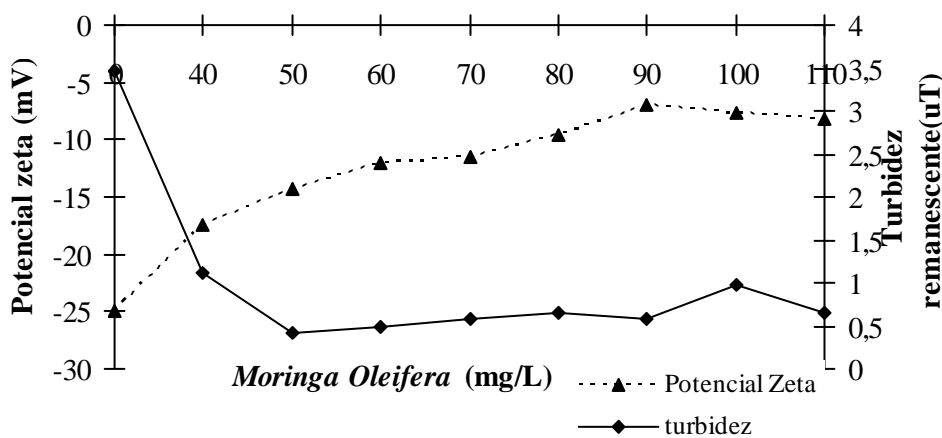


Figura 5.14. Potencial zeta e turbidez remanescente para diferentes dosagens de *Moringa oleifera* em pH = 8,0.

Verificou-se que o Potencial zeta variou de $-24,9$ a $-8,19$ mV, não ocorrendo reversão da carga coloidal. A melhor eficiência de redução ocorreu na dosagem de 50 mg/L, com percentual de redução de 88%.

Nesta investigação observou-se que com o aumento do valor do pH, a eficiência de redução de turbidez aumentou atingindo valores de 74 a 88%, sendo o comportamento das curvas nos valores de pH 7,0 e 8,0, similares.

No pH 6,4 as medidas de mobilidade eletroforética indicam que o mecanismo de coagulação predominante é o de adsorção-neutralização de cargas, podendo ocorrer simultaneamente o mecanismo de adsorção e formação de pontes. Nos valores de pH 7,0 e 8,0, verifica-se que a coagulação com sementes de *Moringa oleifera* não é controlada por forças eletrostáticas, o que nos leva a sugerir que o mecanismo de coagulação seja o de adsorção e formação de pontes, como sugerido também em outros trabalhos realizados anteriormente (NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995).

As observações microscópicas durante as medidas de ME no pH 6,4 revelaram a formação de poucos e pequenos flocos dispersos no meio, em todas as dosagens testadas. Os flocos, quase não visíveis a olho nu, menor do que os observados utilizando o sulfato de alumínio. Jahn, 1986, verificou que o desempenho das sementes de MO é comparável ao do sulfato de alumínio como coagulante e os flocos formados utilizando MO são menores do que os observados com o sulfato de alumínio.

Capítulo 6

Conclusões

6- Conclusões

Com base nos resultados obtidos durante os estudos no flotatestes, entre as principais conclusões destacam-se:

- Para o sulfato de alumínio a variação nos valores do pH teve um efeito significativo sobre os parâmetros investigados: nos valores de pH 5,0 e 6,0 as melhores eficiências foram alcançadas com baixas dosagens (15 mg/L), alcançando valores de até 92%; Para o pH 7,0 a melhor eficiência foi encontrada na dosagem de 30 mg/L, correspondendo a 85%. As taxas de aplicação superficial variaram de 482 a 121 m³/m². d; O tempo de floculação apresentou variações de 10 a 20 minutos com a variação dos valores de pH.
- Para a *Moringa oleifera*, as melhores eficiências de redução de turbidez foram à dosagem aproximada de 50 mg/L para todos os valores de pH investigados, alcançando valores de 86%; o tempo de floculação apresentou variações de 15 a 20 minutos; As taxas de aplicação superficial variaram de 241 a 121 m³/m². d com a variação dos valores de pH. A variação do pH para este coagulante teve um efeito significativo sobre os parâmetros investigados, com exceção da interação entre taxa de recirculação e pH. Diante dos resultados verifica-se que a alteração do pH trouxe ganhos ao processo, no sentido de aumento do percentual de redução de turbidez, porém, mesmo sem a alteração de pH as sementes de *Moringa oleifera* se mostraram eficientes na redução de turbidez em amostras de baixa turbidez utilizando FAD, alcançando valores de 74% de remoção.

Em relação aos resultados obtidos durante as medidas de mobilidade eletroforética, pode-se concluir que:

- Para o sulfato de alumínio, o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas predomina no pH 5,0; Os mecanismos de coagulação predominantes no pH 6,0 são os de adsorção e neutralização de cargas em baixas dosagens, e varredura com maiores dosagens. No pH 7,0 predomina o mecanismo de varredura.
- O mecanismo de coagulação predominante no pH 6,4 com sementes de *Moringa oleifera* é o de adsorção-neutralização de cargas, podendo ocorrer simultaneamente o mecanismo de adsorção e formação de pontes; Nos pHs 7,0 e 8,0, verificou-se que o mecanismo predominante é o de adsorção e formação de pontes.
- Os resultados encontrados podem servir de base para trabalhos futuros envolvendo a FAD, confirmando que as sementes da *Moringa oleifera* podem ser utilizadas como um coagulante eficaz para a clarificação de água com baixa turbidez, sinalizando a possibilidade de aplicação de um coagulante natural em substituição aos convencionalmente utilizados, constituindo-se em uma tecnologia ambientalmente correta.

Referências Bibliográficas

Referências

ALMEIDA NETO, M.A. *Uso da semente do gênero moringa*. Disponível em: <<http://www.cpatsa.embrapa.br/catalogo/doc/posters>. Acesso em 10 out 2008.

AMARAL, L.A. *et al.* Tratamento alternativo da água utilizando extrato de semente de *Moringa oleifera* e radiação solar. *Arq. Inst. Biol.*, São Paulo, v.73, n. 3, p.287-293, jul./set., 2006

AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K.M. Rapid-mix dosing for mechanisms of alum coagulation, *J. Am. Water Works Assoc.* v.74, p.210–216, 1982.

ANDRADE, T.M. *Avaliação Bacteriológica do Tratamento Alternativo da Água através do Lírio Branco (Moringa oleifera Lam) para as Comunidades Rurais*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2003.

ARAÚJO, A.C.; PERES, A.E.C.; BRANDÃO, P.R.G. *Determinação do Potencial Zeta*. In: SIMPÓSIO EPUSP DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA NA ENGENHARIA E INDÚSTRIA MINERAL, 1990, São Paulo. Anais... São Paulo: p. 231-247.

ASSIS, R.S.S. *Remoção de Microcystis aeruginosa e microcistinas por flotação por ar dissolvido- estudo em escala de bancada utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulantes*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)-Universidade de Brasília, 2006.

AZEVEDO NETTO, J.M. *Técnicas de abastecimento e tratamento de água*. São Paulo: CETESB, 1976.

BALTAR, C.A.M. *Floculação*. In: *Tratamento de Minérios*. 4 ed., Rio de Janeiro: Cetem/MCT, 2004.

BORBA, L.R. *Viabilidade do uso da Moringa oleifera Lam no Tratamento Simplificado de Água para Pequenas Comunidades*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal da Paraíba, 2001.

BRATBY, J.R. Raw sewage excess flow treatment by dissolved air flotation. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v.54, n.12, p.1553-1565, 1982.

BUNKER, D.Q.; EDZWALD, J.K.; DAHLQUIST, J.; GILLBERG, L. Pretreatment considerations for dissolved air flotation: water type, coagulants and flocculation. *Wat.Sci.Tech*, v. 31, n.3-4, p.63-71, 1995.

CAMPOS, S.X., DI BERNARDO, L., VIEIRA, E.M. *Engenharia Sanitária e ambiental*, v.10, n.3 , p. 194-199- jul/ set 2005.

CAPRINET Moringa: purificadora de água e fonte de vitamina A. Disponível em: <<http://www.caprinet.com.br/artigo14032003-02>>. Acesso em: 10 out. 2008.

CASTRO, F.J.F.; SILVA, F.J.A. *Moringa oleifera na melhoria da qualidade de efluentes de UASB e de lagoa de maturação-Remoção de cor e turbidez*. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 11, 2004, Natal/RN. Anais... Natal/RN, 2004.

CHAVES, A.P.; LEAL FILHO, L.S. Flotação. In: CETEM/CNPq, *Tratamento de Minérios*. 3 ed., 2002.

DIAZ, A. *et al.* A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. *Process Biochemistry*, v.35, p.391-395, 1999.

DI BERNARDO, L. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. ABES, Rio de Janeiro, v.1, 1993.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.B. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 2 ed. São Carlos: RiMa Editora, 2005.

DI BERNARDO, L; BERNARDO A.S.; CENTURIONE FILHO, P.L. Estudos de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água., São Carlos: RiMa , 2002

EDZWALD, J.K. *Principles and applications of dissolved air flotation*. Wat.Sci.Tech, v.31, n.3-4, p.1-23, 1995.

EGITO, L.C.M. *Análise da presença de agentes mutagênicos nas águas do rio Pitimbu/RN*. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

FUERSTENAU, D.W. Mineral-Water interface and electrical double layer In: PERES, A.E.C.C; MONTE, M.B.M. *Química de superfície na flotação: tratamento de minérios*. 4 ed. Rio de Janeiro: Cetem/MCT, 2004.

FUKUSHI, K., TAMBO, N., MATSUI, Y. A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment. *Water Science & Technology*, v.31, n.3-4, p.37-47, 1995.

GALÃO, M.I.; DAMASCENO; L.F., BRITO, E.S. Avaliação química e estrutural da semente de moringa, *Revista Ciência Agronômica*, v.37, n. 1, p.106-109, 2006

GASSENSCHMIDT, U. *et al*. Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 1243, p. 477-481, 1995.

GERDES, G. *Como limpar e tratar água suja com sementes de Moringa oleifera*. Fortaleza: ESPLAR, 1997.

GHEBREMICHAEL, K.A. *Moringa seed and pumice as alternative natural materials for drinking water treatment*. PhD thesis, Department of Land and Water Resources Engineering Stockholm, Sweden, 2004.

GHEBREMICHAEL, K.A., *et al.* A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. *Water Research*, v.39, p.2338-2344, 2005.

GREGORY, R. *Summary of general developments in DAF for water treatment since 1976*:. Proceedings of Dissolved air Flotation International Conference, the Chartered Institute of Water and Environment Management. Londres: 1997.

GUEDES, C.D. *Coagulação / Floculação de águas superficiais de minerações de turbidez elevada*. Tese (doutorado), Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

HUNTER, R.J. *Zeta Potential in Colloid Science- Principles and Applications*, p.59-121. Academic Press, New York, 1981.

JAHN, S.A.A. *Proper use of African natural coagulants for rural water supplies- Research in the Sudan and a guide for new projects*. Rossdorf: - Verlagsgesellschaft, 1986.

KAMINSKI, I.; VESCAN, N.; ADIN, A. Particle size distribution and wastewater filter performance. *Wat.Sci.Tech*, v.36, n.4, p.217-224, 1997.

KATAYON, S. *et al.* Effects of Storage Conditions of Moringa Oleifera Seeds on its Performance in Coagulation. *Bioresource Technology*, v.97, p.1455-1460, 2006.

KIURU, H.J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). *Wat.Sci.Tech*, v.43, n.8, p.1-7, 2001

LACERDA, M.R.S. *A influência do pH de coagulação e do tempo de floculação na flotação por ar dissolvido no tratamento de água com baixa turbidez e presença de algas*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)- Universidade de Brasília, 1997.

LACERDA, M.R.S.; BRANDÃO, C.C.S.; MARQUES, S.F.S. *A influência do pH de coagulação e do tempo de floculação na flotação por ar dissolvido no tratamento de água com baixa turbidez e presença de algas.* In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., Foz do Iguaçu, 1997. Anais... Foz do Iguaçu, 1997.

LOBATO, S.J.M., FAITANIN, L., MORESCHI, V. O sucesso da flotação por ar dissolvido no pré-tratamento da água bruta da ETA-Meaípe-ES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18., 1995, Anais...ABES, 1995.

LOPES, A. S.; SILVA, F.J.A. Tratamento de efluente de tanque de piscicultura com *Moringa oleifera*. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 11., 2004, Natal. Anais...Natal, 2004.

MARCHETTO, M.; REALI, M.A.P. High-rate dissolved air flotation for water treatment. *Wat.Sci.Tech*, v. 43, n.8, p.43-49, 2001.

MARCHETTO. M.; REALI, M.A.P. Influência do ângulo de inclinação das placas no desempenho de uma unidade original de flotação de alta taxa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., Foz do Iguaçu, 1997. Anais... Foz do Iguaçu, 1997.

MENDES, C.G.N. *Estudo da coagulação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis.* Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 1989.

METCALF; EDDY, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse.* 3.ed. New York: Mc Graw Hill, 1991, 1334p.

MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. Investigação da coagulação e floculação adequadas para a FAD no tratamento de água com cor aparente moderada e baixa turbidez destinada ao abastecimento público. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n.11, p.55-66, 2008.

MUYIBI, S.A.; EVISON, L.M. Optimizing physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Moringa oleifera* Seeds. *Wat. Sci.Tech.* v.29, n.12, p.2689-2695, 1995.

NDABIGENGESERE A., NARASIAH, K.S., TALBOT, B.G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Wat.Sci.Tech.*, v.29, n.2, p.703-710, 1995.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K.S. Influence of operating parameters on turbidity removal by coagulation with *Moringa oleifera* seeds. *Environ Technol.*, v.17, p.1103-1112, 1996.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K.S. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, v.32, n.03, p.781-791, 1998.

NGUYEN *et al.* Investigations of bubble-particle interactions. *International Journal of Mineral Processing*, v.72, p.239-254, 2003.

ØDEGAARD, H. Otimization of flocculation/flotation in chemical wastewater treatment. *Wat.Sci.Tech*, v.31, n.3/4, p.73-82, 1995.

OFFRINGA, G. Dissolved air flotation in South Africa. *Wat.Sci.Tech*, v. 31, n.3/4, p.159-172, 1995.

OKUDA, T. *et al.* Improvement of extraction method of coagulation active components from *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, v.33, n.15, p.3373-3378, 1999.

OKUDA, T. *et al.* Isolation and Characterization of Coagulant Extracted from *Moringa oleifera* Seed by Salt Solution. *Water Research*, v. 35, n.2, p.405-410, 2001a.

OKUDA, T. *et al* Coagulation mechanism of salt solution- extracted active component in *moringa oleifera* seeds. *Water Research*, v. 35, n.3, p.830-834, 2001b.

O'MELIA, C.R. Coagulation and flocculation in physicochemical process for water quality control., *Interscience*, New York , p.61-107, 1972.

PAVANELLI, G. *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada*. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, 2001.

PENETRA, R.G. *Flotação aplicada ao Pós- tratamento do efluente de reatores anaeróbios de leito expandido tratando esgoto sanitário*. Tese (Doutorado em hidráulica e saneamento), Universidade de São Paulo, 2003.

PERES, A.E.C.C; MONTE, M.B.M. Química de superfície na flotação. Tratamento de Minérios. 4 ed., Rio de Janeiro: Cetem/MCT, 2004.

PINTO FILHO, A.C.T. Avaliação do potencial da flotação por ar dissolvido como pós-tratamento para efluentes do processo de lodos ativados de reatores UASB e de Lagoas de Alta Taxa. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade de Brasília, 1999.

PIO CÔRREA, M. *Dicionário das plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas*. Rio de Janeiro: IBDF, 1984.

RANGEL, M. S. *Moringa oleifera: um purificador natural de água e complemento alimentar para o nordeste do Brasil*. Disponível em: <www.jardimdeflores.com.br>. Acesso em: 10 out. 2008.

REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. *Emprego da flotação por ar dissolvido na clarificação de águas para abastecimento*. Boletim de hidráulica e saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1986.

REALI, M.A.P. *Avaliação de um sistema original compacto para clarificação de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação e filtração com taxa declinante*. Tese (doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

REALI, M.A.P. *Processos físico-químicos associados a processos biológicos para tratamento de esgoto sanitário*, In: SIMPÓSIO DA ENGENHARIA AMBIENTAL, 1.,1994, São Paulo, Anais... São Paulo. 1994.

RIBEIRO, F.L.M. *Quantificação e Caracterização química dos resíduos da ETA Itabirito-MG*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

RICHTER, C.A.; AZEVEDO NETTO, J.M. *Tratamento de água tecnologia atualizada*. São Paulo:Edgard Blucher, 1991.

RICHTER, C.A. *Clarificação de água por flotação a ar dissolvido*. Curso ABES, Natal, RN, 2001.

SCHWARZ, D. *Water clarification using Moringa oleifera*. Gate Information Service, Eschborn: 2000.

SCHOENHALS, M. *Avaliação da eficiência do processo de flotação aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

SCHOFIELD, T. Dissolved air flotation in drinking water production. *Wat.Sci.Tech*, v. 43, n.8, p. 9-18, 2001.

SENA, R.F. *Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

SILVA, F.J.A. *et al.* Descolorização de efluente da indústria têxtil utilizando coagulante natural (Moringa oleifera e quitosana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa, *Anais...*João Pessoa: ABES, 2001.

SILVA, F.J.A, SOUZA, L.M.M., MAGALHÃES, S.L. Uso potencial de biopolímeros de origem vegetal na descolorização de efluente têxtil índigo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville, *Anais...* Joinville, 2003.

SILVA, C.A. *Estudos aplicados ao uso da Moringa oleifera como coagulante natural para melhoria da qualidade de águas.* Dissertação(Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

SILVA, M.E.R. *Pós tratamento de efluentes provenientes de reatores anaeróbios tratando esgotos sanitários por coagulantes naturais e não naturais.* Dissertação (Mestrado em saneamento ambiental), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

SOBRINHO *et al.* *Pós Tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de flotação.* Pós Tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: PROSAB, 2001, v.2.

SUTHERLAND, J.P. *et al.* Moringa oleifera as a natural coagulant. In: Conference of the Wauwtosa economic development corporation, 20., 1994, Sri Lanka. *Anais...*Colombo: WEDC, 1994, p.297-299.

TEIXEIRA, P.C. *Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de lavagem de veículos visando à reciclagem da água.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.* Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, Belo Horizonte: 1996.

Referências

ZABEL, T.F. The advantages of dissolved air flotation for water treatment. *Jour. AWWA*, v.77, n.5, p.42-46, 1985.

WANG, X.C., JIN, P.K., GREGORY, J. Structure of Al-humic flocs and their removal at slightly acidic and neutral pH. *Water Supply*, v.2, n.2, p. 99-106, 2002.

ANEXOS

ANEXO A

CÁLCULO DO GRADIENTE DE VELOCIDADE

O cálculo do gradiente de velocidade (G) foi realizado, inicialmente com a medição das RPM produzidas pelo motor e polias que movimentam os eixos onde eram fixadas as paletas. As rotações por minuto produzidas pelo motor foram aferidas por um tacômetro. A tabela A mostra os resultados obtidos nestas medidas.

Tabela A- Medida das RPM produzidas pelo motor e polias que movimentam os eixos.

Leitura do variador de velocidade	Eixo 1 (RPM)	Eixo 2 (RPM)	Eixo 3 (RPM)
2	5,6	4,7	4,5
4	17	16	16
6	46	45	45
8	66	64	63
10	85	84	83
12	104	102	101
14	122	120	119
16	140	138	137
18	160	158	157
20	178	176	175
22	197	195	193
24	216	214	212
26	235	232	231
28	254	251	248
30	270	269	267
40	360	338	326

A equação utilizada para o cálculo do G é mostrada a seguir (RICHTER; AZEVEDO NETTO,1991 *apud* PINTO FILHO,1999). Sendo que o cálculo é uma estimativa, pois foi desenvolvida para tanques de escala real.

$$G = \frac{56 \{cd (1-k_0)^3 n^3 b (N_1 a_1^4 + N_2 a_2^4 + \dots)\}^{0,5}}{\mu_0 V_f}$$

onde:

cd- coeficiente de arrasto = 1,18

k_0 - relação entre a velocidade da água e das paletas= 0,25

n- velocidade de rotação das paletas, em rotações por segundo

a e b- elementos geométricos do agitador; a= 0,044m e b= 0,017

μ_0 - viscosidade do líquido= 10^{-6} m²/s

V_f - volume da câmara de flotação= 3,5 litros (0,0035 m³)

De acordo com estes autores o coeficiente de arrasto é calculado em função das dimensões da paleta. As paletas confeccionadas para o flotateste têm as dimensões mostradas na figura A, e a relação $a/b = 2,59$. Interpolando os valores da tabela B, o valor de cd adotado foi de 1,18. O valor de k foi de 0,25, por se tratar de um número utilizado usualmente em projetos.

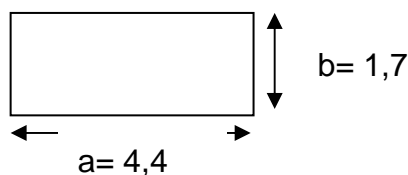


Figura A-Dimensões da paleta

Tabela B-Relação entre as dimensões da paleta e o coeficiente de arrasto

Relação a/b	cd
1	1,16
5	1,2
20	1,5
∞	1,9

Fonte: Richter; Azevedo Netto (1991) *apud* Pinto Filho (1999).

O passo seguinte foi escolher os valores de G desejados e calcular, as rotações por minuto correspondentes, pela seguinte equação:

$$G = \frac{56 \{1,18 (1 - 0,25)^3 n^3 0,016 (4 * (0,043)^4)\}^{0,5}}{10^{-6} * 0,0033}$$

$$n = (G^2 * 1/103639,78)^{1/3}$$

$$n = (G^2 * 1/k_0)^{1/3}$$

Tabela C- Cálculo da relação entre G e RPM dos agitadores

G	G²	G²/k	n (RPS)	n (RPM)
10	100	0,000965	0,098815	6
20	400	0,00386	0,15686	9
30	900	0,008684	0,205544	12
40	1600	0,015438	0,248999	15
50	2500	0,024122	0,28938	17
60	3600	0,034736	0,326281	20
70	4900	0,047279	0,361596	22
80	6400	0,061752	0,395261	24
90	8100	0,078155	0,427549	26
100	10000	0,096488	0,45866	28
200	40000	0,385952	0,728078	44
300	90000	0,868392	0,954052	57
400	160000	1,543809	1,155752	69
500	250000	2,412201	1,341131	80
600	360000	3,47357	1,514463	91
700	490000	4,727914	1,678378	101
800	640000	6,175235	1,834641	110
900	810000	7,815532	1,985408	119
1000	1000000	9,648805	2,128913	128

Foram escolhidos os valores de $G = 40s^{-1}$ e $1000s^{-1}$, correspondendo a 15 e 128 RPM, obtidos na tabela C. Na tabela A, selecionou-se o valor correspondente ao mostrado no variador de velocidade. As leituras, mostradas no variador de velocidade, escolhidas para a realização dos experimentos no flotatete foram 4 e 15.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)