

LINDENBERG CASIMIRO DAMASCENO

**TRATAMENTO DE ÁGUAS OLEOSAS ORIUNDAS DO
PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÓLEO DE DENDÊ
UTILIZANDO A FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO**

*Monografia apresentada à Comissão do Trabalho de
Formatura do Curso de Graduação em Engenharia
Ambiental do Instituto de Geociências e Ciências Exatas
– Unesp, Campus de Rio Claro (SP), como parte das
exigências para o cumprimento da disciplina Trabalho
de Formatura no ano letivo de 2009.*

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro

2009

LINDENBERG CASIMIRO DAMASCENO

**TRATAMENTO DE ÁGUAS OLEOSAS ORIUNDAS DO
PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÓLEO DE DENDÊ
UTILIZANDO A FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO**

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Biociências da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” -
Câmpus de Rio Claro, para obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Ambiental*

Rio Claro (SP)
2009

628.092 Damasceno, Lindenberg Casimiro
D155t Tratamento de águas oleosas oriundas do processo de produção de
óleo de dendê utilizando a flotação por ar dissolvido / Lindenberg
Casimiro Damasceno. - Rio Claro : [s.n.], 2009
45 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

1. Engenharia ambiental. 2. Tratamento de águas oleosas. 3. Flotação
por ar dissolvido. 4. Emulsões óleo/água. 5. Água oleosa sintética. I.
Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a essa força misteriosa que rege todas as formas de vida existentes. Bela, misteriosa, indecifrável, distinta, suprema: conhecida mais comumente como Deus.

Agradeço ao meu orientador, prof. Rodrigo, pelos inúmeros ensinamentos que sabiamente soube transmitir. A postura profissional, a total abertura às minhas idéias, mostrando que saber ouvir o outro é algo raro e importantíssimo nesse mundo de hoje, são o que levarei sempre comigo.

Agradeço ao PRH-ANP por toda a estrutura fornecida na forma de bolsas de estudo, congressos, palestras e cursos de verão que o programa oferece.

Agradeço em especial às minhas tias Zilá, Zenaide e Zilda por permitirem a realização desse sonho que pude tornar realidade. Sem elas, talvez jamais conseguisse.

Agradecimento mais que especial à minha irmã Maria Alice, a pessoa que mais amo e respeito nesse mundo. Mana, jamais te decepcionarei. Estarei sempre contigo.

Agradeço às minhas primas Fabiana e Amanda por todo carinho e compreensão comigo.

Agradeço aos meus amigos Renan Saccenti Lopes, Moreira, Juliana Crivellaro, Cecília de Souza, Marta, Maria e Marinês que, apesar da distância, sempre torceram pelo meu sucesso e minhas realizações. Esta última (Marinês) teve papel fundamental na formação do meu caráter. Gratidão que jamais poderei recompensar à altura.

Agradeço a todos os meus colegas de sala por esse laboratório de vivência que juntos, construímos durante esses cinco anos.

Agradeço às bibliotecárias que a todos os momentos estavam ali de peito e sorriso aberto, prontas a nos auxiliar no que precisássemos.

Agradeço às técnicas do CEA, Heleni e Francisca que me ajudaram e auxiliaram bastante durante o semestre.

Profª Djanira e o técnico Márcio Rosin não poderiam deixar de serem citados aqui. Obrigado pelo apoio.

Profº Naves merece não só o meu agradecimento como o de todos os alunos da Engenharia Ambiental que passaram pela graduação até hoje. Nunca ouvi ele dizer não; nunca ouvi ele dizer talvez; sempre ouvi ele dizendo sim e se propondo a ajudar em tudo o que fosse possível. Obrigado profº Naves.

E pra encerrar, o agradecimento mais especial de todos: à minha querida mãe que, onde quer que esteja sempre olhou e continua a me abençoar. É a ela a quem devo todo carinho e amor que carrego. Guerreira, batalhadora durante todos os dias de sua vida;

estará sempre presente em meu coração. Bela, misteriosa, indecifrável, distinta, suprema: minha mãe, Zélia.

SUMÁRIO

	Página
ÍNDICE	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
3. OBJETIVOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO	13
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
6. CONCLUSÃO	36
8. RECOMENDAÇÕES	37
7. REFERÊNCIAS	38
APÊNDICES	42

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo Geral.....	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Efluentes Oleosos.....	4
3.2. Emulsões Óleo/Água.....	5
3.2.1. Estabilidade de emulsões.....	6
3.2.2. Desestabilização de emulsões.....	6
3.3. Técnicas empregadas no tratamento de águas oleosas.....	7
3.3.1. Tratamento Primário.....	8
3.3.1.1. <i>Separação gravimétrica</i>	8
3.3.1.1. <i>Centrifugação</i>	8
3.3.1.1. <i>Flotação</i>	8
3.3.2. Tratamento Secundário.....	10
3.3.2.1. <i>Tratamento químico</i>	10
3.3.2.2. <i>Tratamento eletrolítico</i>	11
3.3.2.3. <i>Tratamento físico</i>	11
3.3.3. Tratamento Terciário.....	12
4. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO.....	13
4.1. Considerações Iniciais.....	13
4.2. Revisão Bibliográfica Complementar.....	13
4.3. Visita Técnica e Firmação de Parcerias.....	14
4.4. Laboratório.....	14
4.4.1. Caracterização do efluente bruto.....	14
4.4.2. Água Sintética.....	14
4.4.3. Estudo da Estabilidade de Emulsões.....	15
4.4.4. Ensaio de Coagulação, Floculação e Flotação.....	15
4.4.5. Interpretação dos Resultados	15
4.5. Equipamentos.....	15
4.6. Produtos Químicos e Reagentes.....	15

4.7. Determinação de Parâmetros Físico-Químicos.....	16
4.8. Preparo de Água Oleosa Sintética.....	16
4.9. Monitoramento da Estabilidade das Emulsões.....	18
4.10. Estratégia para Quebra de Emulsão.....	19
4.10.1. Ensaio de adequação de dosagem de coagulante e pH de coagulação.....	19
4.10.2. Construção das curvas de flotação.....	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
5.1. Caracterização do Efluente Bruto.....	21
5.2. Preparo da Água Oleosa Sintética.....	22
5.3. Monitoramento da Estabilidade da Emulsão.....	28
5.4. Resultado dos Ensaio de Adequação da Dosagem de coagulante e pH de Coagulação.....	31
5.5. Remoção dos Parâmetros Turbidez, Sólidos Suspensos e Óleos e Graxas.....	34
6. CONCLUSÃO.....	36
7. RECOMENDAÇÕES.....	37
8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	38
APÊNDICES.....	41
APÊNDICE A – TABELA DE ENSAIOS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO.....	42

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Os fenômenos que controlam a desestabilização de emulsões.....	7
Figura 2 - Fluxograma esquemático das principais etapas de trabalho que foram desenvolvidas.....	13
Figura 3 – Óleo de dendê bruto.....	17
Figura 4 – Sólido seco proveniente do processamento do óleo de dendê.....	17
Figura 5 – Jarteste utilizado nas etapas de simulação do efluente e somente na mistura rápida para os ensaios de coagulação, floculação e flotação.....	18
Figura 6 – Flotatestes utilizados nos ensaios de floculação e flotação.....	19
Figura 7 – Fluxograma esquemático da adequação da dosagem do coagulante e pH de coagulação, para dosagens 1, 2 e 3.....	20
Figura 8 – Efluente bruto proveniente do processo da extração do óleo de dendê.....	21
Figura 9 – Relaciona o número de rotações por minuto (RPM) com a concentração de óleos e graxas.....	24
Figura 10 – À esquerda, amostra (7) com emulsões pouco estáveis e à direita, amostra (8) com emulsões mais estáveis.....	25
Figura 11 – Vista superior do jarro mostrando a influência da presença (esquerda) do surfactante e da ausência (direita) do mesmo na formação de emulsão.....	25
Figura 12 – Parte dos sólidos mantém-se agregados ao óleo na forma livre.....	26
Figura 13 - Análise visual da estabilidade das emulsões.....	28
Figura 14 - Curva de Flotação para turbidez residual referente aos ensaios de coagulação, floculação e flotação. Dosagem de coagulante (100 mg/L).....	32
Figura 15 - Curva de Flotação para turbidez residual referente aos ensaios de coagulação, floculação e flotação. Dosagem de coagulante (200 mg/L).....	33
Figura 16 - Curva de Flotação para turbidez residual referente aos ensaios de coagulação, floculação e flotação. Dosagem de coagulante (300 mg/L).....	33
Figura 17 - Gráfico mostrando a correlação entre os parâmetros turbidez e óleos e óleos e graxas.....	34

LISTA DE TABELAS**Página**

Tabela 1 – Métodos de identificação do tipo de emulsão.....	5
Tabela 2 – Caracterização físico-química do efluente bruto.....	21
Tabela 3 – Parâmetros de controle na simulação do efluente e os resultados da caracterização quanto aos parâmetros pH, Turbidez, Sólidos Suspensos (SS) e Óleos e Graxas (OG).....	23
Tabela 4 – Relaciona a dosagem de cal com o pH das amostra.....	27
Tabela 5 – Caracterização físico-química do efluente sintético final.....	28
Tabela 6 – Variação da turbidez em função do tempo de repouso, para uma dosagem de surfactante de (0,5%) e tempo de agitação de 60 minutos.....	29
Tabela 7 – Variação da turbidez em função do tempo de repouso, para uma dosagem de surfactante de 1% e tempo de agitação de 60 minutos.....	30
Tabela 8 – Variação da turbidez em função do tempo de repouso, para uma dosagem de surfactante de (2%) e tempo de agitação de 60 minutos.....	30
Tabela 9 – Variação da turbidez em função do tempo de repouso, para uma dosagem de surfactante de (4%) e tempo de agitação de 60 minutos.....	31
Tabela 10 – Parâmetros do efluente bruto, tratado e a eficiência de remoção mantendo-se fixos as seguintes condições: Dosagem FeCl ₃ (100 mg/L) x pH de coagulação (5,08); G _{mr} (000s ⁻¹) e T _{mr} (20s); G _{fl} (60s ⁻¹) e T _f (15min); P _{sat} (450 kPa).....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/O	Mistura em que a água representa a fase dispersa e o óleo, a fase contínua
CEA	Centro de Estudos Ambientais
DAAE/RC	Departamento Autônomo de Água e Esgoto / Rio Claro
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAD	Flotação por ar dissolvido
Gf	Gradiente médio de velocidade de floculação
Gmr	Gradiente médio de velocidade de mistura rápida
NTU	Unidade nefelométrica de turbidez
O/A	Mistura em que o óleo representa a fase dispersa e a água, a fase contínua
OG	Óleos e graxas
P	Pressão
Psat	Pressão de saturação
pH	Potencial hidrogeniônico
R	Taxa de recirculação
RPM	Número de rotações por minuto
SST	Sólidos Suspensos Totais
Tf	Tempo de floculação
Tmr	Tempo de mistura rápida
Va	Velocidade ascensional
Vfl	Velocidade de floculação
Vf	Velocidade de flotação

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes dosagens de coagulante e pH, aplicando o uso da Flotação por Ar Dissolvido (FAD) para viabilizar seu uso em tratamento de efluentes provenientes do processo de extração de óleo de dendê, como parte do processo de produção de biocombustíveis. O estudo desenvolveu-se em laboratório onde realizaram-se estudos de estabilidade de emulsões para a produção do efluente sintético que melhor se adequasse às características do efluente bruto. Obtida a estabilidade e a caracterização que melhor se aproximou do efluente bruto, a água sintética foi produzida para os ensaios de FAD. Nos ensaios foram testados três dosagens de coagulante combinadas a diferentes valores de pH e cinco velocidades ascensionais (V_a), encontrando uma faixa adequada de valores dessa combinação. Para tanto, foram fixados alguns parâmetros operacionais como tempo e gradiente de mistura rápida ($20 \text{ s} / 1000 \text{ s}^{-1}$), tempo e gradiente médio de velocidade de floculação ($15 \text{ min} / 60 \text{ s}^{-1}$), pressão média de velocidade na câmara de saturação (450 kPa) e razão de recirculação (20%). Amostras foram então coletadas para análise da remoção dos parâmetros turbidez, sólidos suspensos totais e óleos e graxas, este, obtido por uma correlação turbidez x óleos e graxas, referentes às análises anteriores. A remoção obtida foi de $73,9\%$ para turbidez, $51,4\%$ para sólidos suspensos totais e $86,2\%$ para óleos e graxas. Taxas de remoção poderão ser incrementadas em trabalhos posteriores, com a variação dos parâmetros gradiente médio de velocidade de floculação e tempo de floculação, razão de recirculação e utilizando menores velocidades de flotação, para as características deste efluente.

Palavras-chave: Flotação por Ar Dissolvido, tratamento de águas oleosas, emulsões óleo/água, água oleosa sintética.

ABSTRACT

This study was developed to evaluate the performance of different coagulant and pH dosages by applying the use of Dissolved Air Flotation (FAD) to enable its use in effluent treatment of the extraction process of palm oil. The study was developed in the laboratory, where studies about emulsions stability were made for the production of a synthetic effluent which best suit the characteristics of raw effluent. The synthetic water that would be used in the tests of FAD was produced, once the stability and characterization which best approached the raw wastewater was obtained. Trials tested three coagulant doses, combined with various pH ranges and five upward velocities (V_a), finding an optimal range of this combination. Some operating parameters such as time and gradient of rapid mixing (20 s / 1000 s⁻¹), time and gradient flotation (15 min / 60 s⁻¹), chamber pressure saturation (450 kPa) and recirculation rate (20%) were set. In this way, samples were collected for analysis of the removal of turbidity parameters, suspended solids and oils and greases. This one is obtained by a correlation turbidity x oils and greases, referring to the previous analysis. The degree of removal obtained were 73,97% for turbidity, 51,4% for total suspended solids and 86,2% for oils and greases. Removal rates may be increased in later studies, by ranging the velocity gradient and flocculation parameters and the recirculation ratio, and by using lower flotation speeds to these effluent characteristics.

Keywords: Dissolved Air Flotation, treatment of oily water, emulsions oil / water, oil palm.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho originou-se pela crescente demanda criada frente às exigências dos órgãos reguladores ambientais, pelo enquadramento da água oleosa gerada em diversas atividades industriais. Desse modo, as indústrias de produção de petróleo, bem como de biocombustíveis têm como desafios a adequação de suas atividades aos padrões de lançamento de efluentes (artigo 24º do Conama 357), cada vez mais rigorosos.

O novo padrão de expansão da matriz energética atualmente é baseado no uso mais intensivo de fontes energéticas renováveis, fruto da pressão social na busca de processos que gerem menos impactos ambientais e da necessidade de uso mais racional dos insumos utilizados. Somado a isso, as recentes descobertas de novos campos de petróleo no mundo e especialmente no Brasil requererão a utilização de tecnologias que dêem suporte ao tratamento da ampla gama de resíduos gerados nesses processos de produção.

Tais sistemas de tratamento deverão ser utilizados não somente visando o tratamento dos efluentes por si só, mas também de maneira que não sejam gerados, através do tratamento, novos resíduos desnecessários; estes devem ser, se possível, reutilizáveis. Além disso, o tratamento deverá ser isento de incômodos provenientes de ruídos e odores, nem causar impacto ambiental negativo (GIORDANO 2003).

Nesta perspectiva avaliada, entre os diversos contaminantes formados no processamento do óleo bruto está a emulsão oleosa que é formada, basicamente, pela presença de óleo, um agente surfactante e um meio agitador. Devido à estabilidade de tais compostos, aliado ao fato de que separadores gravitacionais são ineficientes na separação desse tipo de óleo, o tratamento de uma água oleosa pode se tornar uma operação, por vezes, complexa e dependente de processos altamente eficientes. Justifica-se, a partir disto, a utilização da técnica (FAD), tecnologia bastante aceita e comumente utilizada no tratamento de vários tipos de efluentes dos mais diversos setores industriais.

O efluente escolhido para os estudos e ensaios de laboratório é proveniente da extração de óleo de dendê realizada na empresa Agropalma S/A, no Pará. O efluente gerado nesse processo de extração é caracterizado pela alta carga orgânica e grande quantidade de sólidos suspensos, além de apresentar 1% (v/v) do efluente na forma de óleo emulsionado, o que dificulta o tratamento.

Devido à dificuldade operacional e logística em se enviar o efluente bruto do Pará até o município de Rio Claro – SP, bem como a alteração das condições físico-químicas, resultantes da longa distância a ser percorrida, a pesquisa foi realizada utilizando como água de estudo um efluente produzido sinteticamente, empregando para tal, materiais fornecidos pela empresa (sólidos e óleo de dendê bruto). Buscou-se reproduzir, o mais próximo possível, as condições do efluente bruto. A dificuldade logística da utilização do efluente bruto está no fato de que, a necessidade de grande volume do mesmo poderia inviabilizar e atrasar o trabalho, uma vez que estaríamos dependentes da melhor data que a empresa Agropalma pudesse enviar o material. Sabendo-se que as características de um material coletado num dia podem ser bem distintas do material coletado no dia seguinte, este seria outro fator problemático na utilização do material bruto.

Os ensaios foram realizados em escala de laboratório e, a partir da variação e fixação de alguns parâmetros da técnica de flotação por ar dissolvido, buscou-se encontrar uma faixa adequada de coagulação que refletirá numa boa eficiência de remoção dos parâmetros como turbidez, sólidos suspensos totais (SST) e óleos e graxas.

Os resultados obtidos poderão ser úteis posteriormente, numa unidade de tratamento físico-químico com flotação por ar dissolvido em escala industrial, considerando sempre os efeitos de escala quando são comparados dados obtidos em equipamentos de laboratório com os de uma estação de tratamento (DI BERNARDO et al., 2001).

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral:

O trabalho tem como objetivo estudar e avaliar o desempenho da técnica Flotação por Ar Dissolvido (FAD) na separação de emulsão sintética óleo/água através da adequação dos parâmetros de coagulação.

.

2.2. Objetivos Específicos:

- Preparar da água de estudo que reproduza a condição de emulsão óleo/água;
- Verificar a estabilidade da emulsão;
- Realizar ensaios de investigação de FAD em escala de bancada;
- Selecionar as condições mais adequadas de coagulação visando a FAD;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será apresentada neste capítulo uma revisão bibliográfica sobre aspectos ligados a emulsões óleo/água e as tecnologias mais empregadas para o tratamento de águas oleosas.

3.1. Efluentes oleosos

O termo água oleosa representa todos os tipos de água que apresentam quantidades variáveis de óleos e graxas além de uma ampla variedade de materiais em suspensão, incluindo areia, argila e outras substâncias coloidais e dissolvidas como detergentes, metais pesados etc (RANGEL, 2008).

As águas oleosas variam enormemente em composição e características de acordo com a origem. O teor de óleo pode ser bem baixo ou muito alto, acima de 50%. Em geral, esses valores estão entre 1% e 15% de óleo (TABAKIN et al., 1978)

Segundo Oliveira (1995), o óleo em solução aquosa pode se apresentar de quatro maneiras: livre, disperso, solubilizado e emulsionado. No entanto, para Freestone e Tabakin (1975), o óleo pode estar presente na água de 5 modos diferentes: livre, mecanicamente disperso, quimicamente emulsificado, dissolvido e aderidos a superfícies de partículas.

Na forma livre, as suspensões com diâmetro superior a 150 μ m podem ser removidas por separação gravitacional (RANGEL, 2008).

As partículas mecanicamente dispersas, bem como as quimicamente emulsificadas possuem diâmetro de partículas que variam de microns a frações de milímetro. A diferença entre elas é que, quando mecanicamente dispersas, as dispersões são estabilizadas apenas por forças elétricas, enquanto que as emulsões químicas são estabilizadas por agentes emulsificantes. A utilização de processos mais sofisticados como centrifugação e flotação, associados a produtos químicos, são recomendados pra este caso (RANGEL, 2008).

Já o óleo dissolvido é o que, quimicamente, encontra-se dissolvido somado à parte do óleo disperso em gotículas finas. A remoção desse tipo de óleo requer técnicas mais avançadas de tratamento (RANGEL, 2008).

O óleo quando aderido às superfícies de partículas, é denominado sólido molhado e a separação ocorre com a remoção de sólidos em suspensão (FREESTONE E TABAKIN, 1975).

A principal característica que define o grau de dificuldade de separação do óleo é a maneira que ele se encontra presente. Influem também no processo de separação a quantidade de sólidos suspensos, a distribuição de tamanho das partículas, pH, temperatura, presença ou ausência de produtos químicos e as densidades de óleo e de fluido (TABAKIN et al., 1978; MAGDICH, 1988).

3.2. Emulsões óleo/água

Shaw (1975) define emulsão como uma mistura entre de dois líquidos imiscíveis ou parcialmente miscíveis entre si, onde uma fase encontra-se dispersa na outra sob a forma de gotículas de tamanho coloidal. Segundo Becher (1965), uma emulsão apresenta um diâmetro de gotícula superior a 0.1 μm . A emulsão que apresenta o óleo como fase dispersa é conhecida como “Emulsão Óleo em Água” (O/A); quando a água representa o meio disperso, a emulsão é conhecida como “Emulsão Água em Óleo” (SOLAGER, 1956).

A Tabela 1 descreve alguns métodos utilizados para identificação de emulsões:

Tabela 1 - Métodos de identificação do tipo de emulsão

Método	Emulsão O/A	Emulsão A/O
Visual	Textura cremosa	Textura gordurosa
Corantes	Corantes inorgânicos tingem a emulsão	Corantes orgânicos tingem a emulsão
Condutividade	Condutividade elétrica bem mais elevada	Condutividade elétrica a depender do potencial elétrico aplicado
Miscibilidade	A emulsão se mistura facilmente com um líquido miscível no meio de dispersão (dispersante)	

Fonte: Machado (2002).

3.2.1. Estabilidade de emulsões

A estabilidade de uma emulsão é definida como a capacidade de manter sua homogeneidade num certo período de tempo. Segundo Adamson (1976) apud Rosa (2003), emulsões são sistemas considerados termodinamicamente instáveis uma vez que, ocorre um aumento da energia interfacial do sistema provocado pela dispersão da fase oleosa em meio aquoso.

De acordo com Rosa (2003), as emulsões estabilizadas fisicamente são as que não necessitam de um agente surfactante para manter sua estabilidade, que é mantida por cargas elétricas inerentes ao sistema ou outras forças que não sofram influência de agentes estabilizantes.

Em geral, para que se tenha estabilidade de emulsões faz-se necessário o acréscimo de uma substância surfactante durante sua formação, sendo estas as emulsões estabilizadas quimicamente. Essa estabilidade é provocada pela alta densidade de carga superficial das gotículas de óleo, provocada pela adsorção da substância surfactante na superfície.

Segundo Lelinaki (1993) e Beeby e Nicol (1993) apud Cecchet (2007), as gotículas de óleo estabilizadas quimicamente comportam-se mais como partículas sólidas do que aquelas estabilizadas fisicamente, justamente devido à alta densidade de carga superficial conferida pela substância surfactante.

A estabilidade de emulsões, bem como as suas demais propriedades, dependem de sua composição e do modo de preparo, uma vez que são sistemas heterogêneos, parte colóides, parte dispersões. Essa estabilidade está também em função da interação entre as partículas e a velocidade de flutuação (RODRIGUES, 2003).

3.2.2 Desestabilização de emulsões

Em se tratando de águas oleosas, a redução da estabilidade é essencial para uma eficiência na separação de fases. Por isso, a busca de mecanismos que reduzam a estabilidade de sistemas dispersos é sempre o passo inicial (SHAW, 1975). O controle do processo de desestabilização é regido por quatro diferentes fenômenos (Figura 1): coagulação, floculação, sedimentação (creaming) e coalescência.

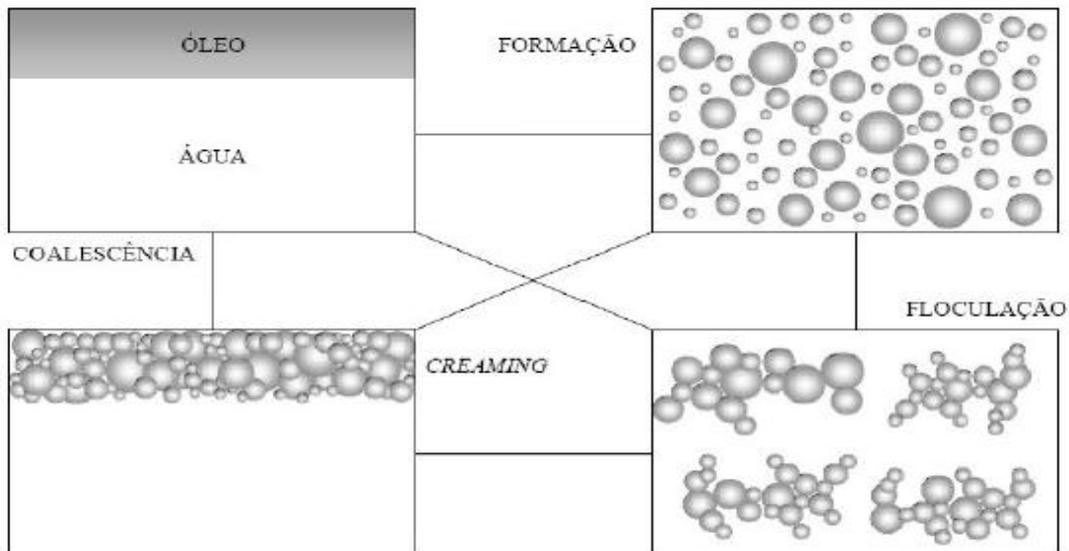


Figura 1 - Os fenômenos que controlam a desestabilização de emulsões.

Fonte: Rosa (2003).

Mendes (1989) define coalescência como a união de duas ou mais partículas em apenas uma com área interfacial menor. A colisão das partículas e a consequente redução da dupla camada elétrica fazem com que a aproximação das partículas resulte na fusão das gotículas de maneira irreversível, sendo formado um volume superior até o momento em que uma fase contínua é separada do meio dispersante por uma interface. Ressalta-se que esse deslocamento não necessariamente é decorrente da coagulação e/ou floculação.

O “creaming” caracteriza-se pelo deslocamento das gotículas de óleo para a superfície, baseado na diferença de densidade existente entre as fases. Mesmo existindo este deslocamento, a estabilidade das gotículas é mantida.

3.3. Técnicas empregadas no tratamento de águas oleosas

As técnicas utilizadas para o tratamento de efluentes oleosos podem ser de natureza física, química, físico-química, biológica, mecânica e elétrica, podendo ser empregadas de maneira conjunta em função do tipo de efluente e do objetivo do tratamento (RANGEL, 2008). Destacam-se três níveis de tratamento: primário, secundário e terciário, descritos abaixo:

3.3.1. Tratamento Primário

Tratamento mais simplificado, geralmente utilizando métodos de separação física em função da diferença de densidade entre os componentes do resíduo.

3.3.1.1. *Separação Gravimétrica*

Técnica mais utilizada de tratamento de águas oleosas. Tem como principal objetivo a separação de óleo na forma livre ou dispersos e sólidos precipitáveis. A maioria dos separadores gravimétricos são eficientes na remoção de glóbulos de óleo superiores a 0,015cm de diâmetro. No entanto, sua eficiência depende do projeto hidráulico e do tempo de retenção utilizado (RANGEL, 2008).

Valores de concentração de óleo utilizando separadores gravimétricos estão na ordem de 20 a 100 mg l^{-1} , e podem variar de acordo com as formas de óleo predominantes no efluente (TABAKIN, et al., 1978). A vantagem de sua utilização é a fácil operação e o custo relativamente baixo. Porém, são bastante limitados por não removerem o óleo emulsificado e solúvel.

3.3.1.2. *Centrifugação*

O mecanismo de funcionamento da centrífuga é similar aos separadores gravimétricos, atuando sobre as diferenças de densidade. Através de uma rápida agitação do efluente num movimento circular, a fase mais densa se desloca para o exterior e a fase mais leve fica próxima ao eixo de rotação. É mais eficiente que os separadores gravimétricos, uma vez que utilizam uma força centrífuga de até 6000 G. São bastante eficientes na remoção de sólidos molhados por óleo e de óleo livre da água. As concentrações de óleo obtidas variam de 50 a 70 mg l^{-1} (RANGEL, 2008).

3.3.1.3. *Flotação*

O princípio de flotação de dispersões aquosas baseia-se na utilização de agentes com baixa densidade, geralmente bolhas de gás, que aderem na superfície das partículas da fase

dispersa, aumentando o empuxo sobre elas e promovendo, por conseguinte, sua separação (REALI, 1991). Dessa combinação entre as bolhas de gás com a partícula resulta num agregado cuja densidade é menor que a do líquido, que sobe à superfície do mesmo, podendo ser coletado por raspagem superficial (METCALF & EDDY, 1991).

Teores de óleos obtidos pela técnica de flotação chegam a variar de 1 a 20 mg^l⁻¹, caracterizando efluentes de alta qualidade (RYAN, 1986).

Dentre os métodos de flotação, o que possui maior aplicabilidade no setor de saneamento e tratamento de águas é a FAD, com bolhas de dimensões entre (30-100µm), o que proporciona remoção de partículas coloidais de dimensões menores que 5µm (MATIOLLO, 2003).

Segundo Matiolo (2003), a flotação, na área ambiental, tem como objetivo remover (separar) particulados, sólidos (partículas) ou líquidos (gotículas) presentes em:

- dispersões sólido/líquido (suspensões);
- emulsões líquido1 (gotículas óleo)/líquido2 (água);
- misturas sólido/líquido1 (gotículas óleo)/líquido2 (água).

Entre outras técnicas de geração de bolhas pode-se citar: flotação por ar disperso ou flotação por ar induzido (F.A.I.), que consiste na geração de bolhas por difusores ou por agitação do líquido com os gases, promovida pelas turbinas; flotação eletrolítica, em que a geração de bolhas ocorre por eletrólise. No caso da flotação por ar dissolvido, exige-se a presença de uma câmara de saturação onde o ar será pressurizado na massa líquida.

De acordo com a U.S.EPA (1997), utiliza-se a flotação por ar dissolvido quando o tratamento por sedimentação é ineficiente na remoção de sólidos em suspensão, emulsões de óleo e alguns poluentes dissolvidos.

Após a formação dos flocos, as bolhas de ar aderem nas gotículas de óleo e flutam. As características dos flocos formados nas etapas de coagulação e floculação determinam juntamente com as características das micro-bolhas e as condições hidrodinâmicas, a eficiência do processo de FAD (MORUZZI, 2005).

As condições de floculação ótimas para a flotação por ar dissolvido é ainda bastante discutida (AL-SHAMRANI et al., 2002). Diversos autores divergem quanto ao tempo de floculação, o gradiente de velocidade e tamanho dos flocos.

Segundo Lacerda et al. 1998, dentre os tipos de flotação por ar dissolvido existentes, o mais utilizado é a flotação por ar dissolvido com pressurização parcial do efluente clarificado. Nesse tipo de pressurização, uma porcentagem previamente definida do efluente é recirculada.

3.3.2. Tratamento Secundário

Águas oleosas caracterizadas pela presença de agentes emulsificantes possuem tratamento mais complexo, devido às barreiras mecânicas e elétricas que impedem a coalescência das partículas. Essa forma de óleo tem sido separada tradicionalmente por algum tratamento físico-químico que quebre a emulsão óleo-água e, o material floculado através do processo de floculação é então separado pelo processo gravimétrico.

Com o intuito de quebra dessa emulsão, diversas técnicas de natureza física, química e elétrica podem ser empregadas para neutralizar as forças elétricas repulsivas existentes entre as partículas de óleo, ou minar a atuação do agente emulsificante presente na emulsão (MAGDICH, 1988 apud RANGEL, 2008).

3.3.2.1. *Tratamento Químico*

Segundo Zabel (1985), para que se obtenha uma eficiente taxa de clarificação de um efluente, o pH de coagulação deve ser otimizado, sendo esta recomendação válida também para os sistemas de flotação por ar dissolvido.

A quebra de emulsões quimicamente é feita, normalmente através da acidificação e/ou coagulação seguida por floculação. Através da diminuição do pH ocorre a desestabilização das partículas de óleo que podem então, ser removidas por outros métodos. A desvantagem de tal tratamento é que, sendo as águas oleosas alcalinas em sua grande maioria, grandes quantidade de ácidos devem ser utilizadas para essa acidificação. Além disso, problemas de corrosão e manuseio também dificultam a prática (RANGEL, 2008).

O tratamento de emulsões por polímero-alumínio é um método alternativo e bastante eficaz em relação ao método de acidificação. Neste caso, os polímeros catiônicos é que neutralizarão a carga superficial das partículas de óleo estáveis. Porém, como esses polímeros funcionam em uma ampla faixa de pH, não necessitam de ajustes de pH. A vantagem de

ambas as técnicas é permitir o manuseio de grandes quantidades de elevados teores de sólidos (GAMBHIR, 1983 apud RANGEL, 2008).

3.3.2.2. *Tratamento Eletrolítico*

Neste método, a desestabilização das partículas oleosas é feita sem prévio tratamento químico com aditivos. Funciona através da eletrocoagulação que, através da inserção no efluente de íons alumínio ou ferro eletrolicamente, estes promoveriam a quebra da estabilidade das gotas de óleo. Paralelamente, uma corrente contínua é injetada para que ocorra a migração e a coalescência dessas partículas.

A eficiência do tratamento eletrolítico é comprovada, sendo viável sua utilização em escala de bancada e piloto. Porém, sua utilização em larga escala ainda é bastante questionada.

3.3.2.3. *Tratamento físico*

Vários métodos de tratamento físico estão disponíveis, entre eles: aquecimento, centrifugação em alta velocidade e magnetização (WANG et al., 1975; MAGDICH, 1988 apud RANGEL, 2008). O aquecimento pode ser prática utilizada, porém é economicamente inviável devido à grande quantidade de energia necessária na evaporação da água. A centrifugação em alta velocidade possui eficiência apenas para emulsões do tipo água/óleo em que a fase dispersa (água), durante a centrifugação, fica parte externa da centrífuga, facilitando a remoção.

Uma eficiente técnica de separação de emulsões óleo/água foi descoberta por cientistas, porém não possui comprovação de viabilidade em escala industrial (RANGEL, 2008).

Outro método físico que vem se destacando é a ultrafiltração, em que o óleo emulsionado, disperso e livre é removido do efluente após passar a solução por uma membrana a baixa pressão.

3.3.3. Tratamento Terciário

A separação de óleo da água pode ser realizada através de dois métodos, os mais utilizados dentro do tratamento terciário: tratamento biológico e adsorção em carbono. Ambos os métodos, destinam-se à remoção de óleo dissolvido ou óleo emulsionado que não tenha sido removido por nenhuma das técnicas anteriores (RANGEL, 2008).

O tratamento biológico utiliza-se de organismos biológicos para oxidar o óleo solúvel. Porém, necessita de tratamento e diluição prévia. A concentração de óleo nos efluentes tratados biologicamente chega a menos que 10mg^{-1} (RANGEL, 2008).

A utilização do método de adsorção em carbono também é bastante eficaz quando o efluente foi previamente tratado. A limitação está no fato de que material com óleo livre ou presença de sólidos, pode entupir o carbono e reduzir a eficiência. A eficiência deste tratamento permite obter um efluente com concentração que varia de 2 a 10mg^{-1} . O método apresenta desvantagens ligadas a alto custo de capital e operacional. Ambos os métodos, porém, fornecem efluentes muito limpos (RANGEL, 2008).

4. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são descritos a metodologia, as etapas de trabalho, os equipamentos e materiais utilizados na consecução dessa pesquisa, desenvolvida nas instalações do Centro de Estudos Ambientais (CEA) e no Departamento de Bioquímica, ambos na Unesp, campus de Rio Claro. A Figura 2 abaixo mostra as principais etapas que foram desenvolvidas ao longo do trabalho.

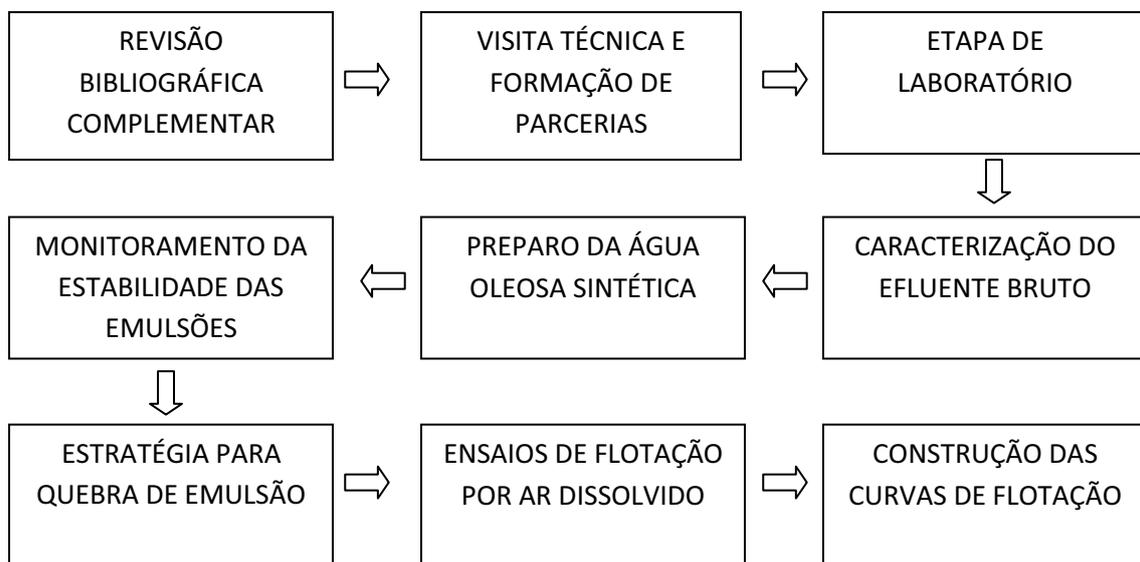


Figura 2- Fluxograma esquemático das principais etapas de trabalho que foram desenvolvidas

4.2. Revisão bibliográfica complementar

Como primeira etapa de pesquisa foi realizada uma extensa consulta a bibliografia de diversos Bancos de Dados, sobre os principais métodos e técnicas de quebra e separação de emulsão óleo/água. Buscou-se também conhecer ao máximo o efluente que foi usado como corpo de estudo, suas características físico-químicas e as tecnologias de tratamento mais comumente utilizadas no trato desse tipo de efluente.

4.3. Visita Técnica e firmação de parcerias

Alguns integrantes da equipe inicialmente formada para o estudo do efluente gerado no processo de extração do óleo de dendê, incluindo o orientador dessa pesquisa, realizaram uma visita técnica às instalações do Grupo Agropalma, no período de 24/03/08 a 26/03/08, no Estado do Pará. O conhecimento prévio das instalações da empresa é indispensável, uma vez que proporciona contato direto com o processo de produção, em todas as suas etapas, auxiliando as decisões mais pertinentes quantos às melhorias necessárias para otimizar o processo de tratamento utilizado neste efluente.

A parceria com a empresa Agropalma foi mantida e o envio do material sólido, bem como do óleo de dendê bruto necessários para a produção do efluente, foi feita sempre que o pedido era feito.

Parcerias e auxílio de outros laboratórios do campus da Unesp, em Rio Claro, também foram firmados para a resolução de alguma etapa, ao longo do trabalho.

4.4. Laboratório

Para a consecução das atividades de laboratório foi necessário a obtenção de uma série de quesitos que permitiram dar entrada para os procedimentos laboratoriais. Entre estes quesitos incluem-se vidrarias, reagentes, equipamentos para análise de óleos e graxas, e outros materiais descritos nos itens 4.5 e 4.6 da metodologia.

4.4.1 Caracterização do efluente bruto

A partir de alguns litros do efluente bruto foram realizadas análises de parâmetros previamente definidos (pH, turbidez, óleos e graxas e sólidos suspensos totais).

4.4.2 Água sintética

A partir dos resultados obtidos deu-se início à produção sintética do efluente analisado, utilizando para tal óleo de dendê, água destilada e material sólido existente no fat pit, que consiste num tanque utilizado pela empresa no tratamento desse efluente.

Utilizando metodologia descrita foram simulados alguns litros de efluente sintético com o intuito de posteriormente, através das análises dos parâmetros sugeridos, obter o efluente com as características que mais se aproximam do efluente bruto estudado.

4.4.3 Estudo da estabilidade de emulsões

Paralelamente à etapa de preparo da água sintética foram realizados estudos com o intuito de verificar a estabilidade das emulsões geradas.

4.4.4. Ensaios de coagulação, floculação, flotação

Esta etapa é a última que foi realizada em laboratório. A partir dos dados obtidos inicia-se os ensaios visando a adequação das condições ótimas obtidas através da curva de flotação.

4.4.5 Interpretação dos resultados

Com todos os dados em mãos é realizada uma interpretação e análise dos mesmos para verificar a eficiência da técnica de flotação por ar dissolvido no tratamento desse efluente, de acordo com suas características.

4.5. Equipamentos

Nas etapas de simulação do efluente e nos ensaios de coagulação, floculação e flotação foram utilizados os seguintes equipamentos: Flotateste; Jarteste; Compressor; Extrator soxhlet; Estufa; Balança analítica; Bomba a vácuo; Turbidímetro; PHmetro; Cronômetro; Termômetro; Britador; Chapa aquecedora.

4.6. Produtos Químicos e Reagentes

Os produtos utilizados para a consecução dos ensaios foram: Cloreto férrico $\text{FeCl}_3 \times 6 \text{H}_2\text{O}$ em que a solução diluída a 40 % (40 g em 100mL) foi adquirida na ETA I do DAAE,

Rio Claro; solução de cal hidratada (2g/L); n-hexano P.A.; ácido clorídrico a 5%; detergente comum; material sólido e óleo de dendê bruto obtidos junto à empresa Agropalma S/A, no Pará.

4.7. Determinação de parâmetros físicos-químicos

A caracterização do efluente bruto, bem como do efluente sintético foi realizada medindo-se os seguintes parâmetros: pH, Turbidez, Sólidos Suspensos Totais (SST) e Óleos e Graxas (OG). Para a obtenção desses parâmetros utilizou-se todos os procedimentos descritos no Standard Methods 20th edição.

4.8. Preparo da água oleosa sintética

Com o intuito de se produzir uma quantidade significativa de água oleosa, para posterior uso no flotatesto, buscou-se utilizar uma metodologia que reproduza a estabilidade da emulsão O/A.

No preparo do efluente sintético utilizou-se óleo de dendê bruto, material sólido proveniente do efluente de extração do óleo de dendê, um surfactante (detergente comum) e água destilada. O óleo de dendê e o material sólido foram ambos fornecidos pela empresa Agropalma S/A. Ressalta-se que o material sólido foi retirado da centrífuga de processamento do óleo bruto, na unidade de produção da Agropalma. O sólido foi enviado sob a forma de pasta.

A Figura 3 e 4 mostram, respectivamente, o óleo de dendê bruto e os sólidos do efluente resultante da extração do óleo de dendê, após ser seco em estufa. Posteriormente, o material foi britado para ser utilizado nas simulações.



Figura 3 - Óleo de dendê bruto.



Figura 4 – À esquerda, sólido seco proveniente do processamento do óleo de dendê. À direita, o mesmo sólido porém britado para utilização em laboratório.

Inicialmente, introduziu-se uma quantidade de 2L de água nos jarros do equipamento jarteste (Figura 5), utilizado nesta etapa do trabalho como meio de agitação visando a formação de emulsão, uma quantidade definida de óleo de dendê (2,6 a 18,4 g de óleo), sólidos (3,5 a 13,4 g de sólidos) e o surfactante (10 a 80 ml de detergente comum). Com o intuito de se fixar uma concentração de óleo na emulsão e manter a estabilidade na água que seria utilizada em todos os ensaios no flotatestes, alguns parâmetros como quantidade de óleo adicionada, tempo de agitação, dosagem de surfactante e número de rotações por minuto (RPM) foram variados. A mistura foi então homogeneizada no jarteste durante tempos de

agitação de 30; 60; 90 e 120 minutos. As rotações variadas foram de 385; 570 e 600 RPM.

Assim como o tempo de agitação e o número de rotações por minuto, foi variada a dosagem de surfactante em 10ml, 20ml, 30ml, 40ml e 80ml a fim de verificar sua influência na concentração de óleo no efluente produzido.



Figura 5 - Jarreste utilizado nas etapas de simulação do efluente e somente na mistura rápida para os ensaios de coagulação, floculação e flotação.

4.9. Monitoramento da estabilidade das emulsões

Seguindo metodologia proposta por Schons (2008), foram definidos quatro tempos de agitação: 30, 60, 90 e 120 minutos sendo que, através do método de análise visual e das medidas de turbidez, foi possível verificar a estabilidade das emulsões.

Utilizou-se quatro dosagens de surfactante (detergente) (0,5; 1; 1,5; 4% (v/v)), sendo possível, a partir disto, verificar qual dosagem proporcionou melhor estabilidade. Para cada dosagem mantida fixa foram coletadas 3 amostras nos tempos de 0, 15, 30, 45, 60 e 120 minutos após a geração da emulsão e logo após a coleta, foi medida a turbidez dessas amostras. Através da análise dos valores de turbidez e do desvio padrão produzido desses valores, pode-se verificar qual a dosagem que oferece a melhor estabilidade (SCHONS 2008).

4.10. Estratégia para quebra de emulsão

Diversos métodos, descritos na revisão bibliográfica, proporcionam a tentativa de quebra da emulsão oleosa. Neste trabalho, com tal intuito de quebra de emulsão, utiliza-se a adição de produtos químicos uma vez que, a máxima eficiência da tecnologia de Flotação por Ar Dissolvido está, estritamente, vinculada a uma etapa prévia de coagulação. Os ensaios de coagulação/ floculação/ flotação foram imprescindíveis na busca da otimização de parâmetros para uma completa eficiência da tecnologia de FAD na separação da emulsão óleo-água. Na Figura 6 apresenta-se o equipamento (Flotateste) que foi utilizado nos ensaios de floculação e flotação.



Figura 6 - Flotateste utilizado nos ensaios de floculação e flotação.

4.10.1. Ensaios de adequação da dosagem de coagulante e pH de coagulação

Nesta etapa do trabalho foram investigadas três dosagens diferentes de coagulante para diferentes valores de pH de coagulação. O coagulante utilizado foi o cloreto férrico comercial, na concentração de 40% (m/m). As dosagens de cloreto férrico investigadas foram: 100, 200 e 300 mg/L para valores de pH de coagulação variando de 4,36 a 5,37. Mantiveram-se fixos os demais parâmetros operacionais: $T_{mr}(s)$, $G_{mr}(s^{-1})$, $T_f (min)$, $G_f (s^{-1})$, $P (KPa)$, $R (%)$, $V_{f1} (cm/min)$, $V_{f2} (cm/min)$, $V_{f3} (cm/min)$, $V_{f4} (cm/min)$ e $V_{f5} (cm/min)$. Na Figura 7 são mostradas as grades de ensaios realizada.

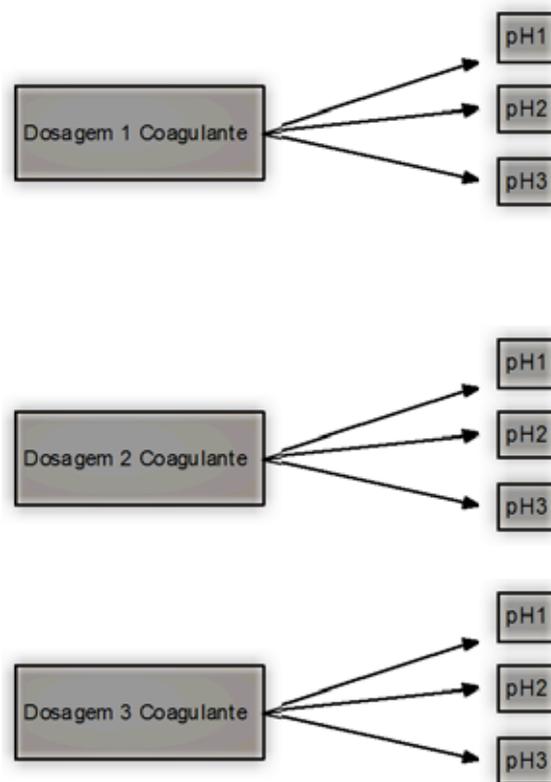


Figura 7 - Fluxograma esquemático da adequação da dosagem do coagulante e pH de coagulação, para 3 dosagens selecionadas.

4.10.2. Construção das curvas de Flotação

Para cada valor de dosagem de coagulante e pH de coagulação, foram coletadas amostras correspondentes a 5 velocidades de flotação (cm/s) para a posterior construção das curvas de flotação. A metodologia adotada para a construção das curvas de flotação segue a proposta por Reali (1991). A partir das curvas de flotação, o melhor par dosagem e pH de coagulação foi selecionado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do efluente bruto

Seguindo os procedimentos descritos no Standard Methods 21th, obteve-se a caracterização indicada na Tabela 2 abaixo. A partir desses valores deu-se início à tentativa de encontrar o efluente sintético mais representativo da caracterização do efluente bruto, mostrado abaixo (Figura 8).



Figura 8 - Efluente bruto proveniente do processo da extração do óleo de dendê.

Tabela 2 - Caracterização físico-química do efluente bruto

Parâmetro	Valor
Turbidez	8940 NTU
PH	5,21
SST (g/L)	3,35
OG (g/L)	1,31
Densidade (g/cm ³)	0,9033

5.2. Preparo da água oleosa sintética

A Tabela 3 relaciona os parâmetros de controle para simulação do efluente e as diversas amostras produzidas na tentativa de encontrar a melhor caracterização para a água de estudo. Além dos parâmetros a Tabela 3 mostra também os resultados das diversas análises realizadas nas amostras selecionadas. Em diversos trabalhos, em que constam etapas de emulsificação, pôde-se verificar que o número de rotações por minuto, muitas vezes, ultrapassa 10000 RPM, com tempo de agitação de 3 a 15 minutos. Porém, devido a limitações técnicas na obtenção dessa rotação, o parâmetro número de rotações por minuto utilizado foi fixado em 600 RPM, valor máximo alcançado no jarreste.

Os resultados da caracterização refletem a dificuldade encontrada para a reprodução e fixação dos valores dos parâmetros próximos aos valores do efluente bruto. Entre os limitantes que dificultaram essa tentativa acredita-se que, pelos resultados obtidos, o principal deles tenha sido o baixo número de rotações por minuto utilizado. Como já mencionado, a velocidade máxima alcançada no agitador utilizado foi de 600RPM.

Nota-se também pela Tabelas 3, que o resultado das análises de concentração de óleos e graxas obtidas nas amostras 3 e 4 demonstram que o aumento na quantidade de surfactante utilizado não acarreta em um aumento na quantidade de óleo emulsionado, podendo ocorrer justamente o contrário. Observou-se que uma quantidade acima de 20ml de surfactante resulta na produção de grande quantidade de espuma; notou-se também que esta espuma se agrega nas partículas de óleo e impedem que essas partículas sofram a ação mecânica da agitação, o que resulta numa concentração de óleos e graxas menor do que o esperado.

Sabendo-se que o material sólido utilizado nas simulações também possuía óleo, na época da caracterização do efluente bruto, foi feita uma análise no extrator para determinar a concentração de óleos e graxas presente nesse sólido. O resultado demonstrou uma quantidade significativa de óleo presente no material sólido. Para cada quilograma desse sólido havia 3,66 gramas de óleo presente. Posto isto, investigou-se a influência desse óleo, presente no material sólido, na concentração de óleos e graxas. Utilizou-se para tal as amostras 9 e 10, em que simularam-se as mesmas condições diferindo apenas na quantidade de sólidos utilizado. Pode-se observar pela Tabela 3 que, apesar da grande quantidade de óleo presente no sólido, acredita-se que esse óleo se agregue ao óleo já na forma livre e não influa na quantidade de óleo emulsionado.

Tabela 3 – Parâmetros de controle na simulação do efluente e os resultados da caracterização quanto aos parâmetros pH, Turbidez, Sólidos Suspensos (SS) e Óleos e Graxas (OG)

Amostr as (2L)	pH	Turbidez (NTU)	Óleo (g)	OG (g/L)	Sólidos (g)	Sólidos (SS) (g/L)	Surfactante (ml)	RPM	Tempo de agitação (min)
1	6,25	786	2,62	0,48	3,35	1,02	10	385	30
2	6,14	1560	2,62	0,44	3,35	0,52	10	600	30
3	6,74	724	2,62	0,42	3,35	0,57	80	570	90
4	6,42	560	2,62	0,52	3,35	0,54	40	570	90
5	6,34	687	5,24	0,54	3,35	0,96	40	570	90
6	6,33	344	2,62	0,57	5,00	0,48	40	570	30
7	6,29	67,7	3,93	0,02	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	570	120
8	6,50	776	3,93	0,54	Não utilizado	Não utilizado	20	570	120
9	5,75	4190	10,48	0,45	6,70	0,96	20	570	60
10	5,99	3540	10,48	0,59	Não utilizado	Não utilizado	20	570	60
11	6,36	2950	7,86	0,35	6,70	1,64	20	570	60
12	6,34	1840	7,86	0,39	10,05	0,61	20	570	60
13	5,93	2900	7,86	0,41	13,40	1,29	20	570	60
14	7,31	2880	13,1	0,72	13,40	1,57	20	570	60
15	7,44	1210	15,72	0,76	13,40	1,77	20	570	60
16	7,56	1580	18,34	0,72	13,40	2,02	20	570	60

A seguir, outras considerações serão feitas, a partir da Figura 9, com o intuito de demonstrar como se relacionam os parâmetros utilizados na simulação.

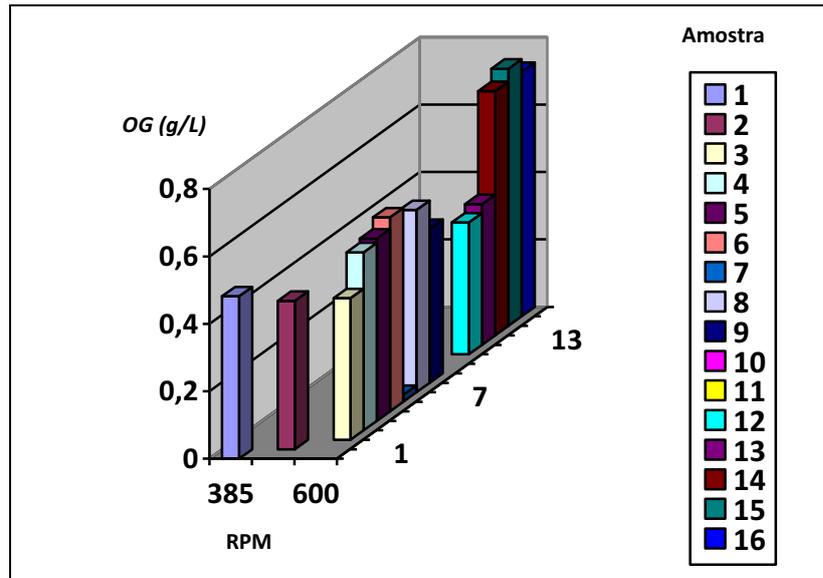


Figura 9 - Relaciona o número de rotações por minuto (RPM) com a concentração de óleos e graxas.

Analisando a Figura 9 pode-se notar que o aumento do número de rotações por minuto de 385 RPM para 600 RPM teve pouca influência na concentração de óleos e graxas. Uma vez que a velocidade de rotação para emulsificação sugerida na literatura encontra-se na faixa acima de 3000 RPM, considerou-se aqui que o aumento da rotação de 385 RPM para 600 RPM é pouco significativo.

As amostras 7 e 8 foram produzidas nas mesmas condições diferindo apenas no uso do surfactante, não utilizado na amostra 7. Investigou-se, a partir disto, a influência da ausência do surfactante no resultado de concentração de OG. Justifica-se assim, o baixo valor de concentração de óleos e graxas na amostra 7 uma vez que, sem surfactante, a emulsão é formada apenas durante o tempo de agitação. Após o término desse tempo, a emulsão não se estabiliza e o óleo volta à forma livre.

As Figuras 10 e 11 mostram claramente a influência da presença de surfactante como agente imprescindível na estabilização da emulsão, corroborando com Rosa (2002), que afirmam que a adição de um surfactante é essencial na formação e estabilização da emulsão pois reduzem a tensão superficial do líquido, facilitando a deformação e ruptura.

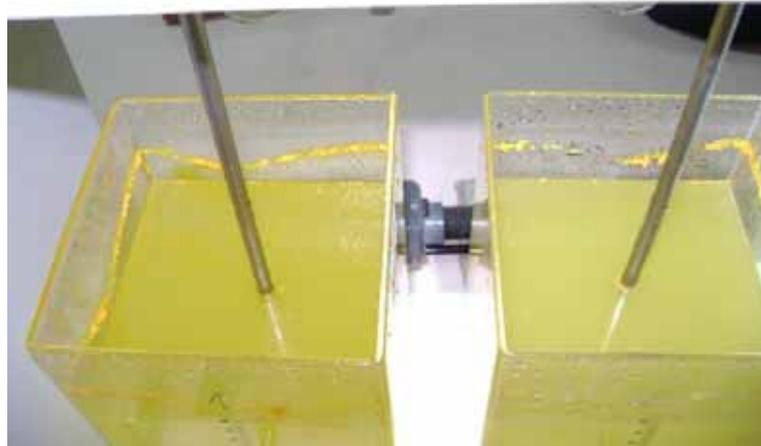


Figura 10 - À esquerda, amostra (7) com emulsões pouco estáveis e à direita, amostra (8) com emulsões mais estáveis.

Podem-se visualizar, através da Figura 11, as placas de óleo livre que se mantêm na superfície da água e ao redor das paredes do jarro, diferentemente da amostra da direita em que o óleo anteriormente na forma livre, após agitação e acréscimo de surfactante, emulsiona-se na água.



Figura 11 - Vista superior do jarro mostrando a influência da ausência (esquerda) do surfactante e da presença (direita) do mesmo na formação de emulsão.

Com relação aos sólidos em suspensão, pelo efluente bruto pode-se notar uma grande quantidade de material sólido fortemente agregado às partículas de óleo emulsionado. Tal condição não foi possível de ser obtida. Pela Tabela 3 nota-se que a máxima quantidade de sólidos obtida esteve ao redor de 2 g/L. Acredita-se que uma maior emulsificação de óleo influenciaria numa maior suspensão do material sólido. Portanto, credita-se à baixa velocidade de agitação o comportamento dos sólidos aquém do desejado. Na Figura 12 pode-se notar que parte dos sólidos mantém-se agregados ao óleo livre, ficando na superfície do jarro.



Figura 12 - Parte dos sólidos mantém-se agregados ao óleo na forma livre.

Com os resultados obtidos até as análises realizadas na amostra 13, pode-se verificar que o acréscimo de óleo, por si só, não resulta na emulsificação do mesmo. A partir de certa quantidade o óleo acrescentado permanece na forma livre. Pensou-se, a partir daí, na influência do pH na mistura. Uma vez que o sabão emulsifica gorduras num pH alcalino, investigou-se o comportamento da mistura em um pH mais elevado.

Como pode ser verificado pelo resultado das análises de óleos e graxas realizadas nas amostras 14, 15 e 16 que, elevando-se o pH, uma maior quantidade de óleo foi emulsionado, confirmando que num pH mais elevado as condições são mais propícias à estabilização do óleo. Para a elevação do pH foi utilizada solução de Ca(OH)_2 , na concentração de 2 g/L. A Tabela 4 mostra o comportamento do pH com o acréscimo da cal hidratada.

Tabela 4 - Relaciona a dosagem de solução hidróxido de cálcio (2%(m/m)) com o pH das amostras

Amostra	pH	Solução 2% Ca(OH)₂
A	5,03	2 ml
B	5,06	3 ml
C	5,07	5 ml
D	5,21	9 ml
E	5,36	10 ml
F	5,50	20 ml
G	6,10	25 ml
H	6,33	40 ml
I	7,02	45 ml
J	7,31	55 ml
K	7,44	70 ml
L	7,56	80 ml

A amostra L foi submetida então à análise de óleos e graxas para verificar se a elevação do pH refletiria num aumento de óleo no estado emulsionado. Como já dito, a elevação do pH realmente confirmou maior emulsificação do óleo.

A elevação do pH e o conseqüente aumento de óleo emulsionado refletiu também na quantidade de sólidos suspensos na amostra. Confirmou-se a suspeita de que a concentração de sólidos suspensos dependia de uma maior concentração de óleo no estado de emulsão.

A água de estudo, simulada anteriormente num pH em torno de 5 e 6, foi a partir de então, simulada com pH mais elevado, ministrando cal com o intuito de manter o estado de emulsificação, a concentração de óleos e graxas obtida (0,725 g/L) e a quantidade de sólidos suspensos (2,25 g/L). A seguir a caracterização físico-química da água sintética final obtida (Tabela 5).

Tabela 5 - Caracterização físico-química do efluente sintético final

Parâmetro	Valor
Turbidez	1580 NTU
pH	7,56
SST (g/L)	2,025
OG (g/L)	0,725

5.3. Monitoramento da estabilidade da emulsão

A principal característica de uma emulsão está ligada à sua estabilidade. A partir desta constatação foram realizados, paralelamente às etapas de simulação do efluente, alguns estudos nos quais se buscou verificar a estabilidade das emulsões que estavam sendo obtidas durante as simulações. Utilizou-se para tal, o método de análise visual e de análise de turbidez, de acordo com a metodologia descrita por Schons (2008).

Foram feitas algumas tentativas de verificação da estabilidade das emulsões através da análise visual do efluente que era gerado, nos tempos pré-determinados. Porém, o método mostrou-se ineficaz aos estudos propostos uma vez que, visualmente, foi impossível de se aferir algo a respeito da estabilidade por esse método. A Figura 13 demonstra a dificuldade na utilização do método visual para a constatação de variação de estabilidade.



Figura 13 - Análise visual da estabilidade das emulsões. Os tempos de repouso foram de 15 e 60 minutos para a amostra da esquerda e a da direita, respectivamente.

Descartado o método visual para análise da estabilidade, foi dado prosseguimento aos estudos da estabilidade das emulsões geradas utilizando o método de análise de turbidez. De acordo com a metodologia descrita no item 4.6, em uma dosagem de surfactante fixa, para cada tempo de repouso eram realizadas medidas de turbidez em três amostras. Os resultados são mostrados na Tabela 6 na qual se verifica que, para a dosagem de 0,5% (v/v), apesar de valores de turbidez destoantes, através do desvio padrão pode-se notar uma maior estabilização da emulsão à medida que o tempo de repouso aumenta. Nesse caso, a melhor estabilidade da emulsão ocorreu para um tempo de repouso de 30 minutos, como mostra o menor desvio padrão.

Tabela 6 - Variação da turbidez em função do tempo de repouso, para uma dosagem de surfactante de (0,5%(v/v)) e tempo de agitação de 60 minutos

Tempo de repouso (min)	Turbidez (NTU)			Turbidez média (NTU)	Desvio Padrão (NTU)
0	1074	3678	1979	2243,67	1322,02
15	2067	2987	1289	2114,3	849,98
30	897	567	853	772,33	179,17
60	1098	1569	1798	1488,33	356,90
120	1571	1957	2010	1846	239,96

Repetiu-se a análise de turbidez, agora para uma dosagem de surfactante fixa de 1%(v/v). Os resultados para essa dosagem podem ser visualizados na Tabela 7 em que se mostra a repetição do padrão verificado na análise feita para a dosagem de surfactante de 0,5%(v/v). Esse padrão mostra que a estabilidade da emulsão, aumenta para um tempo de repouso maior (120 min).

Tabela 7 - Variação da turbidez em função do tempo de repouso, para uma dosagem de surfactante de 1%(v/v) e tempo de agitação de 60 minutos

Tempo de repouso (min)	Turbidez (NTU)			Turbidez média (NTU)	Desvio Padrão (NTU)
0	1450	1567	1456	1491	65,88
15	1905	1769	1879	1851	72,19
30	998	1009	1273	1093	155,69
60	899	904	979	927,33	44,81
120	1854	1897	1923	1891,33	34,84

Na Tabela 8 são descritos os resultados da análise de turbidez para uma dosagem de surfactante de 2%(v/v). Para os tempos de repouso de 120 minutos, de acordo com o desvio padrão obtido, obteve-se a melhor estabilidade dessa emulsão.

Tabela 8 - Variação da turbidez em função do tempo de repouso, para uma dosagem de surfactante de (2%(v/v)) e tempo de agitação de 60 minutos

Tempo de repouso (min)	Turbidez (NTU)			Turbidez média (NTU)	Desvio Padrão (NTU)
0	993	1092	2093	1392,66	608,52
15	1038	2981	990	1669,6	1135,90
30	2011	1090	1272	1456,66	487,76
60	1398	1432	1632	1487,33	126,43
120	1092	1210	1109	1137	63,78

Por fim, para a última dosagem de surfactante investigada (4%(v/v)) foram feitas análises de turbidez com o intuito de confirmar o padrão verificado para as demais dosagens.

Os resultados obtidos e descritos na Tabela 9 confirmam novamente o padrão, a partir da verificação do desvio padrão.

Tabela 9 - Variação da turbidez em função do tempo de repouso, para uma dosagem de surfactante de (4%(v/v)) e tempo de agitação de 60 minutos

Tempo de repouso (min)	Turbidez (NTU)			Turbidez média (NTU)	Desvio Padrão (NTU)
0	2010	2681	1087	1926	800,31
15	902	2091	1079	1357,33	641,50
30	1102	1891	1788	1593,66	428,89
60	998	1021	1301	1106,66	168,69
120	1302	1598	1483	1463,33	150,06

Como os resultados mostraram, a estabilidade da emulsão aumenta com o passar do tempo, confirmando os estudos feitos por Schons (2008). A importância desse estudo de estabilidade para o trabalho proposto reside no fato de que, como a quantidade de efluente utilizado para as etapas seguintes seria grande, foi necessário verificar se a condição de estabilidade seria mantida ao longo do tempo, permitindo o armazenamento do efluente produzido, para posterior uso. Além disso, como os resultados relacionados à concentração de óleo mostraram que essa concentração não era influenciada pela dosagem de surfactante, fixou-se em 1%(v/v) a dosagem utilizada na produção do efluente sintético, uma vez que foi justamente com essa dosagem que melhor ocorreu a estabilidade das emulsões, como mostrou os estudos de análise de turbidez.

5.4. Resultado dos ensaios de adequação da dosagem de coagulante e pH de coagulação

A partir do efluente sintético preparado de acordo com a caracterização que se obteve, foram realizados ensaios no flotatest. As curvas de flotação visualizadas na figura 14, 15 e 16, apresentam os resultados de adequação da dosagem de coagulante e pH de coagulação

visando a FAD. São apresentados os residuais de turbidez obtidos para cada dosagem de coagulante e pH de diferentes valores e velocidades de flotação investigadas.

Observa-se na Figura 15, que o pH em que se trabalhou nesse primeiro ensaio está bem abaixo do pH do efluente sintético produzido. É necessário lembrar e frisar que o pH desse efluente foi aumentado com o intuito de obter uma maior concentração de óleo em estado de emulsão. Para os ensaios de adequação de dosagem de coagulante e pH de coagulação o efluente foi acidificado com ácido clorídrico a 5%(v/v) até um pH próximo ao pH do efluente bruto, por volta de 5,20.

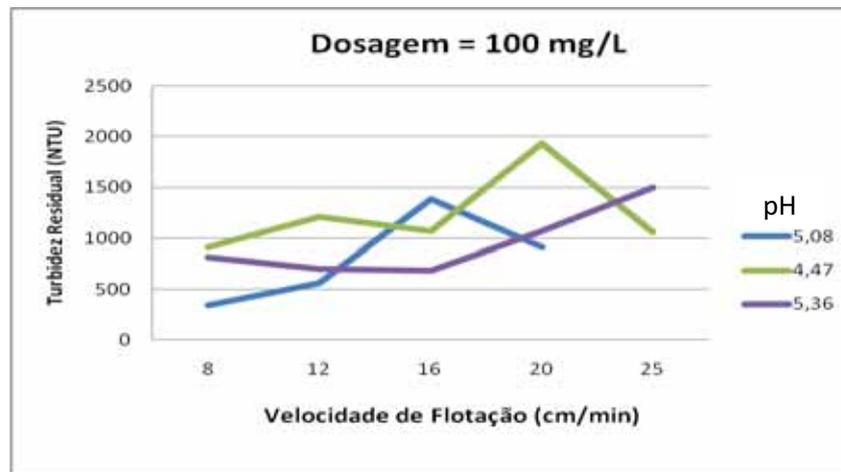


Figura 14 - Curva de Flotação para turbidez residual referente aos ensaios de coagulação, floculação e flotação.

Pode-se verificar que a melhor remoção deste primeiro ensaio, referente à dosagem de coagulante de 100 mg/L ocorreu para a menor velocidade de flotação utilizada (8 cm/s), num pH de 5,08. A eficiência de remoção de turbidez foi de 77%.

Observa-se também que para o pH abaixo de 5 a turbidez foi superior à inicial mostrando que o cloreto férrico foi pouco eficiente abaixo desse pH. As velocidades mais altas, referentes ao menor tempo de flotação, tiveram o pior desempenho na remoção de partículas.

Para a dosagem de 200 mg/L a melhor faixa de remoção de turbidez se mostrou, como pode ser visto pela Figura 15, para um pH bem próximo a 5 e para velocidades de flotação medianas. Essa dosagem não se mostrou eficiente para um pH de 5,36, sendo este valor o de pior remoção para essa dosagem de 200 mg/L. O que se inferiu dos ensaios até agora realizados é a baixa remoção que ocorre quando as velocidades de flotação são elevadas.

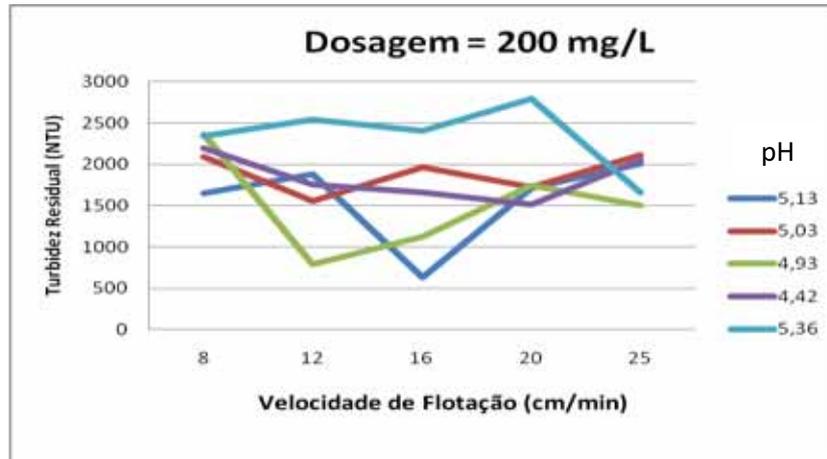


Figura 15 - Curva de Flotação para turbidez residual referente aos ensaios de coagulação, floculação e flotação.

Para a dosagem de coagulante de 300 mg/L (Figura 16), a mais alta investigada, verifica-se que as melhores taxas de remoção ocorreram num pH mais baixo, abaixo de 5. Pode-se perceber também que as velocidades tiveram uma menor influência do que o pH, neste ensaio com esta dosagem. Ainda sim, verificou-se que melhores remoções ocorreriam com menores velocidades e conseqüente tempo de flotação mais elevado. Os resultados completos de cada ensaio podem ser vistos nas Tabelas A.1, A.2 e A.3 no Apêndice.

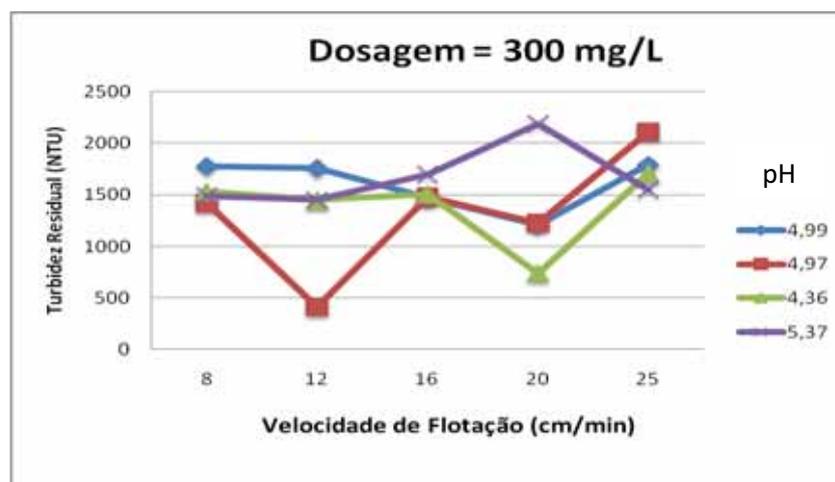


Figura 16 - Curva de Flotação para turbidez residual referente aos ensaios de coagulação, floculação e flotação.

5.5. Remoção dos parâmetros turbidez, sólidos suspensos e óleos e graxas

Uma vez obtidos os valores referentes à eficiência de remoção da turbidez (valores apresentados na tabela A1, A2 e A3 do apêndice), juntamente com as análises de turbidez e óleos e graxas, foi feita uma correlação entre turbidez e óleos e graxas (Figura 17) para, a partir desta correlação, obter a concentração de óleo residual. A necessidade de tal correlação baseou-se na dificuldade e impossibilidade de realizarem-se as análises finais no extrator de óleos e graxas que vinha sendo utilizado.

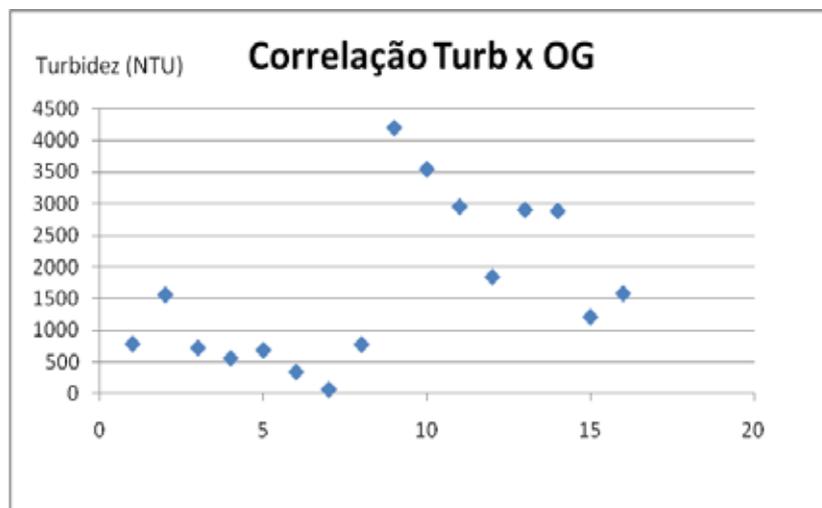


Figura 17 - Gráfico mostrando a correlação entre os parâmetros turbidez e óleos e óleos e graxas.

Na Tabela 10 são apresentados a caracterização do efluente sintético, do efluente tratado e a eficiência de remoção com o intuito de verificar a eficiência da técnica flotação por ar dissolvido no tratamento do efluente proveniente da extração de óleo de dendê.

Tabela 10 - Parâmetros do efluente bruto, tratado e a eficiência de remoção mantendo-se fixos as seguintes condições: Dosagem FeCl₃ (100 mg/L) x pH de coagulação (5,08); G_{mr} (1000s⁻¹) e T_{mr} (20s); G_{fl} (60s⁻¹) e T_f (15min); P_{sat} (450 kPa)

Parâmetros	Efluente Sintético	Efluente Tratado	Remoção (%)
PH	5,08	-	-
Turbidez (NTU)	1580	348	73,91
Sólidos Suspensos (g/L)	2,025	0,9841	51,4
Óleos e Graxas (g/L)	0,725	0,10	86,2

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Para as condições do efluente bruto de Turbidez (8940 NTU), Sólidos Suspensos (3,35 g/L) e Óleos e Graxas (1,31 g/L), o efluente sintético foi gerado com a condição de emulsão óleo/água e tendo as seguintes características: Turbidez (1580 NTU), Sólidos Suspensos (2,025 g/L) e Óleos e Graxas (0,725 g/L);
- A estabilidade da emulsão foi obtida com uma pequena dosagem (1%) de surfactante, em consonância com a literatura, que relata a necessidade de uma pequena quantidade de surfactante para estabilizar grandes volumes;
- Os ensaios de investigação de FAD mostraram-se promissores na remoção dos parâmetros estudados para uma pressão de saturação de 450 kPa e taxa de recirculação de 20% utilizadas, mostrando uma eficiência de 73,91% na remoção de Turbidez, 51,4% na remoção de Sólidos Suspensos e 86,2% na remoção de Óleos e Graxas;
- A melhor eficiência obtida (73,91%) ocorreu para uma dosagem de cloreto férrico de 100 mg/L num pH de coagulação de 5,08.
- Para as velocidades ascensionais investigadas, a velocidade de 8 cm/s mostrou-se a mais eficiente. As demais velocidades (12, 16, 20 e 25 cm/ min) mostraram-se pouco eficientes para as características do efluente estudado;

7. RECOMENDAÇÕES

- Nas investigações futuras de adequação de dosagem e pH de coagulação, sugere-se trabalhar com dosagens de coagulante e pH menores;
- Realizar ensaios de investigação visando otimizar os parâmetros de floculação: Tempo de floculação e Gradiente médio de velocidade de floculação;
- Realizar ensaios de investigação visando a otimização da quantidade de ar fornecida;
- Utilizar velocidades de flotação menores, proporcionando maiores tempos de flotação para as partículas;
- Para as próximas gerações de emulsões óleo/água utilizar velocidades de agitação que proporcione um número de rotações por minuto acima de 3000;
- Nos próximos trabalhos com etapas de emulsificação, utilizar o surfactante Extran (sem fósforo) uma vez que o detergente comum, por ter fósforo em sua composição, pode funcionar como um inibidor do processo de coagulação;
- Estudar aspectos ligados à viscosidade do efluente oleoso visando verificar sua influência nas condições de emulsificação e estabilização de emulsões;
- Estudar como a energia se relaciona com a viscosidade e a temperatura;
- Realizar o estudo proposto com outros produtos extrativistas para uma posterior comparação entre os mesmos;

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BECHER, P., 1965. **Emulsions: theory and practice**. Reinhold Publishing Corporation, N.Y.; 2nd edition.

CECCHET, J. **Avaliação do desempenho de flotação por ar dissolvido no tratamento de efluente de refinaria de óleo de soja**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, 2007.

DI BERNARDO, L.; PÁDUA, V.L.; DI BERNARDO, A.S. (2001). **Desenvolvimento de Instalação de Laboratório para Determinação da Dosagem de Coagulante na Filtração Direta**. Anais eletrônicos do IX SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Seguro, BA.

FREESTONE, F.J., TABAKIN, R.B., 1975. **Review of U.S. Environmental Protection Agency Research in Oil-Water Separation Technology**. Conference on Prevention and Control of Oil Pollution, San Francisco, 437.

GIORDANO, G. **Saneamento Básico e Tratamento de Efluentes**. Apostila UERJ, Rio de Janeiro, 2003. 71p.

LACERDA, R.S., MARQUES, S.F.S, BRANDÃO, C.C.S. (1998). **A influência do pH de coagulação e do tempo de floculação na flotação por ar dissolvido de águas de baixa turbidez e com presença de algas**. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e Escoamento de Fluidos – Ênfase na Indústria do Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MATIOLO, E. **Flotação avançada para o tratamento e reaproveitamento de águas poluídas**. XIX Prêmio Jovem Cientista, UFRGS, 2003.

MENDES, C. G. N.; **Estudo da coagulação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. 144 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1989.

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

MORUZZI, R. B. (2005). **Avaliação da Influência da Distribuição de Tamanho de Partículas e do Binômio Velocidade/Tempo de Detenção na Zona de Reação no Desempenho da Flotação com Utilização de Sonda Ultrassônica e Técnica de Análise por Imagem**. Tese (Doutorado) apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. P. 223-245.

RANGEL, R. M.; **Modelamento da eletrocoagulação aplicada ao tratamento de águas oleosas proveniente das indústrias extrativas**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 2008.

RODRIGUES, R. T.; Rubio, J. **Inovação Tecnológica no Tratamento de Águas Oleosas de Plataformas Marítimas**. ...Anais: In: XIX Prêmio Jovem Cientista - 2003 – Água - Fonte de Vida.

ROSA, J. J. **Desenvolvimento de um novo processo de tratamento de águas oleosas – Processo FF**. Prêmio Jovem Cientista – Água: Fonte da Vida, 19. Porto Alegre-RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. 2003. 33p.

REALI, M. A. P. **Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento**. São Carlos. 1984. 186 F., Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

REALI, M. A. P. **Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante.** São Carlos. 373p. 2v. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1991.

REALI, M. A. P. **Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento.** São Carlos. 1984. 186 F., Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

RYAN, J., 1986. **Process selection for oil separation.** Eff. Wat. Treat. Journal, 60.

SALAGER, J.L. **Teoria de Emulsões e sua Aplicação na Indústria de Petróleo.** CENPES. Rio de Janeiro. 1956.

SCHONS, E. M. **Desestabilização de emulsões visando a redução do teor de óleo e água.** Dissertação de Mestrado. Campus Universitário Morro do Cruzeiro, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

ROSA, J. J. DA. **Separação otimizada de compostos orgânicos por floculação-flotação.** Tese de doutorado, UFRGS, 2002.

SHAW, D. J. **Introdução à química dos colóides e de superfícies.** Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1975.

STANDARD Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21.ed., Ed American Public Health Association/ American Water Works Association/ Water Environment federation, Washington DC, USA, 1998.

TABAKIN, R.B., TRATTER, R. AND CHEREMINSINOFF, P.N., 1978. **Oil/water separation technology : the options available, part one.** *Wat. Sew. Works*, 74.

ZABEL, T. **The Advantages of Dissolved Air Flotation for Water Treatment.** *Journal AWWA*, 42-46, may, 1985.

APÊNDICES

APÊNDICE A - ENSAIOS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO – PARÂMETRO TURBIDEZ

Tabela A.1 - Resultados do ensaio 1 de coagulação, floculação e flotação

Ensaio 1 de coagulação, floculação e flotação com pH e dosagem de coagulante variáveis											
Cloreto Férrico											
Mist Rap		Floculação		Flotação					Características da água estudada		
Tmr = 20s		Tf = 15min		T sat = 10min					R = 20%	pH	Turbidez (NTU)
Gmr = 1000s-1		Gf = 60s-1		P sat = 4,5Kgf/cm2						7,56	1530
				Va = 8 cm/s	Va = 12 cm/s	Va = 16 cm/s	Va = 20 cm/s	Va = 25 cm/s			
Frasco	Dos P. Químico	pH corrigido	T (NTU)	T (NTU)	T (NTU)	T (NTU)	T (NTU)	T (NTU)			
	Coag	Floc									
E1.1a	100 mg/L	...	348	425	209	382	555				
E1.1b	200 mg/L	...	1650	1880	633	1710	2010				
E1.1c	300 mg/L	...	1460	1500	1930	2380	2080				
			I	II	III	IV	V				

Tabela A.2 - Resultados do ensaio 2 de coagulação, floculação e flotação

Ensaio 2 de coagulação, floculação e flotação com pH e dosagem de coagulante variáveis										
Cloreto Férrico										
Mist Rap	Floculação		Flotação					Características da água estudada		
	Tmr = 20s	Tf = 15min	T sat = 10min					pH	Turbidez (NTU)	
Gmr = 1000s-1	Gf = 60s-1		P sat = 4,5Kgf/cm2					R = 20%	7,42	1530
Frasco	Dos P. Químico		pH corrigido	Va = 8	Va = 12	Va = 16	Va = 20	T (NTU)	T (NTU)	T (NTU)
	Coag	Floc		cm/s	cm/s	cm/s	cm/s			
E2.1a	100 mg/L	...	5,08	561	441	541	1010	980		
E2.1b	200 mg/L	...	5,03	2090	1560	1960	1720	2110		
E2.1c	300 mg/L	...	4,99	1780	1760	1470	1210	1790		
				I	II	III	IV	V		

Tabela A.3 - Resultados do ensaio 3 de coagulação, floculação e flotação

Ensaio 3 de coagulação, floculação e flotação com pH e dosagem de coagulante variáveis											
Cloreto Férrico											
Mist Rap		Floculação		Flotação					Características da água estudada		
Tmr = 20s		Tf = 15min		T sat = 10min					R = 20%	pH	Turbidez (NTU)
Gmr = 1000s-1		Gf = 60s-1		P sat = 4,5Kg/cm2						7,43	1530
				Va = 8 cm/s	Va = 12 cm/s	Va = 16 cm/s	Va = 20 cm/s	Va = 25 cm/s			
Frasco	Dos P. Químico	pH corrigido		T (NTU)	T (NTU)	T (NTU)	T (NTU)	T (NTU)			
	Coag Floc										
E3.1a	100 mg/L	4,91		1380	1850	901	2540	1280			
E3.1b	200 mg/L	4,93		2360	786	1130	1740	1500			
E3.1c	300 mg/L	4,97		1420	411	1480	1230	2110			
				I	II	III	IV	V			

