



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

MARIA CAMILA INÁCIO DE MELO

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS DE BOLHAS EM UMA
COLUNA DE FLOTAÇÃO

ANGICOS

2023

MARIA CAMILA INÁCIO DE MELO

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS DE BOLHAS EM UMA
COLUNA DE FLOTAÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciências e Tecnologia.

Orientador: Prof^a. Dra. Leda Maria de Oliveira Lima

Co-orientador: Prof. Dr. Damilson Ferreira dos Santos

ANGICOS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

IM528 Inácio de Melo, Maria Camila.
e ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS DE BOLHAS
EM UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO / Maria Camila Inácio
de Melo. - 2023.
41 f. : il.

Orientadora: Leda Maria de Oliveira Lima .
Coorientador: Damilson Ferreira dos Santos.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2023.

1. Água de produção. 2. Diâmetro de bolhas. 3.
Flotação. 4. Tensoativo. I. de Oliveira Lima ,
Leda Maria, orient. II. Ferreira dos Santos,
Damilson, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

MARIA CAMILA INÁCIO DE MELO

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS DE BOLHAS EM UMA
COLUNA DE FLOTAÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciências e Tecnologia.

Defendida em: 09 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

LEDA MARIA OLIVEIRA DE LIMA

Data: 10/10/2023 17:38:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Leda Maria de Oliveira Lima Profa. Dra. (UFERSA)
Presidente**



Documento assinado digitalmente

DAMILSON FERREIRA DOS SANTOS

Data: 11/10/2023 08:35:42-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Damilson Ferreira dos Santos Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador**



Documento assinado digitalmente

ROBERTA PEREIRA DA SILVA

Data: 11/10/2023 15:39:22-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Roberta Pereira da Silva, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que com toda sua grandeza cuida de nós todos os dias. Agradeço a minha família por ser o pilar que até aqui me sustentou, a minha filha Lorena, meu eterno amor, por me motivar sempre a ser uma pessoa melhor. Ao meu querido marido, Matheus, por toda compreensão e ajuda nos momentos mais exaustivos dos meus dias. Aos meus colegas, principalmente aos que compartilharam as dificuldades da jornada de estudante. Ao meu amigo de curso e pessoal, Wilson, por escutar minhas lamentações e dividir comigo os anseios dessa árdua trajetória acadêmica, a professora e vice-coordenadora do curso Enai por toda dedicação a seus alunos e principalmente comigo. Sou grata a todos os professores da UFERSA *campus* Angicos. E por fim, minha gratidão a banca examinadora por transmitir todo seu conhecimento, e a minha orientadora professora Leda Lima por toda ajuda e paciência com minha pessoa. Sem vocês nada disso seria possível.

RESUMO

Resultado da indústria petrolífera, a água de produção é um tipo de poluição que apresenta materiais dispersos e dissolvidos que prejudicam não só o meio ambiente, mas também, as unidades de processamento de petróleo. Esta água é constituída de sais, sólidos e óleo residual (suspensão, emulsionado ou solubilizado). De acordo com a legislação ambiental (resumo de nº 393/2007 do CONAMA), o teor deste óleo deve estar entre 29 mg/L a 42 mg/L em águas para descarte em corpos d'água superficiais. O tratamento dessa água residual atualmente é de extrema relevância não somente para redução do impacto a natureza, mas também no ponto de vista econômico, já que essa água poder ser reutilizada em outros processos, minimizando custos com matéria-prima (SILVA, 2000). Devido a esse fato, muitos métodos vêm sendo estudados de forma a utilizar a extração líquido-líquido para remover esses componentes danosos a natureza. Os métodos de tratamento da água de produção dependem de muitos fatores, incluindo os volumes envolvidos, a concentração de poluentes, a localização do campo de produção e os limites impostos pelas leis ambientais, afinal, as tecnologias de tratamento devem apresentar baixos custos de capital e alta eficiência para ser viáveis (PATRÍCIO, 2006). Nesse contexto, insere-se a flotação, processo físico de separação de misturas heterogêneas, que consiste em adicionar bolhas de ar ao meio, formadas quando um fluxo de gás passa em uma coluna líquida, com adição de tensoativo, ocorrendo a coalescência das gotas de óleo dispersas e, conseqüentemente, o transporte delas ao topo da coluna, formando uma nova fase oleosa contínua. Que posteriormente facilita o araste para o processo de recuperação. O processo fundamenta-se na saturação de tensoativo na interface gás-líquido, dependendo da concentração de tensoativo usada, resultando na flotação da fase óleo dispersa. Um filtro de prato poroso, com tamanho de poro que varia de 40 a 250 µm, foi colocado à base da coluna para permitir uma operação hidrodinâmica estável..

Palavras-chave: Água de produção. Diâmetro de bolhas. Flotação. Tensoativo

ABSTRACT

Result of the oil industry, production water is a type of pollution that presents dispersed and dissolved materials that harm not only the environment, but also the oil processing units. This water consists of salts, solids and residual oil (suspended, emulsified or solubilized). According to environmental legislation (summary of CONAMA no. 393/2007), the content of this oil must be between 29 mg/L and 42 mg/L in water for disposal in surface water bodies. The treatment of this residual water is currently extremely relevant not only to reduce the impact on nature, but also from an economic point of view since this water can be reused in other processes, minimizing costs with raw materials (SILVA, 2000). Due to this fact, many methods have been studied in order to use liquid-liquid extraction to remove these components, harmful to nature. Production water treatment methods depend on many factors, including the volumes involved, the concentration of pollutants, the location of the production field and the limits imposed by environmental laws. high efficiency to be viable (PATRÍCIO, 2006). In this context, flotation is inserted, a physical process for separating heterogeneous mixtures, which consists of adding air bubbles to the medium, formed when a gas flow passes through a liquid column, with the addition of surfactant, with the coalescence of water droplets occurring. dispersed oil and, consequently, their transport to the top of the column, forming a new continuous oil phase. Which subsequently eases the drag into the recovery process. Such surfactants lead to a gas-liquid interface saturation, depending on the used surfactant concentration, affecting the flotation process and influencing in the removal capacity of the oily dispersed phase. A porous plate filter, with pore size varying from 40 to 250 μm , was placed at the base of the column to allow a hydrodynamic stable operation.

Keywords: Bubble diameter. Flotation. Production water. Surfactant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Molécula do tensoativo.....	16
Figura 2. Classificação dos tensoativos.....	16
Figura 3. Tipos de micelas.....	17
Figura 4. Configuração experimental.....	19
Figura 5. Partes da coluna de flotação.....	19
Figura 6. Foto do registro do diâmetro de bolhas.....	21
Figura 7. Filtro de placa porosa.....	23
Figura 8. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 1, vazão 300 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	25
Figura 9. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 1, vazão 500 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	25
Figura 10. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 1, vazão 700 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	26
Figura 11. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 1, vazão 900 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	26
Figura 12. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 2, vazão 300 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	27
Figura 13. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 2, vazão 500 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	28
Figura 14. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 2, vazão 700 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	28
Figura 15. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 2, vazão 900 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	29
Figura 16. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 3, vazão 300 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	30
Figura 17. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 3, vazão 500 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	30
Figura 18. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 3, vazão 700 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	31
Figura 19. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 3, vazão 900 cm ³ .min ⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.....	31

Figura 20. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para a melhor vazão de operação encontrada de 700 cm ³ .min ⁻¹ em função dos filtros 1, 2 e 3.....	32
Figura 21. Diâmetro de bolhas de ar em função do tempo para as vazões de 300, 500, 700 e 900 cm ³ .min ⁻¹ para o filtro no 1.....	35
Figura 22. Diâmetro de bolhas de ar em função do tempo para as vazões de 300, 500, 700 e 900 cm ³ .min ⁻¹ para o filtro no 2.....	36
Figura 23. Diâmetro de bolhas de ar em função do tempo para as vazões de 300, 500, 700 e 900 cm ³ .min ⁻¹ para o filtro no 3.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição media do óleo de coco	20
Tabela 2	– Especificação dos filtros	23
Tabela 3	– Estimativa da eficiência do processo em função do diâmetro de bolhas.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – área da cabeça do tensoativo (A)

A/O – água em óleo

AB – área superficial das bolhas de ar

AT – área superficial total das bolhas

C – Concentração (mg/L)

C/T – razão concentração/tensoativo

Cf – concentração final de óleo (mg/L)

CMC – concentração micelar crítica

Co – concentração inicial (mg/L)

CONAMA – conselho nacional do meio ambiente

d – diâmetro das gotas (mm)

d10 – diâmetro numérico significativo (mm)

d30 – diâmetro volumétrico significativo (mm)

d32 – diâmetro de sauter (mm)

Dbm e/ou dpm – diâmetro médio das bolhas (mm)

Dp – diâmetro das partículas (mm)

dpq – diâmetro de bolhas significativo (mm)

dv/dy – gradiente de velocidade

E – eficiência (%)

OCS – óleo de coco sabonificado

V – velocidade de subida das gotas

Vb – volume unitário das bolhas de ar

Vb- volume de bolha

Letras gregas

α b – efetividade

Φ – porosidade

γ – taxa de deformação

LISTA DE SÍMBOLOS

@	Arroba
©	Copyright
®	Marca registrada
%	Porcentagem
\$	Cifrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	16
2.1	Compostos tensoativos.....	16
3	METODOLOGIA.....	18
3.1	Coluna de flotação	18
3.2	Tensoativo.....	20
3.3	Determinação do diâmetro e número de bolhas.....	20
3.4	Determinação do perfil de velocidade das bolhas de ar.....	22
3.5	Aeração do processo.....	22
3.6	Coalescência de bolhas	22
3.7	Filtros porosos	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1	Distribuição do tamanho de bolhas.....	24
4.2	Estudo da agregação eficiente das bolhas de ar na colisão	35
5	CONCLUSÕES.....	38
6	REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho versa sobre um estudo desenvolvido por Lima (2009), que abrange sobre aspectos principais e conceituais da flotação em uma coluna com o uso de OCS. A ênfase se deu na avaliação e distribuição do diâmetro de bolhas e sua importância nesse processo para o tratamento da água de produção.

Á água de produção é um subproduto que aparece comumente durante a extração de petróleo e gás natural, essa água de produção gera um grande impacto ambiental, pois apresenta elevado teor de sal em sua composição e forma emulsões com viscosidades superiores ao do petróleo desidratado, por isso deve ser removida. No Brasil, através da resolução de 393/2007 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) estabelece que o número máximo do nível de óleo ou graxa presente nas águas de produção para o descarte em cursos d'água não ultrapasse 42 mg/L.

Um método que tem se mostrado eficiente segundo; Rubio et al (2002) é a flotação, devido à capacidade de tratar grandes volumes de efluentes, alta seletividade e eficiência de separação a um baixo custo operacional. Sua utilização na recuperação de águas contaminadas com vários tipos de poluentes tem se mostrado relevantes. A coluna de flotação é formada basicamente por uma coluna de vidro borossilicato, transparente, com um filtro de placa porosa e uma injeção de ar em sua base para proporcionar a formação das bolhas internas na coluna.

Para garantir um aproveitamento da técnica que utiliza bolhas para separação deve-se levar em consideração múltiplos parâmetros como o tipo de coluna de flotação, sua capacidade, vazão de gás, o perfil de velocidade de escoamento, coalescência das bolhas de ar, e as técnicas a serem empregadas. Alguns fatores devem ser destacados ainda, como: a distribuição de tamanho das partículas, bem como, o tamanho de bolhas, sendo assim, variáveis físicas importantes e de grande impacto no processo, pois influem diretamente na eficiência de captura das partículas e no holdup de ar (fração de gás na mistura gás-líquido) (Rodrigues, 2004). Outro ponto, é a natureza dos poluentes, que podem ser voláteis, inorgânicos, orgânicos, livres ou em forma de complexos; mistura de um ou mais compostos, suas concentrações e a influência de fatores como temperatura, pH, tempo de residência, densidade, viscosidade, tensão superficial, etc.

A espuma formada na coluna de flotação pode então ser removida, arrastando consigo as partículas de impurezas. No caso específico da água de produção, o óleo presente, devido à alta imiscibilidade adere as bolhas de ar, facilitando seu processo de recuperação no estado do processo de flotação. Todos esses parâmetros fazem parte do estudo hidrodinâmico da coluna de flotação, fundamental para a caracterização e otimização do processo. Além disso, destaca-se a utilização dos tensoativos, moléculas com capacidade de diminuir a tensão interfacial e superficial influenciando a superfície de contato entre dois líquidos. Em sua estrutura, os surfactantes como também são chamados, possuem duas regiões que se opõem: parte hidrofílica (polar) com afinidade por a água e parte lipofílica (apolar) com maior afinidade por hidrocarbonetos, gorduras e óleos. Essas características conferem a essas compostos grande utilidade no tratamento de águas oleosas.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

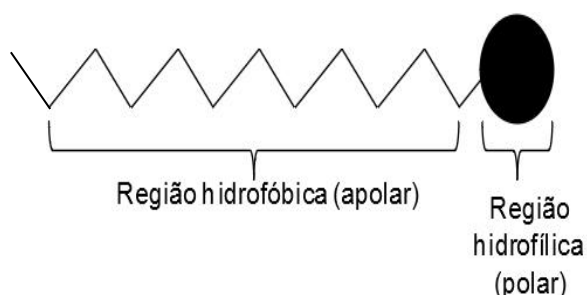
2.1 Compostos tensoativos

Os compostos tensoativos ou surfactantes são substâncias orgânicas que apresentam como característica principal o fato de terem um comportamento anfifílico, ou seja, tem a capacidade de interagir entre meios com polaridades diferentes, podendo ser utilizados como conciliadores de fases imiscíveis, uma vez que tem a capacidade de reduzir a tensão superficial. Essa característica permite a formação de emulsões, espumas, suspensões, microemulsões, podendo ainda ser utilizados para formação de filmes líquidos, umectação e limpeza de superfícies. Em geral, os tensoativos possuem em sua estrutura uma porção apolar e outra polar, que faz com que esse composto orgânico interaja bem com água e lipídios.

Em sua parte hidrofóbica, observa-se uma cadeia carbônica que se liga a substâncias apolares, e a outra a hidrofílica ou iônica que se liga a substâncias polares.

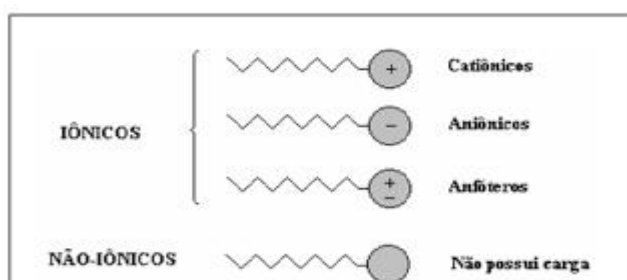
A estrutura orgânica de um tensoativo está esquematizada abaixo: Figuras 1 e 2:

Figura 1. Molécula do tensoativo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 2. Classificação dos tensoativos.



Fonte: Patrício (2006).

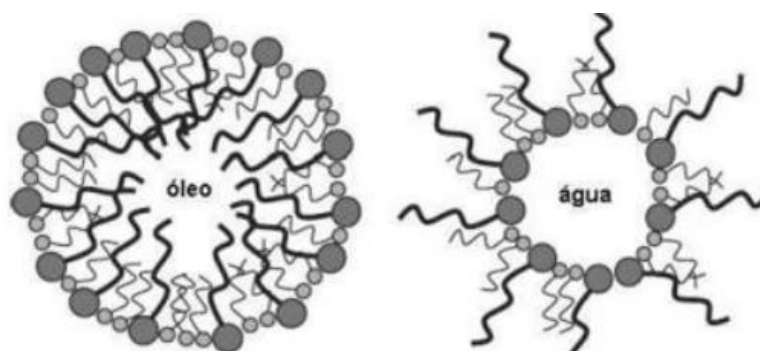
A interação dos tensoativos está relacionada com o tamanho da cadeia do qual é formado e com sua afinidade pelo meio. Esses compostos podem ser classificados de acordo com a região, existem tensoativos aniônico, catiônicos, não iônicos ou anfóteros.

Os catiônicos são caracterizados por possuírem em suas moléculas um grupo hidrofílico carregado positivamente. Possuem baixo poder detergente, mas são os tensoativos que apresentam a mais alta capacidade de aderência às superfícies sólidas, mesmo após a retirada da solução do tensoativos. Os aniônicos possuem em sua extremidade hidrofílica cargas negativas. Já tensoativos anfóteros possuem tanto cargas negativas como positivas, esses por sua vez, possuem boas propriedades de tensão superficial, concentração de partículas, umectância e penetração. E temos também os que não possuem nenhum tipo de carga os chamados não-iônicos.

Dentre várias propriedades importantes, pode-se citar a micelização. As micelas são agregados moleculares, com ambas as regiões estruturais hidrofílica e hidrofóbica, que dinamicamente se associam espontaneamente em solução aquosa a partir de certa concentração crítica (CMC), formando grandes agregados moleculares de dimensões coloidais, chamados micelas.

A natureza do solvente, em que os tensoativos estão inseridos caracteriza a existência de dois tipos de micelas: as micelas diretas ou normais e as inversas. As micelas diretas se formam na presença de solventes polares, onde a cabeça polar do tensoativos fica orientada para o meio polar, enquanto a cauda apolar agrupa-se no interior da micela, evitando o contato com o diluente. Já as micelas inversas apresentam o comportamento contrário, como demonstra a Figura 3.

Figura 3. Tipos de micelas.



Fonte: Carnicel (2014)

A micela é a configuração das moléculas de tensoativo com melhor estabilidade na solução.

3. METODOLOGIA

3.1 Coluna de flotação

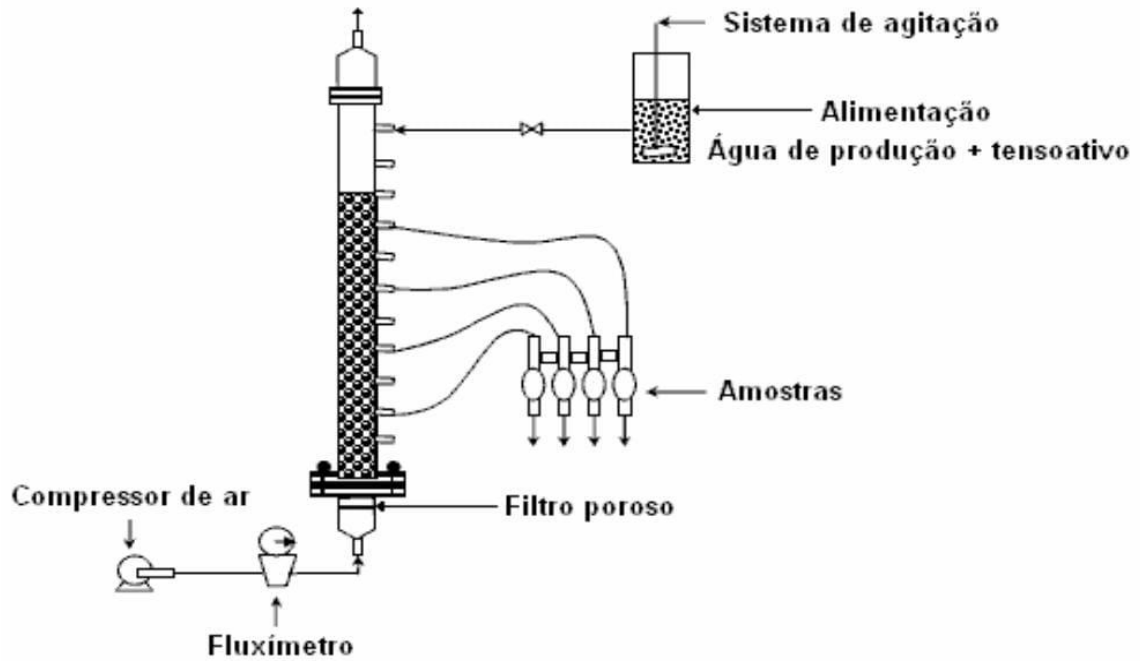
A flotação é um tipo de processo físico de separação de misturas heterogêneas. Essa técnica faz com que as partículas que estavam suspensas na água sejam arrastadas com a adição de bolhas de ar e removidas na superfície posteriormente. Objetivo fundamental de uma coluna de flotação é separar de forma satisfatória as partículas hidrofóbicas presente na água de produção. A coluna de flotação tem a função principal de introduzir ar na polpa. Segundo o método de introdução de ar, as colunas de flotação podem ser classificadas como (AQUINO et al., 2004):

- Mecânicas: o ar é introduzido por agitação mecânica;
- Pneumáticas: o ar é introduzido na parte inferior e não existe agitação mecânica.

Especificamente nesse trabalho, a coluna de flotação utilizada foi do modelo pneumática com as seguintes medidas: diâmetro externo de 50 mm, diâmetro interno 48 mm e altura de 93 cm. Constituída de vidro borossilicato, transparente o que possibilita a visualização do diâmetro de bolhas de ar para cada filtro poroso utilizado, bem como, verificar a mudança de coloração da água produzida, em função da extração orgânica durante o experimento.

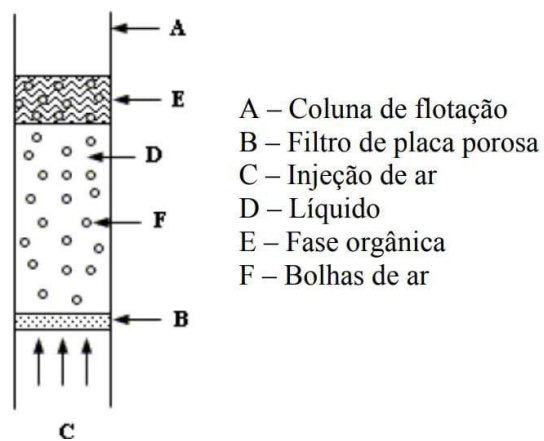
Há possibilidade de se variar a temperatura do sistema, pois o vidro borossilicato possui um coeficiente de dilatação menor que o do vidro comum, e, por isso, é menos maleável às variações de temperatura. Sua temperatura de fusão também é mais alta, fazendo dele menos vulnerável ao aquecimento. Essas características garantem mais resistência ao material, e segurança no manuseio em trabalhos desenvolvidos em laboratórios e indústrias químicas. As Figuras 4 e 5 apresentam a configuração experimental da coluna utilizada.

Figura 4. Configuração experimental



Fonte: Patrício (2006)

Figura 5. Partes da coluna de flotação.



Fonte: Patrício (2006)

3.2 Tensoativo

Tensoativo utilizado neste trabalho foi o OCS (óleo de coco saponificado) obtido a partir da saponificação de óleo de coco. O processo de síntese foi desenvolvido pelo Laboratório de Tecnologia de Tensoativos (LTT) da UFRN. O óleo de coco é constituído por uma mistura de triglicerídeos, onde predominam os ácidos láurico, mirístico, paumítico, esteárico e oléico, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Composição média do óleo de coco

Ácidos graxos	Número de carbono	Percentual (%)
Láurico	12	45,6
Esteárico	14	18
Paumítico	16	10,50
Mirístico	18	2,3
Ricinoleico	18	Traços
Oléico	18	7,5
Linoléico	18	Traços

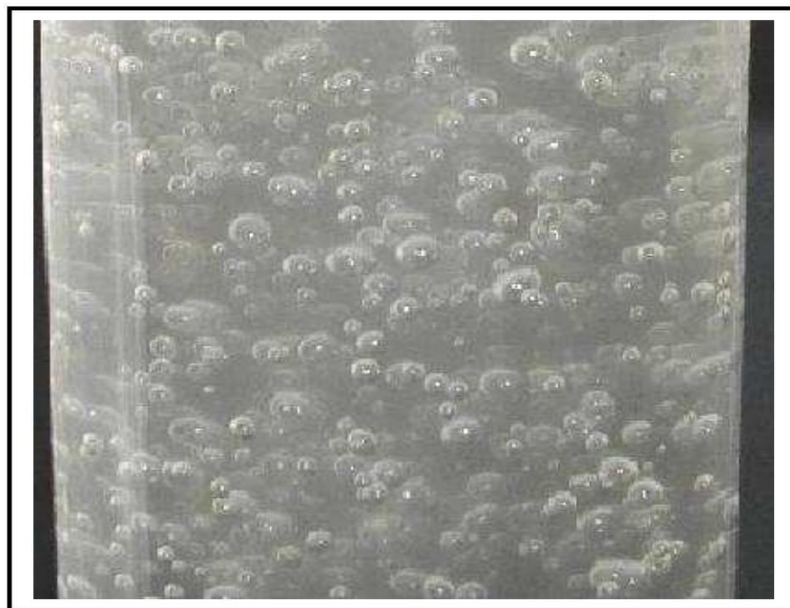
Fonte: Patrício (2006, p.4)

3.3 Determinação do diâmetro e número de bolhas

O papel das bolhas de ar é o de coletar e transportar as partículas suspensas até a superfície, onde há a formação da espuma, da qual se faz a separação das partículas. Por isso, é de extrema importância a utilização de sistemas de aeração que possibilitem o controle do tamanho e da uniformidade das bolhas, juntamente com a utilização de tensoativos, para que se possa ter uma melhor separação através da flotação (Penna et al., 2003).

Para calcular o diâmetro de bolhas foi utilizado uma câmara fotográfica de alta resolução para registrar as bolhas no momento que eram coletadas amostras para determinar a concentração do óleo em tempo t , possibilitando relacionar a eficiência do processo com o diâmetro das bolhas de ar (Patrício, 2006). É possível observar o registro das bolhas na Figura 6.

Figura 6. Foto do registro do diâmetro de bolhas.



Fonte: Patrício (2006, p.4)

O dimensionamento do diâmetro de bolhas de ar é feito utilizando-se um analisador de imagens digital (Nelson, 2000). Nesse experimento usou-se papel milimetrado ao lado das bolhas produzidas afim de relacionar o tamanho real das mesmas, o que possibilita facilidade na obtenção do diâmetro. Nos casos das bolhas adotou-se uma geometria esférica e para o papel milímetro uma geometria quadrada.

Baseado na hipótese do posicionamento aleatório da bolha no plano fotografico, esse diâmetro foi considerado uma esfera de mesmo volume. Um mínimo de 450 bolhas foram analisadas para essa condição, com intuito de garantir a significância estatística das distribuições de tamanho de bolhas (Patrício, 2006).

Para a determinação do número de bolhas dentro da coluna, mediu-se a expansão volumétrica em cada experimento, dividindo este valor, em seguida, pelo volume unitário das bolhas de ar, calculado pelas equações (1) e (2):

$$\text{Volume de bolhas} = \frac{\pi(Dbm)^3}{6} \quad (1)$$

$$\text{Numero de bolhas} = \frac{\text{expansao do volume}}{V_b} \quad (2)$$

3.4 Determinação do perfil de velocidade das bolhas de ar

Após determinação da velocidade de subida das bolhas, pode-se então determinar o perfil da velocidade ao longo da coluna, possibilitando a caracterização do regime de escoamento. A velocidade de subida das bolhas será estudada através da filmagem do processo e posterior captura de quadros de imagem levando-se em consideração os tempos de deslocamento, por meio de um software digital de imagens (Patrício, 2006).

3.5 Aerações do processo

De acordo com Luz, Sampaio e Almeida (2004), a vazão de ar é uma das variáveis mais importantes no controle do processo de flotação e tem um efeito significativo sobre a recuperação do material flotado. Dentro dos limites da estabilidade da coluna, a recuperação do material flotado é naturalmente crescente com o aumento da vazão de ar até atingir o seu valor máximo. Esse aumento da recuperação deve-se ao aumento do número e da área superficial total de bolhas introduzidas na coluna.

Para a determinação da vazão do gás, utilizou-se um mediador digital VARIAN com o ajuste para as vazões variando de 300 cm³ /min até 900 cm³/min. A vazão de gás apresenta influência direta na concentração das bolhas de ar e nas velocidades das mesmas, influenciando assim o perfil de escoamento (Patrício, 2006).

3.6 Coalescência de bolhas

O processo de coalescência ocorre quando gotas colidem e se fundem formando gotas maiores ou uma fase de óleo contínua, facilitando o processo de recuperação do óleo que antes encontrava-se disperso. A coalescência favorecida pela ação dos coletores, aumenta o tamanho das gotículas de óleo e o arraste, facilitando o processo de flotação (Nunes, 1993; Belhatche, 1995).

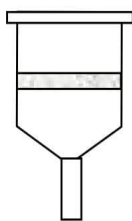
Segundo Finborud *et al.* (1999) os fatores que retardam ou previnem a coalescência são:

- Força de repulsão entre as gotas devido às cargas eletrostáticas;
- Estabilização por agentes químicos na superfície da gota;
- Estabilização causada por partículas finas adsorvidas na superfície da gota, entre outros fatores.

3.7 Filtros porosos

Os filtros porosos acoplados na base da coluna são responsáveis pela formação de micro bolhas no interior da coluna. Devido à eficiência do processo de separação do óleo emulsificado estar relacionada diretamente com os parâmetros hidrodinâmicos (Gu & Chiang, 1999), neste estudo serão avaliados três filtros com porosidades diferentes. O filtro poroso está representado na Figura 7. A injeção de ar na base da coluna percorre os filtros porosos gerando diâmetros de bolhas diferentes, que serão relacionados com eficiência de remoção de óleo. A seguir, tem-se a especificação dos filtros porosos que foram utilizados neste trabalho.

Figura 7. Filtro de placa porosa



Fonte: Lima (2009)

Na Tabela 2, Estão especificados os filtros com diferentes porosidades que promovem diferentes diâmetros de bolhas.

Tabela 2. Especificação dos filtros

Filtro (nº)	Malha	Diâmetro (mm)	Capacidade (mL)	Porosidade (m)
1	Media grossa	50	100	100 – 140
2	Media fina	50	100	40 – 100
3	Fina	50	100	16 – 40

Fonte: Patrício (2006, p.6)

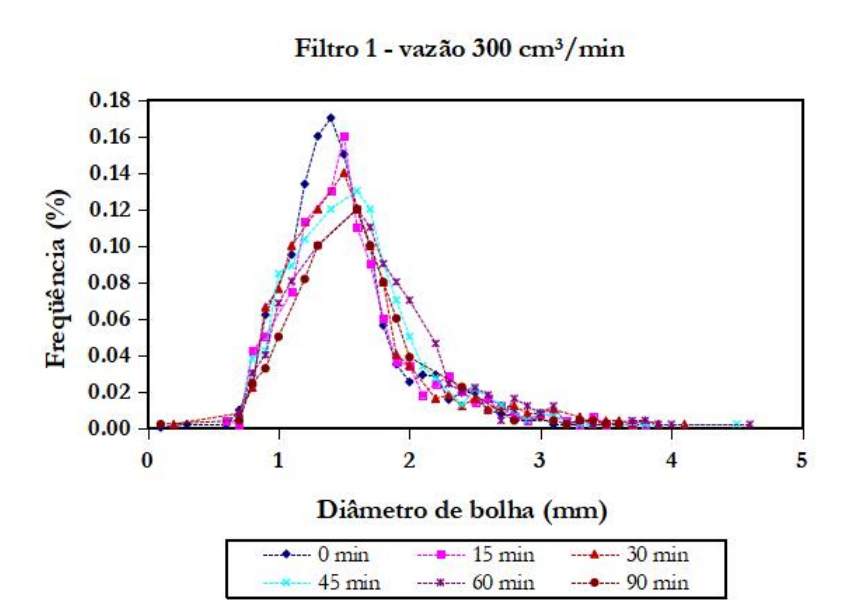
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Distribuição do tamanho de bolhas

De acordo com o estudo sobre a influência do diâmetro das bolhas de ar e vazão de borbulhamento na remoção de óleo no processo de flotação, observou-se que devido a não uniformidade da placa porosa dos filtros, há diferença significativa entre os diâmetros das bolhas da coluna de flotação. Em função disto, é importante avaliar a distribuição dos tamanhos de bolhas de ar dentro do sistema, para se entender como ocorre o mecanismo de remoção do óleo a partir do arraste pelas bolhas de ar (Ribeiro Jr e Lajes, 2004). As Figuras 8, 9, 10 e 11 (refere-se ao filtro-1), as Figuras 12, 13, 14 e 15 (refere-se ao filtro-2), as Figuras 16, 17, 18 e 19 (refere-se ao filtro-3) mostram a distribuição gaussiana para os diâmetros de bolhas em função do tempo de funcionamento da coluna e do tipo de filtro, respectivamente.

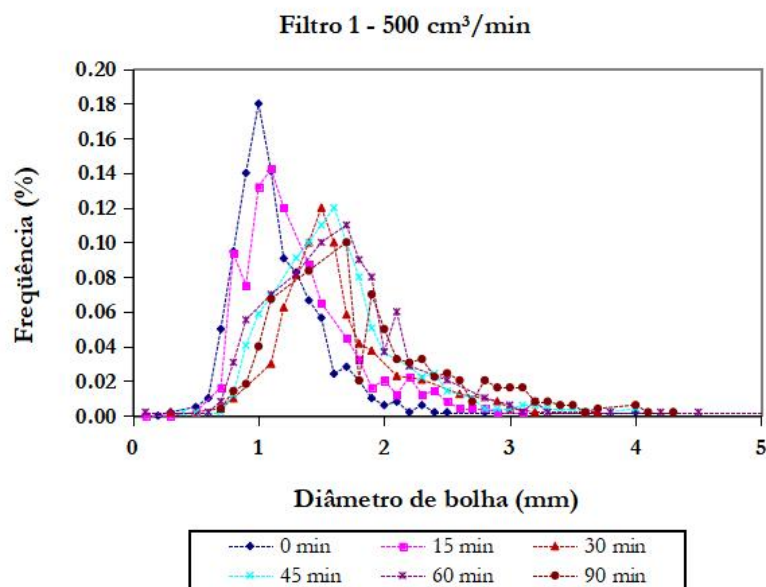
A coluna utilizada operou com quatro vazões de ar diferentes: 300, 500, 700 e 900 $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$ variando os filtros em cada experimento. A título de demonstração, os filtros 1, 2 e 3 caracterizados como diâmetros de maior, médio e menor porosidade, foram ilustrados com relação a variação em seus tamanhos de bolhas para as quatro vazões pré-determinadas. Os gráficos a seguir demonstrados nos permite visualizar melhor a não-uniformidade dos diâmetros das bolhas de ar formadas.

Distribuição do diâmetro das bolhas para filtro nº 1



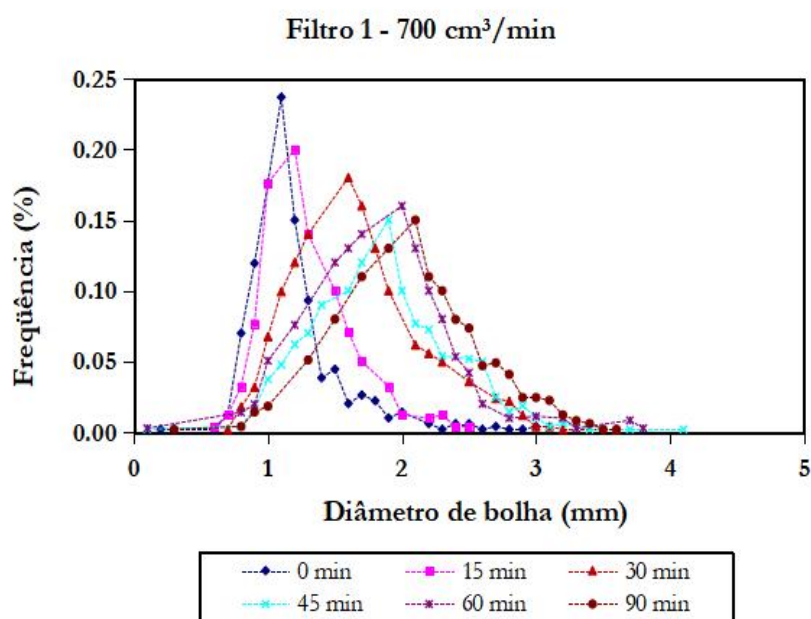
Fonte: Lima (2009)

Figura 8. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 1, vazão 300 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.



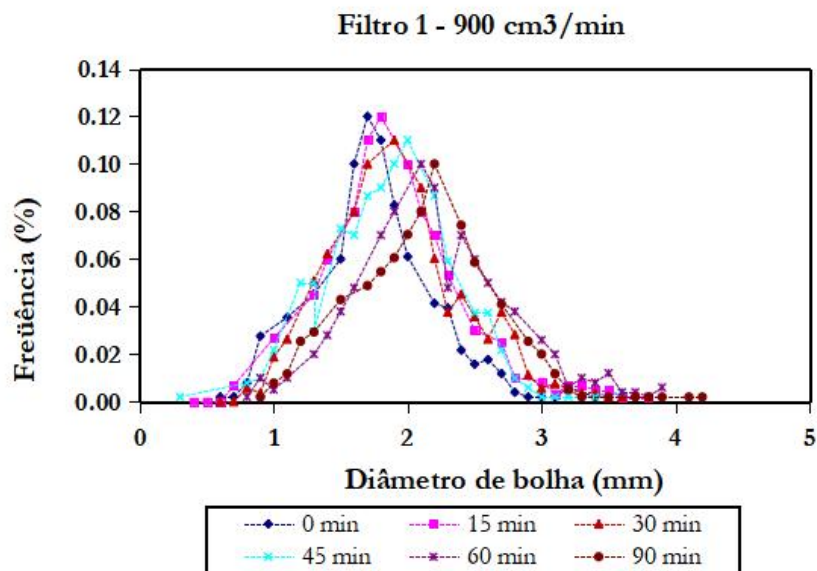
Fonte: Lima (2009)

Figura 9. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 1, vazão 500 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.



Fonte: Lima (2009)

Figura 10. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 1, vazão 700 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.

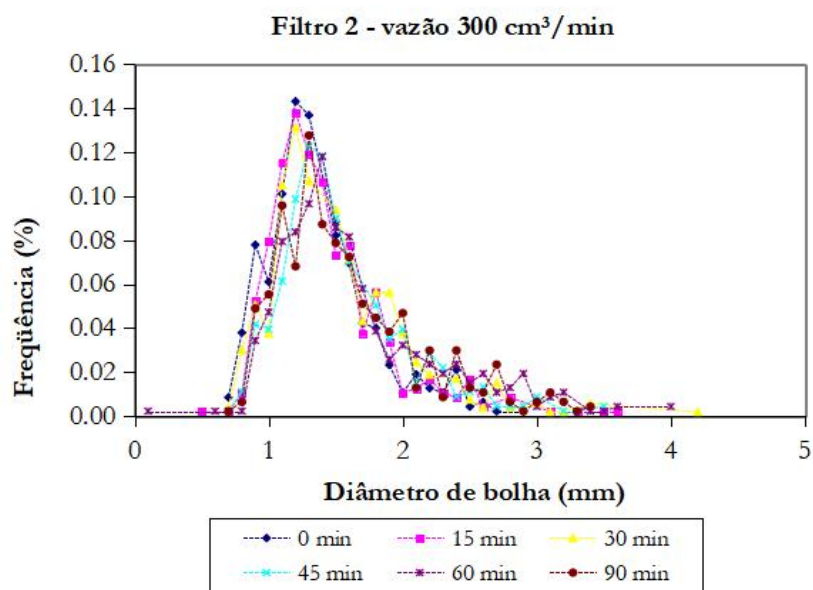


Fonte: Lima (2009)

Figura 11. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 1, vazão 900 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.

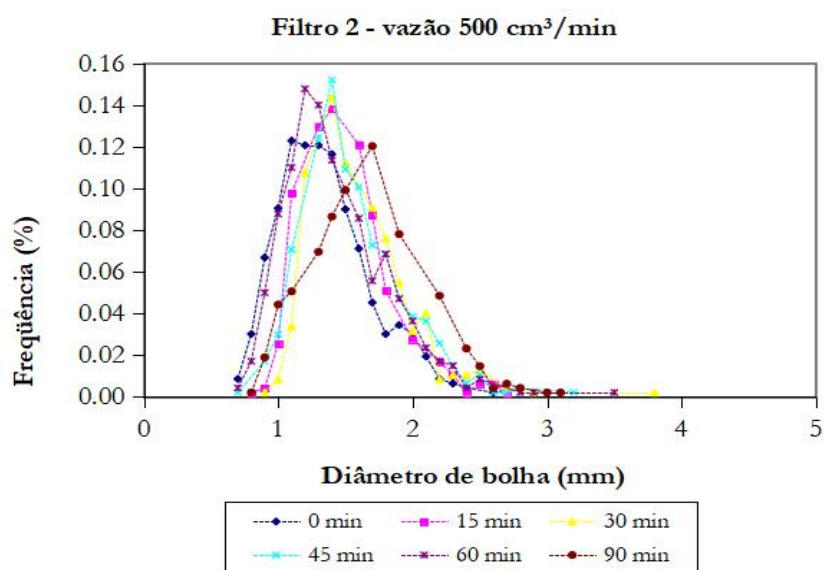
A distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 1 nas quatro vazões em que ocorrem, apresentaram pouca uniformidade no padrão de regularidade de bolhas produzidas se comparado aos demais filtros.

Distribuição do diâmetro das bolhas para filtro nº 2



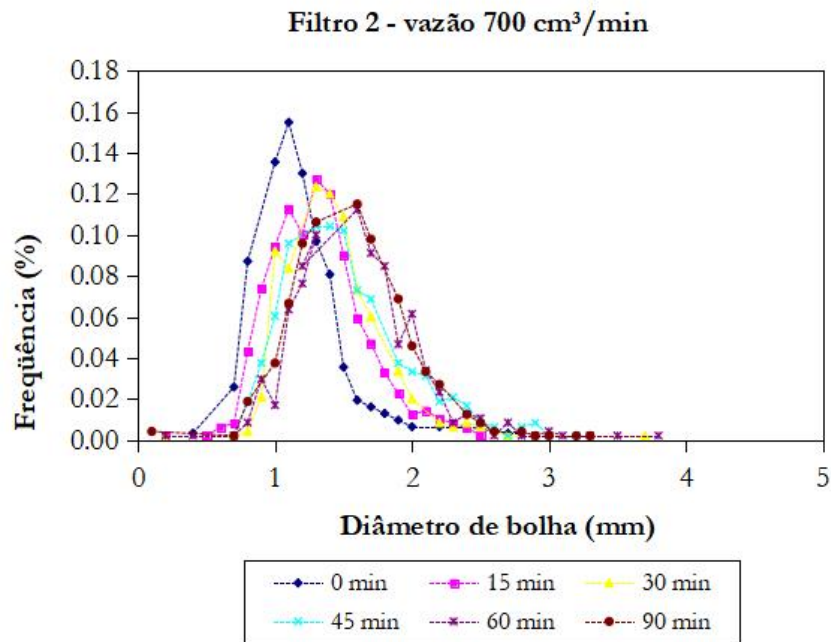
Fonte: Lima (2009)

Figura 12. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 2, vazão 300 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.



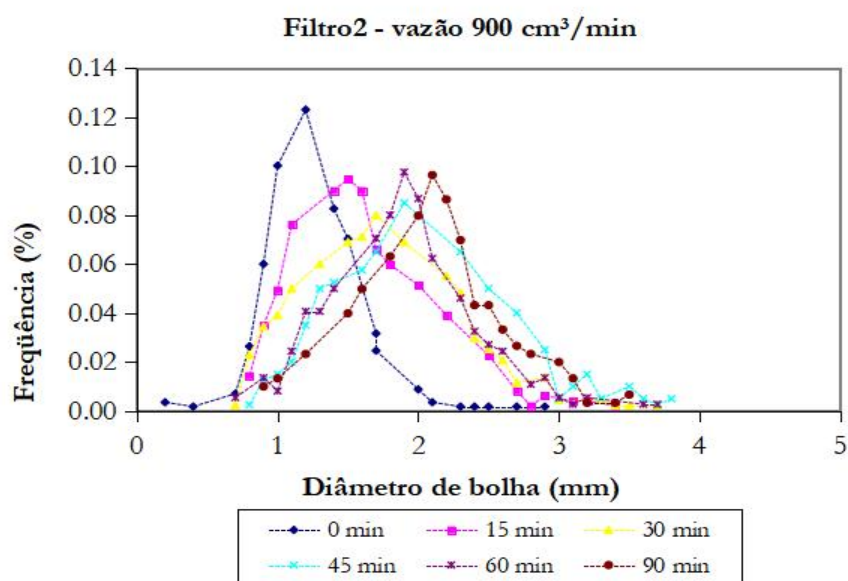
Fonte: Lima (2009)

Figura 13. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 2, vazão 500 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.



Fonte: Lima (2009)

Figura 14. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 2, vazão 700 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.

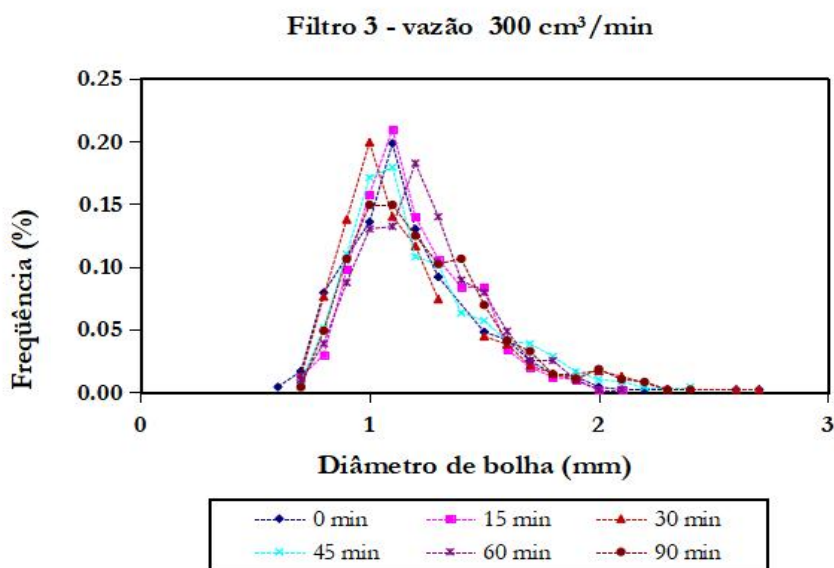


Fonte: Lima (2009)

Figura 15. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 2, vazão 900 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.

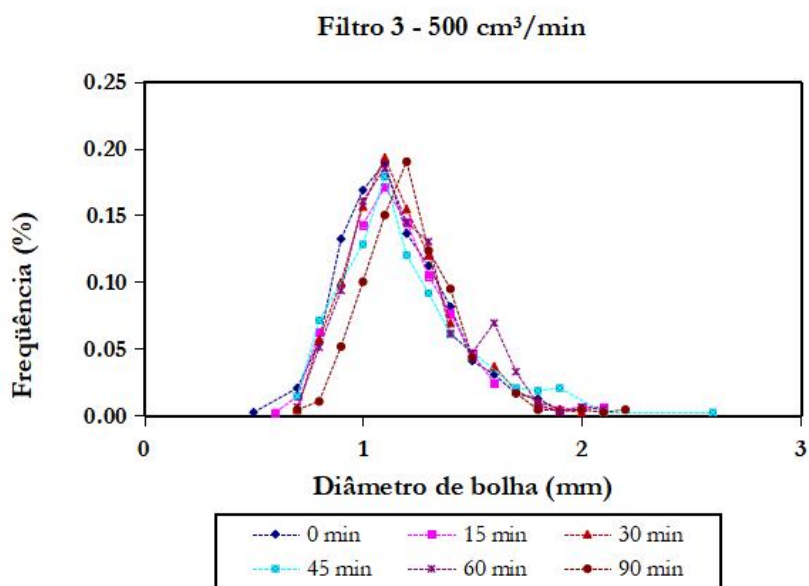
O filtro 2 apresenta maior regularidade no diâmetros das bolhas formadas para as mesmas vazões (300, 500, 700 e 900 cm³.min⁻¹) se comparado ao filtro 1, porém, apresenta menor eficiência no arraste das partículas oleosas se comparado ao filtro 3. A eficiência da remoção da fase orgânica está diretamente relacionado ao tamanho das bolhas formadas, sendo as menores mais eficazes, por possuírem maior área superficial total de contato bolha/partícula.

Distribuição do diâmetro das bolhas para filtro nº 3



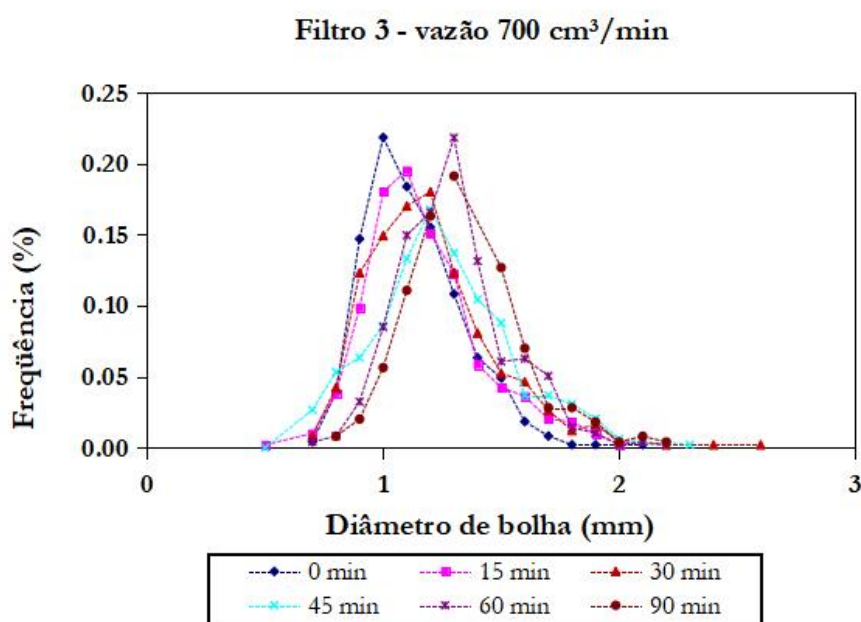
Fonte: Lima (2009)

Figura 16. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 3, vazão 300 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.



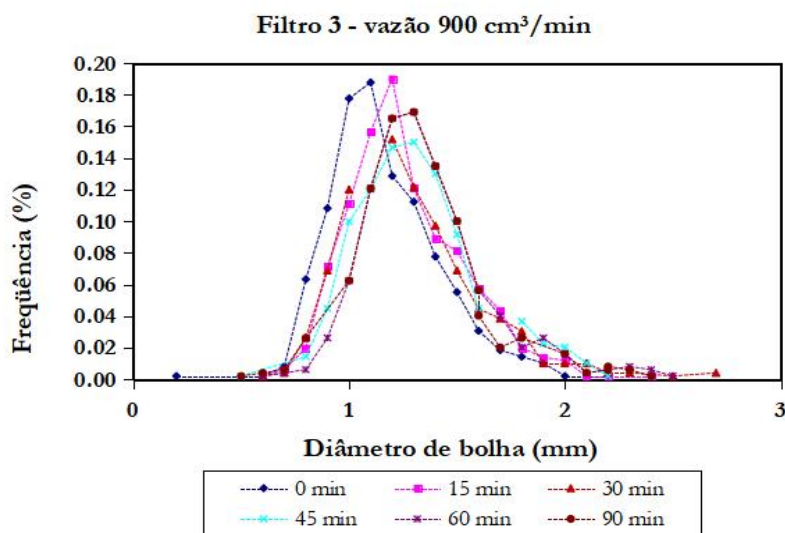
Fonte: Lima (2009)

Figura 17. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 3, vazão 500 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.



Fonte: Lima (2009)

Figura 18. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 3, vazão 700 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.



Fonte: Lima (2009)

Figura 19. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para o filtro 3, vazão 900 cm³.min⁻¹ e tempo total de operação de 90 minutos.

Comparando a distribuição dos diâmetros das bolhas nas quatro vazões e a frequência em que ocorrem, é possível verificar que para o filtro 1 e filtro 2 a não-uniformidade desses parâmetros se apresentaram mais acentuados ao serem comparados com o filtro 3. O filtro 3 foi o que alcançou a melhor performance com relação ao arraste da fase óleo durante os experimentos.

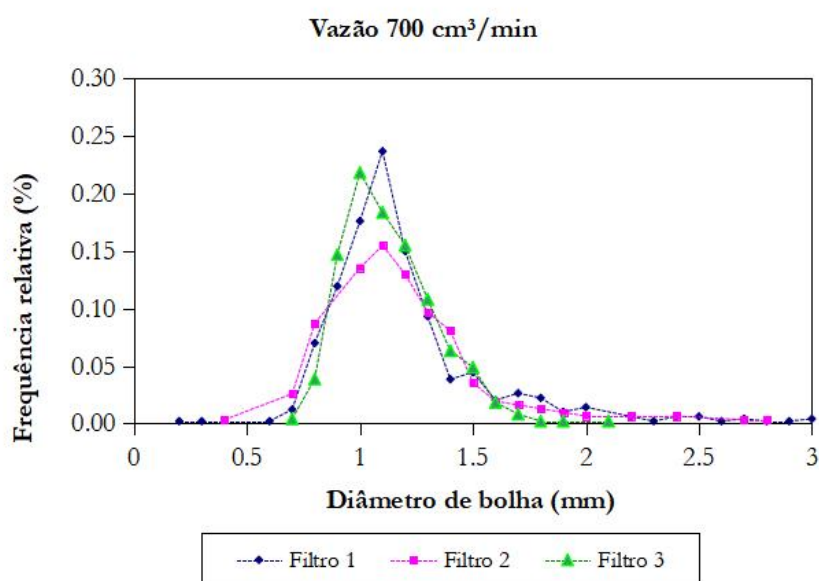


Figura 20. Distribuição do diâmetro das bolhas de ar para a melhor vazão de operação encontrada de 700 cm³.min⁻¹ em função dos filtros 1, 2 e 3.

Na Figura 20, é mostrado a distribuição de bolhas a 700 cm³.min⁻¹ para os filtros estudados (1, 2 e 3). Esta vazão representou a melhor vazão de operação encontrada, e melhor padrão de regularidade nos diâmetros de bolhas, tendo como maior frequência apresentada no filtro 3.

A partir dos dados de distribuição das bolhas de ar e a frequência (freq) com que ocorrem, pode-se calcular qualquer diâmetro de bolhas significativas usando a equação (3):

$$(d_{pq})^{p-q} = \frac{\sum_{i=1}^{NC} d_i^p \cdot (Freq.)_i}{\sum_{i=1}^{NC} d_i^q \cdot (Freq.)_i} \quad (3)$$

Nesse experimento, especificamente, utilizou-se três diâmetros de bolhas significativos, sendo eles: diâmetro numérico significativo (d_{10}), diâmetro volumétrico significativo (d_{30}) e o diâmetro de Sauter ou diâmetro médio (d_{32}), que representa a proporção entre o volume total de gás e a área interfacial em uma mistura bifásica.

De acordo com os resultados experimentais da Tabela 3, verifica-se que o diâmetro das bolhas aumenta com a vazão de ar. Isto acontece porque quanto maior é a vazão de ar, maior a turbulência na base da coluna, portanto, haverá uma maior dificuldade em se formar a bolha com menor diâmetro. A turbulência promove uma maior agitação e um aumento na coalescência, diminuindo o tempo de vida das bolhas de menor diâmetro. Pode-se verificar, ainda, que o aumento do número de bolhas dentro da coluna e, por conseguinte, da área superficial total, aumenta a eficiência do processo. Isto ocorre porque a remoção das gotículas de óleo dispersas na fase aquosa é feita pelo seu contato com as bolhas e ar. Além desses parâmetros, a porosidade do leito alcançada quando a coluna entra em regime permanente também interfere no processo, porque uma maior porosidade implica em um decréscimo da espessura do filme entre as bolhas de ar, aumentando a eficiência do processo. Desta forma, como a área superficial total e a porosidade equivalente da coluna aumentam com o aumento do número de bolhas, verifica-se que há aumento na eficiência do processo para os filtros 2 e 3 (Lima, 2009).

Tabela 3. Estimativa da eficiência do processo em função do diâmetro de bolhas.

Vazão de ar (cm ³)	Filtro	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₃₂ (mm)	Porosidade de leito	N _b (bolhas)	Ar (cm ²)	Eficiência Máxima (%)
300	1	1.6	1.8	2.1	0.017	5225	723.8	41.05
	2	1.4	1.5	1.7	0.016	9144	830.3	45.00
	3	1.2	1.2	1.3	0.018	23595	1252.8	51.47
500	1	1.5	1.7	2.0	0.021	7344	922.9	49.63
	2	1.5	1.7	1.9	0.034	14108	1600.0	55.50
	3	1.2	1.3	1.4	0.018	34005	2093.9	63.31
700	1	1.7	1.9	2.0	0.031	11232	1411.5	54.60
	2	1.8	1.9	2.0	0.053	19008	2388.6	67.87
	3	1.3	1.3	1.3	0.066	86518	4593.5	75.00
900	1	1.9	2.1	2.3	0.045	10510	1746.6	58.11
	2	1.8	1.9	2.0	0.060	21600	2714.4	68.75
	3	1.3	1.3	1.4	0.087	90682	5583.8	73.20

Fonte: Lima (2009, p.109)

D_{bm}- diâmetro médio de bolhas de ar; A_b – área superficial das bolhas de ar; N_b – número de bolhas de dentro da coluna; A_t - área superficial total (A_bxN_b)

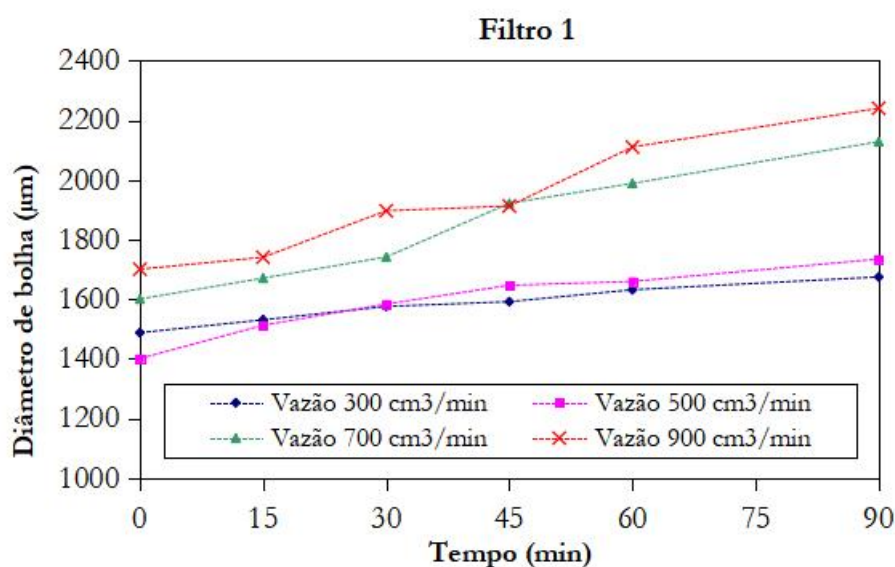
Afim de calcular a área superficial de uma única bolha, foi considerado que as bolhas apresentam uma geometria esférica ($A_B = \pi \times D_{BM}^2$). As eficiências máximas do processo foram estudadas em outra etapa do trabalho, dessa forma os resultados das estimativas das bolhas de ar estão relacionados com os dados obtidos experimentalmente.

4.2 Estudo da agregação eficiente das bolhas de ar na colisão

Coalescência é um fenômeno no qual ocorre a junção de duas ou mais bolhas de ar dispersas em um líquido, de modo que elas se fundem em menos bolhas, mas de maiores dimensões.

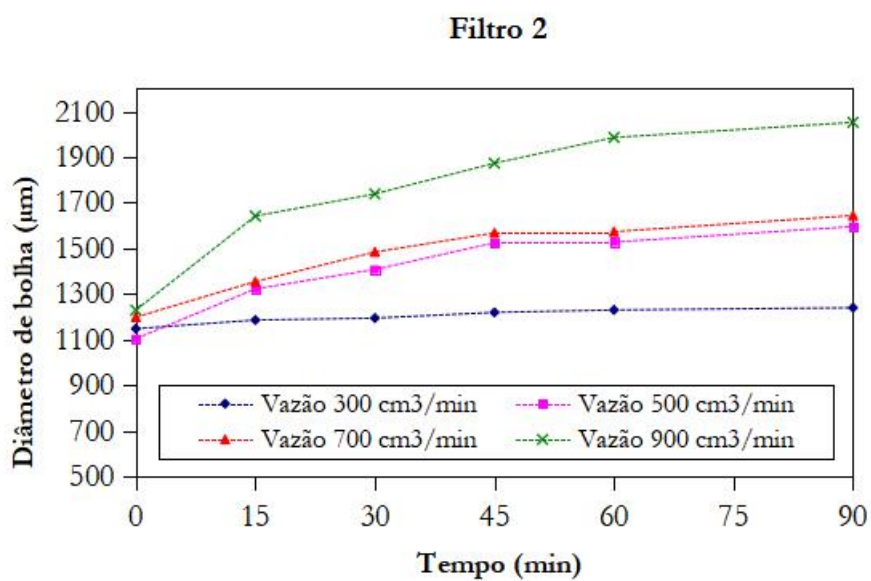
Os experimentos citados no item anterior foram realizados em três seções diferentes da coluna, desta forma, foi possível estudar a coalescência das bolhas de ar como sendo uma função também da vazão de borbulhamento, do diâmetro inicial das bolhas de ar e da tensão superficial água/ar.

A partir da obtenção das imagens do processo, foi possível fazer o acompanhamento dos diâmetros de bolhas envolvidas e observar o efeito da coalescência ocorrida no interior da coluna de flotação. Os diâmetros das bolhas obtidos na Tabela 3, foram plotados em função do tempo para os filtros 1, 2 e 3 e vazões de ar de 300, 500, 700 e 900 $\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$. Esse fenômeno da coalescência pode ser observado nas Figuras 21, 22 e 23 (Lima, 2009).



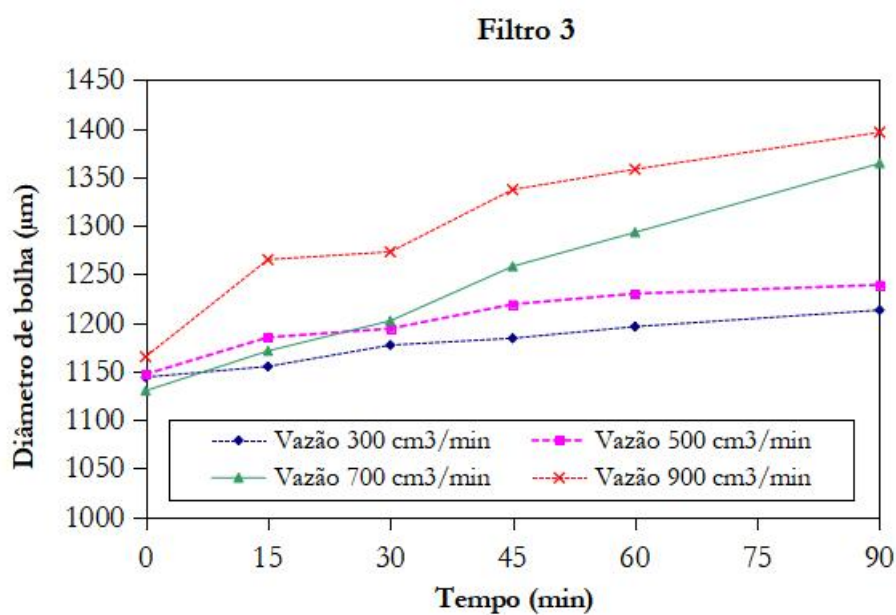
Fonte: Lima (2009)

Figura 21. Diâmetro de bolhas de ar em função do tempo para as vazões de 300, 500, 700 e 900 $\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ para o filtro nº 1.



Fonte: Lima (2009)

Figura 22. Diâmetro de bolhas de ar em função do tempo para as vazões de 300, 500, 700 e 900 $\text{cm}^3.\text{min}^{-1}$ para o filtro nº 2.



Fonte: Lima (2009)

Figura 23. Diâmetro de bolhas de ar em função do tempo para as vazões de 300, 500, 700 e 900 $\text{cm}^3.\text{min}^{-1}$ para o filtro nº 3.

Analisando as Figuras 21, 22 e 23, é possível observar que há um comportamento crescente do diâmetro das bolhas de ar em função do aumento das vazões para os três gráficos. O aumento do diâmetro em função da porosidade dos filtros, obedeceu a sequência 3, 2 e 1. Esse comportamento já era esperado, em virtude do filtro 1 formar bolhas de ar de tamanho maiores no interior da coluna (Lima, 2009). Na medida em que essas bolhas se deslocam, elas colidem com outras, aumentando de tamanho (coalescência) até alcançarem um máximo, que seria no topo coluna. Logo, podemos constatar que o diâmetro das bolhas na coluna aumenta com a remoção do óleo, este fato nos leva a concluir que a presença do óleo disperso na água inibe a coalescência entre as bolhas de ar.

5. CONCLUSÕES

Com base na teoria relatada neste trabalho sobre a flotação e nos resultados dos estudos adquiridos a partir de uma coluna em escala piloto: Pode-se observar que a eficiência do processo de flotação depende da influência de dois parâmetros hidrodinâmicos: a vazão de ar injetada no sistema e a distribuição do diâmetro de bolhas de ar. A vazão de ar é uma das variáveis mais importantes no controle do processo de flotação e tem um efeito significativo sobre a recuperação do material flotado. Esse aumento da recuperação deve-se ao aumento do número e da área superficial total de bolhas introduzidas na coluna. Entretanto, um acréscimo significativo da vazão de ar pode prejudicar o processo de flotação devido à turbulência ou formação de espuma na zona de recuperação da coluna. Já para o diâmetro de bolhas, quanto menor o tamanho das bolhas geradas, maior é a área interfacial de contato bolha-partícula e maior é a eficiência do processo. Entretanto, bolhas de tamanhos muito reduzidos apresentam uma velocidade de ascensão baixa, podendo ser inferior à velocidade descendente da polpa, acarretando, em consequência, perdas de partículas hidrofóbicas coletadas no fluxo de material não flotado. Nesse contexto, existe um tamanho médio ideal de bolhas, que poderá ser ajustado por meio de variáveis operacionais (vazão de ar, por exemplo) ou por meio da adição de soluções de tensoativos (AQUINO *et al.*, 2004). Desse modo, nesses dois casos, há um aumento da eficiência do processo devido a uma interação entre as bolhas de ar e as gotículas de óleo, o que facilita o araste, possibilitando uma melhor remoção da fase orgânica.

Já o tensoativo, devido a sua habilidade de estabilizar emulsões de óleo em água através da capacidade de diminuir a tensão superficial e adsorver fases dispersas, pode-se verificar que: Existe uma cooperação na remoção do óleo disperso favorecido pela movimentação das moléculas de tensoativo na interface das gotículas de óleo, favorecendo sua coalescência. Este fenômeno implicou em uma máxima eficiência para baixas concentrações de tensoativo. Observou-se também que a remoção é realizada pela cadeia hidrocarbônica (porção não-polar), fato que foi claramente evidenciado pelo estudo do efeito do óleo na área superficial da cabeça do tensoativo (porção polar), que permanece constante.

O processo de coalescência é de fundamental importância compreender, para entender como esse parâmetro varia em função da vazão de borbulhamento, dos filtros porosos, e da tensão superficial água/ar, por isso é de extrema importância ter noção de como se dá sua ocorrência. É possível constatar que a diminuição das concentrações de óleo e de tensoativo ao decorrer do processo, favorecem o fenômeno da agregação das bolhas de ar na colisão, proporcionando assim a formação de bolhas de ar com diâmetros maiores.

Baseado nos resultados hidrodinâmicos na coluna piloto de flotação, envolvendo o tensoativo OCS, foi possível observar que a captura de óleo é influenciada pelos diâmetros de bolhas gerados pelos filtros e suas vazões. A área superficial das bolhas de ar e sua densidade no interior da coluna, estão relacionadas diretamente com a eficiência do processo, ou seja, agregação eficiente (coalescência) das bolhas de ar. O diâmetro e o perfil de velocidade de bolhas na coluna, são parâmetro de alta relevância para a caracterização hidrodinâmica em um processo de flotação.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, J.A., Oliveira, M.L.M., Fernandes, M.D., Flotação em coluna. In: Tratamento de Minérios (Luz, A.B., Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M., Editores), CETEM/MCT, 4a. ed.; Rio de Janeiro; 2004.
- BELHATECHE, D. H. Choose appropriate wastewater treatment Technologies. Chemical Engineering Progress: vol 91, N°8, 32-51, 1995.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 393, de 08 de agosto de 2007. Considerando o art. 5º: O descarte de água produzida deverá obedecer a concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L – In: Resoluções, 2007. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br> > acesso em: 23, julho. 2023.
- CARNICEL, C. Preparação e caracterização de microemulsões contendo fluconazol. 66 f., Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Mato Grosso, Barra do Garças: Programa de Pós-graduação em Ciência de Materiais, 2014.
- FINBOROUD, A.; FAUCHER, M.; SELLMAN, E. New method for improving oil droplet growth for separation enhancement. Society of Petroleum Engineer, Huston, Texas, 1999.
- GU, X; CHIANG, S. H. A novel flotation column for oily water cleanup. Separation and Purification Technology, v.16, p.193-203, january,1999.
- LIMA, L. M. O. Utilização de uma coluna de flotação para remoção de compostos orgânicos da água de produção. 155 f., Dissertação (Mestrado), UFRN, Natal: DEQ/PPGEQ, 2009.
- LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de minérios. 4.ed.rev.amp. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 867p.
- NELSON, M. G.; LELINSK, D. Hydrodynamic design of self aerating flotation machines. Minerals Engineering, v. 13, p. 991-998, 2000.
- NUNES, J. A. Tratamento Físico-Químico de Efluentes Industriais, 5ªed., Aracaju: Gráfica e editora J. Andrade, 1993, p.277.

- PATRÍCIO, A. A. R. Estudo de parâmetros hidrodinâmicos de uma coluna de flotação utilizada para o tratamento de águas produzidas de petróleo. 30 p. Monografia (Graduação), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: DEQ/PRH 14-ANP, 2006.
- PENNA, R.; OLIVEIRA, M. L. M.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C. Estudo comparativo entre dois sistemas de aeração de coluna de flotação. Revista Escola de Minas, v. 56, n. 3, p.195-200, 2003.
- RIBEIRO JR, C. P.; LAGE, P. L. C. Experimental Study on bubble size distributions in a direct-contact evaporator, Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 21, p. 69-81, 2004.
- RODRIGUES, R. T. Desenvolvimento da técnica LTM-BSizer para a caracterização de bolhas e avaliação de parâmetros no processo de flotação. Dissertação de doutorado, UFRGS, Porto Alegre (RS), 2004.
- RUBIO, J., SOUZA, M. L. SMITH, RW Overview of flotation as a wastewater treatment technique. Minerals Engineering, v. 15, p. 139-155, december, 2002.
- SILVA, C. R. R. Água produzida na extração de petróleo. 27 p., Monografia (Especialização), Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador: DHS, 2000.