



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA



RUTH GERMAINE VRIJDAGS DACAL

**REMOÇÃO DE ÓLEO DA ÁGUA PRODUZIDA DE PETRÓLEO
UTILIZANDO LEITOS COALESCEDORES DE FIBRA DE COCO E DE
FIBRA SINTÉTICA**

Maceió
2017

RUTH GERMAINE VRIJDAGS DACAL

**REMOÇÃO DE ÓLEO DA ÁGUA PRODUZIDA DE PETRÓLEO
UTILIZANDO LEITOS COALESCEDORES DE FIBRA DE COCO E DE
FIBRA SINTÉTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João Inácio Soletti

Co-orientador: Prof. Dr. Lucas Meili

Maceió
2017

**Catálogo na fonte Universidade
Federal de Alagoas Biblioteca
Central**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

D117r Dacal, Ruth Germaine Vrijdags.
Remoção de óleo da água produzida de petróleo utilizando leitos coalescedores
de fibra de coco e de fibra sintética / Ruth Germaine Vrijdags Dacal. – 2019.
92 f. : il. color.

Orientador: João Inácio Soletti.
Co-orientador: Lucas Meili.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de
Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química. Maceió, 2017.

Bibliografia: f. 86-90.
Apêndice: f. 91.

1. Misturas com emulsão asfáltica. 2. Óleo. 3. Água - Poluição por petróleo. 4.
Emulsificantes. 5. Fibras vegetais. 6. Polipropilenos . I. Título.

CDU: 66.06:543.3

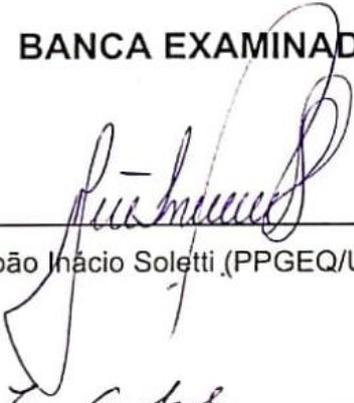
Ruth Germaine Vrijdags Dacal

**REMOÇÃO DE ÓLEO DA ÁGUA PRODUZIDA DE PETRÓLEO
UTILIZANDO LEITOS COALESCEDORES DE FIBRA DE COCO E
DE FIBRA SINTÉTICA**

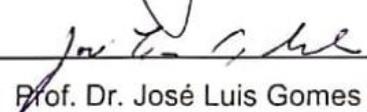
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Alagoas, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovada em: Maceió, 12 de maio de 2017.

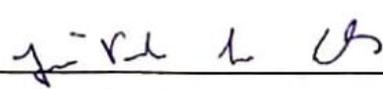
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. João Inácio Soletti (PPGEQ/UFAL – Orientador)



Prof. Dr. José Luis Gomes Marinho (PPGEQ/UFAL)



Prof. Dr. João Paulo Lima Santos (CTEC/UFAL – Membro Externo)

Dedico este trabalho aos meus pais, Antônio César e Ruth, ao meu irmão, Jozef, e a todos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades que me foram dadas, por ter me dado saúde e força para chegar até aqui.

Aos meus pais, Ruth e Antônio César, e ao meu irmão, Jozef, que estão sempre torcendo por mim e dando todo apoio em minhas decisões, pelos ensinamentos, amor e por serem tão presentes em minha vida.

Aos meus orientadores, Prof. João Inácio e Prof. Lucas Meili, pela orientação, dedicação, paciência, incentivo, ajuda e dicas durante toda a pesquisa. Pela motivação e confiança depositada em mim para realização deste trabalho.

Aos professores do mestrado por todo conhecimento compartilhado que contribuíram para minha formação.

Aos colegas de mestrado pelos estudos, companheirismo e por tudo que compartilhamos ao longo dessa jornada.

Aos colegas do Laboratório de Sistema de Separação e Otimização de Processos (LASSOP) pela convivência muito agradável, pelos bons momentos de descontração e pela troca de conhecimentos. Em especial, a Luana Calixto, Rodrigo Farias, Alson, Jaly, Claudemir, Danielle, Flávia Bartira e Luiz Neto que ajudaram diretamente nesse trabalho.

Aos técnicos do laboratório, Kleber Jean e Felipe Duarte, pela colaboração na execução do trabalho em toda a fase experimental.

Aos amigos e familiares pela torcida e incentivo.

Ao apoio financeiro da Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

RESUMO

Um grande problema na indústria petroquímica é o substancial volume de água produzida que é trazida a superfície durante as operações de produção do petróleo e gás. A água produzida possui uma composição complexa de compostos orgânicos e inorgânicos que varia de acordo com a localização, tempo de produção e profundidade. O tratamento da água produzida é um tema de grande importância devido à legislação e às preocupações ambientais. Órgãos fiscalizadores regulam o descarte deste efluente a partir do teor de óleos e graxas (TOG), onde um tratamento adequado deve ser feito para atender os limites das normas. Os coalescedores em leito podem ser uma opção interessante, já que conseguem separar minúsculas gotículas de óleo que estão dispersas. O objetivo do presente trabalho foi projetar e construir uma unidade experimental de um coalescedor de leito para o estudo do tratamento da água produzida sintética com fluxo na direção horizontal, em estado estacionário, variando parâmetros que afetam a eficiência como: velocidade do fluxo, comprimento do leito e material do leito. Os leitos coalescentes utilizados foram fibra sintética com mineral abrasivo e fibra de coco seco, nas velocidades de fluxo de 8,7; 12,3; 15,9 e 25,9 m/h, que corresponde as vazões de 60, 85, 110 e 180 L/h, e comprimentos de leito de 5, 10 e 15 cm. A porosidade foi mantida constante em 0,944 em todos os ensaios. A emulsão sintética para simular a água produzida foi preparada no laboratório utilizando água, petróleo e o emulsificante Lauril Sulfato de Sódio, com TOG de aproximadamente 400 ppm. Foram analisados o TOG na corrente de saída, a eficiência de separação e a queda de pressão. A eficiência de separação utilizando a fibra de coco variou de 40,3 a 96,7%, enquanto que a fibra sintética variou de 69,2 a 96,8%. No leito de fibra de coco foi possível identificar as velocidades críticas para cada comprimento de leito e o comprimento ótimo do leito foi de 10 cm. Na fibra sintética, dentro do intervalo dos parâmetros analisados, todos os ensaios realizados resultaram em eficiências próximas não foi possível determinar o comprimento ótimo. Os resultados obtidos demonstram que a utilização de leitos coalescentes com esses dois materiais pode ser uma alternativa para o tratamento da água produzida de petróleo para fins de descarte, reinjeção ou outros fins.

Palavras-chave: Coalescedor. Água produzida. Emulsão. Fibra de coco. Fibra sintética.

ABSTRACT

A major problem in the petrochemical industry is the substantial volume of produced water that is brought to the surface during oil and gas production operations. The water produced has a complex composition of organic and inorganic compounds that varies according to location, time of production and depth. The treatment of produced water is a subject of great importance due to legislation and environmental concerns. Inspection bodies regulate the disposal of this effluent from the content of oils and greases, where an appropriate treatment must be made to meet the limits of the norms. Bed coalescers can be an interesting option as they can separate tiny droplets of oil that are dispersed. The objective of the present work was to design and construct an experimental unit of a bed coalescer for the study of the treatment of synthetic produced water with steady state horizontal flow, varying parameters that affect efficiency such as: flow velocity, bed length and bed material. The coalescing beds used were synthetic fiber with abrasive mineral and dry coconut fiber, at flow rates of 8.7; 12.3; 15.9 and 25.9 m / h, corresponding to flow rates of 60, 85, 110 and 180 L / h, and bed lengths of 5, 10 and 15 cm. The porosity was kept constant at 0.944 in all assays. The synthetic emulsion to simulate the produced water was prepared in the laboratory using tap water, petroleum and the Sodium Lauryl Sulphate emulsifier with TOG of approximately 400 ppm. The effluent concentration, the separation efficiency and the pressure drop were analyzed. The separation efficiency using coconut fiber ranged from 40.3 to 96.7%, while the synthetic fiber ranged from 69.2 to 96.8%. In the coconut fiber bed it was possible to identify the critical velocities for each bed length and the optimal bed length was 10 cm. In the synthetic fiber, within the range of the analyzed parameters, all the tests performed resulted in near efficiencies, it was not possible to determine the optimum length. The results obtained demonstrate that the use of coalescing beds with these two materials can be an alternative for the treatment of the produced petroleum water for the purpose of disposal, reinjection or other purposes.

Keywords: Coalescer. Produced water. Emulsion. Coconut fiber. Synthetic fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Esquema da distribuição de fases em um reservatório de petróleo.	15
Figura 2– Esquema do processamento primário.....	17
Figura 3 – Esquema da injeção de água para recuperação secundária.....	25
Figura 4 – Representação dos processos de quebra de emulsões.	32
Figura 5 – (a) Coalescedor em leito; (b) destaque para a coalescência do óleo em leito fibroso.	33
Figura 6- Etapas da coalescência na superfície de uma fibra.	36
Figura 7 – (a) Efeito da variação da velocidade em óleos de diferentes viscosidades; (b) Dependência da concentração de óleo no efluente com relação a concentração de óleo no afluente para o coalescedor vertical (O4) e o coalescedor horizontal (H).	38
Figura 8 - Influência da velocidade em diferentes geometrias de coalescedores, $K_0 = 0,38 \times 10^{-9} \text{ m}^2$	39
Figura 9 - Efeito da velocidade superficial e da direção de fluxo (a) na eficiência de separação e (b) na queda de pressão.	40
Figura 10 – Influência da velocidade do fluido na concentração de óleos do efluente de saída.	43
Figura 11 - Diferentes comprimentos de leito e velocidades críticas.	47
Figura 12 - Efeito da velocidade superficial e comprimento do leito na eficiência de separação e fator de qualidade.	47
Figura 13 - Efeito do comprimento do leito na concentração de óleo do efluente de saída. ...	48
Figura 14 - Esquema da Unidade Experimental.	53
Figura 15 – Equipamento coalescedor em leito.....	54
Figura 16 - Projeto inicial do equipamento coalescedor.	55
Figura 17 - Fabricação da flange.	55
Figura 18 - Flanges.	56
Figura 19 - (a) Par de flanges unidas e (b) parafuso, aruelas e porcas.	56
Figura 20 - Preparo da emulsão.	57
Figura 21 - (a) Fibra de coco compactadas no cesto antes de ser saturado; (b) e após serem umedecidas no petróleo.	59
Figura 22 - Viscosímetro CT 52.	61
Figura 23 - (a) Fibras de coco e (b) fibras sintéticas com material abrasivo.	61
Figura 24 - Espectrofotômetro DR2700.....	63

Figura 25 - Extração do óleo utilizando o hexano.	63
Figura 26 - Curva de calibração para o solvente hexano + petróleo em $\lambda=400\text{nm}$	65
Figura 27 - Acúmulo de óleo antes do leito.	66
Figura 28 - Curvas de TG da fibra de coco.	68
Figura 29 - Curva de TG da fibra sintética.	68
Figura 30 - Gráfico da influência do comprimento do leito na eficiência do processo para a fibra de coco.	71
Figura 31 - Gráfico da influência do comprimento do leito na eficiência do processo para a fibra sintética.	72
Figura 32 - Gráfico da dependência da velocidade do fluxo na eficiência do processo para a fibra de coco.	74
Figura 33 - Gráfico da dependência da velocidade do fluxo na eficiência do processo para a fibra sintética.	76
Figura 34 - Gráfico da velocidade de fluxo versus a eficiência para a fibra de coco e a fibra sintética nos leitos de 5 e 10 cm.	77
Figura 35 - Gráfico da queda de pressão do leito de fibra de coco em diferentes velocidades de fluxo e diferentes comprimentos de leito.	79
Figura 36 - Gráfico da queda de pressão do leito de fibra sintética em diferentes velocidades de fluxo e diferentes comprimentos de leito.	79
Figura 37 - $\Delta P/\Delta P_0$ versus tempo para o leito de fibra de coco com 10 cm de comprimento..	80
Figura 38 - $\Delta P/\Delta P_0$ versus tempo para o leito de fibra sintética com 10 cm de comprimento.	81
Figura 39 - Proveta com emulsão para teste de coalescência.	82
Figura 40 - Decaimento do TOG com o tempo em uma coalescência natural.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- parâmetros da água produzida em campos de petróleo no mundo.....	22
Tabela 2- Limites adotados por diferentes países.....	26
Tabela 3 – Tempo necessário para observar a separação de fases de acordo com o tamanho das gotas.	29
Tabela 4 - Velocidades críticas médias para diferentes comprimentos de leito e concentrações de óleo na alimentação, em um leito de poliuretano.....	44
Tabela 5 - Leitura das absorvâncias das soluções padrões preparadas com hexano e petróleo.	64
Tabela 6 - Características do petróleo, da água da torneira e da emulsão.	67
Tabela 7 - Características das fibras de coco e da fibra sintética.	69
Tabela 8 - Características dos leitões de coco e de fibra sintética.....	69
Tabela 9 - Resultados da análise de EDX da Fibra Sintética.	70
Tabela 10 - Dados da coalescência natural da emulsão.	82

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Geral	14
2.2 Específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Produção de Petróleo	15
3.2 Processamento Primário do Petróleo	16
3.3 Água Produzida	17
3.3.1 ORIGEM DA ÁGUA PRODUZIDA.....	18
3.3.2 COMPOSIÇÃO	19
3.3.2.1 Óleos Dispersos (<i>hidrocarbonetos de petróleo</i>)	19
3.3.2.2 Compostos orgânicos dissolvidos	19
3.3.2.3 Compostos Químicos.....	20
3.3.2.4 Sólidos Dissolvidos (<i>Sais</i>).....	20
3.3.2.5 Metais	21
3.3.2.6 Radioisotopos.....	21
3.3.3 PRODUÇÃO.....	22
3.3.4 DESTINOS E LEGISLAÇÃO	23
3.3.4.1 Injeção	24
3.3.4.2 Descarte.....	26
3.4 Emulsões	28
3.5 Coalescedores de Leito	30
3.5.1 MECANISMO DE COALESCÊNCIA NO LEITO COALESCENTE	34
3.5.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA	36
3.5.2.1 Design do Coalescedor e Orientação do Fluxo.....	37
3.5.2.2 Velocidade do fluido.....	41

3.4.2.3 <i>Materiais do Leito</i>	44
3.4.2.4 <i>Comprimento do Leito</i>	46
4 METODOLOGIA	53
4.1 Unidade Experimental	53
4.2 Projeto e Construção do Coalescedor	54
4.3 Preparo da Emulsão	57
4.4 Condições e Operação do Coalescedor	58
4.5 Propriedades dos Fluidos	60
4.6 Propriedades das Fibras e do Leito	61
4.7 Análises de TOG	62
4.7.1 PROCEDIMENTO DE CONSTRUÇÃO DA CURVA PADRÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO	64
4.8 Eficiência de Remoção do Óleo	65
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1 Caracterização dos fluidos	67
5.2 Caracterização das fibras e do leite	67
5.3 Efeito do Comprimento do Leito	70
5.4 Efeito da Velocidade do Fluxo	73
5.5 Efeito do material	77
5.6 Efeito da Queda de Pressão	78
5.7 Acompanhamento da Coalescência Natural	81
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	84
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS	91

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é uma das principais fontes de energia do mundo e seus derivados são importantes matérias-primas para a produção de diversos materiais, tais como plásticos, tintas, asfalto, óleos lubrificantes, etc. Em 2016, a produção média mundial de petróleo foi de 15,44 milhões de m³ por dia, onde o Brasil, o 9º maior produtor de petróleo, produziu cerca 515,21 mil m³ por dia (EIA, 2017).

Nas atividades de exploração de petróleo e gás, há também a produção de água, considerada como subproduto e conhecida como água produzida. Trata-se da água que está presente naturalmente nas acumulações (água de formação) e a água injetada para recuperação secundária (DANDEKAR, 2013).

A composição da água produzida é complexa e suas características e volume variam dependendo do local, da idade geológica, profundidade e tempo de produção (LEE; NEFF, 2011). Estão presentes na água produzida: óleos dispersos, compostos orgânicos dissolvidos, compostos químicos, sólidos dissolvidos, metais e radioisótopos (IGUNNU; CHEN, 2014). Os principais destinos da água produzida é o descarte no mar ou a injeção nos reservatórios de petróleo como forma de recuperação secundária da produção (THOMAS, 2004).

A água produzida é um dos problemas associados à produção de petróleo e gás. Se não tratada adequadamente pode resultar em danos ao meio ambiente, como poluição da água e contaminação do solo. A produção excessiva de água produzida, seu tratamento e destino tornaram um dos maiores desafios na indústria de petróleo e gás (CERQUEIRA; REGINA; RUSSO, 2009).

A busca pela preservação ambiental e a escassez de água, além de rigorosas legislações sobre o descarte de água produzida no meio ambiente, tornaram a gestão da água produzida parte expressiva do setor de petróleo e gás (IGUNNU; CHEN, 2014).

No Brasil, o descarte da água produzida é regulamentado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e pelo estado ou município (GOMES, 2014). A Resolução CONAMA 393/2007 é específica para o descarte de água produzida no mar, e define que a concentração média mensal de óleos e graxas deve ser de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L (CONAMA, 2007). Para a injeção em poços produtores é recomendado que o TOG < 5 mg/L, para evitar o entupimento dos poros e a queda da produção (KUNERT *et al.*, 2007). O tratamento da água produzida tem como principal função a redução do teor de óleos e graxas (TOG), pela separação do óleo disperso na água, para atender as especificações exigidas.

Usualmente, tanques separadores gravitacionais, flotadores e hidrociclones são utilizados no tratamento da água produzida (BRASIL; ARAÚJO; SOUSA, 2012). Essas tecnologias nem sempre são eficientes, principalmente se o composto estiver sob forma de emulsão com gotas menores 10 µm de diâmetro (VEIL *et al.*, 2004). Os principais processos de quebra de uma emulsão é a floculação, coalescência, sedimentação ou flutuação (creaming), inversão de fase e Reprecipitação de Ostwald (TADROS, 2013).

Quando a coalescência natural de uma emulsão é lenta, coalescedores em leito podem ser utilizados para acelerar (PERRY; GREEN, 2007), promovendo a coalescência das gotas ao passar por um leito fibroso ou granular, que facilita a colisão entre gotículas, gerando gotas de maior tamanho, o que aumenta a velocidade de separação das fases (JAYA; KOLMETZ, 2012). Os leitos com fibras têm como vantagem a eficiente coalescência de pequenas gotículas (LI; GU, 2005). O mecanismo do processo de separação de uma emulsão por coalescência em meios fibrosos é complexo, não é totalmente compreendido e é baseado em hipóteses e testes experimentais (ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; SOKOLOVIĆ, D. S.; GOVEDARICA, D. D., 2015).

Alguns parâmetros podem influenciar na eficiência de separação em leitos coalescedores, tais como o material, a permeabilidade, o comprimento do leito, a velocidade do fluido, a orientação do fluxo e a concentração de alimentação (GOVEDARICA, D. *et al.*, 2015).

Este trabalho tem como objetivo o estudo da utilização de coalescedor de leito para a remoção do óleo presente na água produzida sintética de petróleo. A eficiência da separação, o TOG da corrente de saída e a queda de pressão foram avaliados alterando parâmetros como: comprimento do leito, material do leito e a velocidade do fluido.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização de leitos coalescedores (ou coalescedor de leito) para a separação do óleo no processo de tratamento da água produzida.

2.2 Específicos

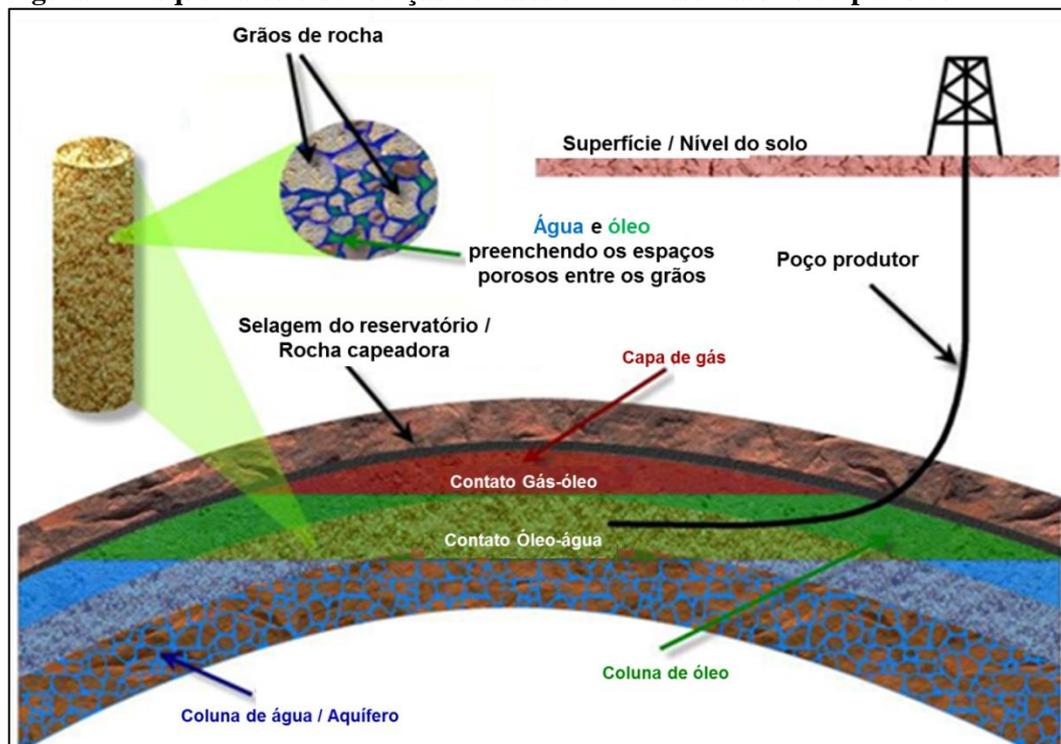
- Utilizar uma metodologia para preparar a emulsão de água produzida sintética que tenha características próximas do efluente real;
- Construir um equipamento coalescedor de leito;
- Analisar e discutir os efeitos dos parâmetros: material do leito, comprimento do leito e velocidade de escoamento;
- Acompanhar e estudar o diferencial de pressão do leito;
- Avaliar a eficiência operacional do coalescedor de leito em função dos parâmetros estudados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção de Petróleo

Naturalmente, as formações rochosas subterrâneas são permeadas por fluidos como petróleo, gás e água, ou a combinação destes, que se acumulam no volume poroso da rocha reservatório ou nos espaços intersticiais (AHMED, 2009). Dependendo das condições de pressão e do local em que se encontram, esses fluidos podem estar misturados ou distribuídos em camadas de acordo com a densidade e a imiscibilidade das fases (KUNERT *et al.*, 2007). Geralmente, apresenta-se com uma capa de gás na parte superior, uma de óleo intermediária, já que o óleo é mais denso que o gás e menos denso que a água, e ocupando a parte inferior do reservatório tem-se a água salgada (REYNOLDS; KIKER, 2003). A Figura 1 ilustra um reservatório com a distribuição descrita.

Figura 1– Esquema da distribuição de fases em um reservatório de petróleo.



Fonte: Mullins (2014).

Considerando a configuração e as condições de operação da extração, são comuns a produção de petróleo, gás e água, além da presença de sedimentos, como areia e outras impurezas sólidas em suspensão. A relação das medidas nas condições de superfície da vazão de água produzida e da vazão de óleo é chamada de razão água-óleo. Com a agitação e o

efeito da pressão durante as operações de produção formam-se emulsões, ou seja, gotículas de um líquido dispersas em outro (KUNERT *et al.*, 2007).

3.2 Processamento Primário do Petróleo

O processamento primário do petróleo refere-se à primeira etapa a qual os fluidos que saem do reservatório passam para que ocorra a separação das três fases (água, óleo e gás) (BRASIL; ARAÚJO; SOUSA, 2012).

A vazão dos fluidos é controlada por um conjunto de válvulas, conhecidas como árvore de natal, localizadas na cabeça do poço (THOMAS, 2004). Depois de passar pela árvore de natal, as correntes de diferentes poços são reunidas no equipamento conhecido como *manifold* de produção que regula a pressão para a entrada da instalação de processamento primário (KUNERT *et al.*, 2007; THOMAS, 2004).

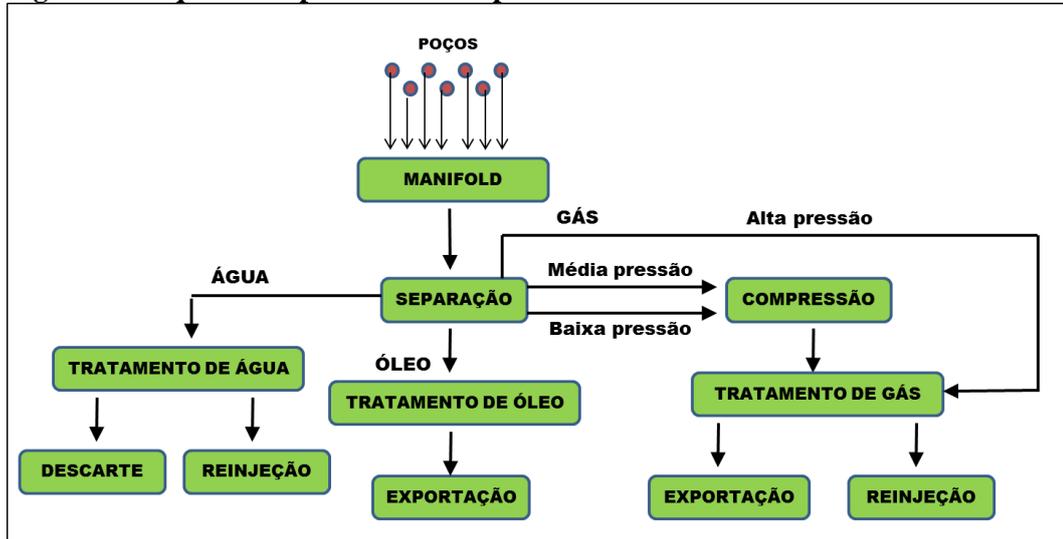
Segundo Brasil, Araújo e Sousa (2012), os objetivos do processamento primário de petróleo são:

- Separar o óleo, a água junto com as impurezas e o gás utilizando os separadores;
- Tratar a fase oleosa para retirar a água emulsionada, que deve conter menos de 1% em volume, e os sais dissolvidos na água deve ter um limite de 285 mg/L de óleo;
- Tratar a água produzida para atender a regulamentação local para descarte e não trazer problemas a produção quando usada na reinjeção;
- Tratar o gás para redução do teor de água e de contaminantes como gás sulfídrico (H₂S) e dióxido de carbono (CO₂), e condicionar na pressão adequada.

Os fluidos passam por separadores que podem ser bifásicos, quando separam a fase líquida e gasosa ou trifásica quando é feita a separação água livre, óleo e gás (THOMAS, 2004). Produtos químicos como desemulsificantes, antiespumantes e biocidas são adicionados nas linhas para auxiliar e melhorar a eficiência no processo de separação principalmente do óleo disperso na água produzida (LEE; NEFF, 2011). Quando se utiliza um sistema com separador bifásico, a mistura líquida de água e óleo que sai do separador deve ser enviada para outra instalação para que seja feita a separação da água e o seu devido tratamento, visando, principalmente, o descarte e/ou a reinjeção em poços de petróleo. O óleo é tratado e qualificado para a etapa do refino e o gás natural passa por processos de desidratação e dessulfurização antes de chegar a Unidade de Tratamento de Gás Natural (UPGN). No

entanto, o sistema mais comum nas unidades (plataformas) de grande capacidade de produção utiliza o separador trifásico (BRASIL; ARAÚJO; SOUSA, 2012). A Figura 2 apresenta um esquema simplificado do processamento primário de petróleo.

Figura 2– Esquema do processamento primário.



Fonte: adaptado de Brasil; Araújo; Sousa (2012).

3.3 Água Produzida

A água produzida é a água que está presente nos reservatórios de petróleo e que é trazida a superfície, como um subproduto, junto com o óleo e o gás (VEIL *et al.*, 2004). É a água que existe nas formações rochosas do subsolo mais a água que foi injetada, que pode conter produtos químicos, como forma de recuperação secundária (LEE; NEFF, 2011). Composta por uma mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos, onde a composição, características e o volume diferem dependendo do tipo e da localização do reservatório de petróleo (IGUNNU; CHEN, 2014).

Nas operações de produção e recuperação de petróleo e gás, a água produzida representa o maior volume de resíduos, principalmente nas plataformas offshore (IGUNNU; CHEN, 2014; LEE; NEFF, 2011), correspondendo a cerca de 98% de todos os efluentes gerados (KUNERT *et al.*, 2007). Ela está presente ao longo da vida produtiva de um poço, e seu volume tende a aumentar com a idade produtiva, que é quando aumenta também a produção de hidrocarbonetos pesados (KUNERT *et al.*, 2007).

As águas produzidas provenientes de reservatórios de gás e condensados são cerca de 10 vezes mais tóxicas do que as descarregadas de reservatórios de óleo, entretanto, o volume

de água nas operações de produção de gás são baixos, dessa forma o impacto total pode ser inferior (DURASAMY; BENI; HENNI, 2013).

A separação, tratamento e destinação da água produzida tem um custo considerável envolvido, gerando um encargo financeiro nas operações. Além disso, a água produzida não tratada corretamente pode reduzir diretamente a produção de hidrocarbonetos, reduzindo a recuperação final ou aumentando os custos.

“Muitas empresas não reconhecem ou contabilizam o custo total da gestão da água. Consequentemente, o impacto da água é subestimada e oportunidades para implementar estratégias e melhorar a eficiência são ignoradas. Os custos e impactos impõem um enorme fardo ao retorno final da indústria sobre o investimento e redução de reservas economicamente recuperáveis.” (REYNOLDS; KIKER, 2003).

A gestão da água produzida se tornou uma parcela significativa no setor de petróleo e gás, em decorrência, principalmente, da crise hídrica e do aumento das preocupações ambientais, além de uma rigorosa legislação sobre o descarte de água produzida no meio ambiente (IGUNNU; CHEN, 2014).

3.3.1 ORIGEM DA ÁGUA PRODUZIDA

A água produzida pode ter até três origens: a água de formação do poço produtor, a água injetada para aumentar a recuperação do óleo ou água condensada no caso de alguma produção de gás (THOMAS, 2004).

A água de formação (ou água conata) é água doce ou do mar que foi aprisionada nos poros das rochas sedimentares durante o processo de formação destas, podendo formar extensos aquíferos subjacente ou adjacente aos hidrocarbonetos, ou existir nos reservatórios de hidrocarbonetos como a água conata ou água intersticial (DANDEKAR, 2013).

Água de injeção, geralmente, contem produtos químicos que foram adicionados para aumentar as taxas de recuperação e a segurança das operações (KUNERT *et al.*, 2007). Geralmente, trata-se da água de formação que foi retirada do reservatório durante as operações de produção, tratada e reinjetada no reservatório através dos poços injetores.

3.3.2 COMPOSIÇÃO

A água produzida possui composição complexa que varia para cada reservatório. Fatores como a idade geológica, a profundidade e dos elementos químicos presentes nas rochas de formação dos hidrocarbonetos, assim como a composição das fases de óleo e de gás no reservatório, e produtos químicos adicionados durante a produção influenciam em diferentes propriedades físicas e químicas (LEE; NEFF, 2011).

Na água produzida podem ser encontrados compostos, nas formas dissolvidas ou dispersas, das formações rochosas e dos caminhos de migração no qual a água esteve em contato durante milhões de anos (LEE; NEFF, 2011) É composta por componentes orgânicos e inorgânicos, incluindo óleos dissolvidos e dispersos, metais, sais, produtos químicos utilizados no tratamento da água de injeção e nos processos de produção, sólidos, ácidos orgânicos, microrganismos, radioisótopos (IGUNNU; CHEN, 2014). Essas características faz da água produzida um poluente danoso, principalmente quando se leva em conta o expressivo volume que é descartado.

3.3.2.1 Óleos Dispersos (*hidrocarbonetos de petróleo*)

Os óleos criam efeitos tóxicos para o ambiente marinho que está próximo aos pontos de descarga e contribuem significativamente para o aumento da Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) (DURASAMY; BENI; HENNI, 2013). Os hidrocarbonetos em maiores volumes na composição da água produzida são os hidrocarbonetos aromáticos de um anel, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), além dos hidrocarbonetos saturados de baixo peso molecular que, por possuírem baixa solubilidade, estão presentes em baixas concentrações (LEE; NEFF, 2011).

Os óleos costumam estar dispersos na água produzida em gotículas de tamanho médio entre 2-30 μm (DURASAMY; BENI; HENNI, 2013). A concentração das gotículas de óleo dispersas na água produzida é relacionada à densidade do óleo, tensão interfacial entre as fases de óleo e água, o tipo e a eficiência do tratamento químico, e o tipo, o tamanho e a eficiência do equipamento de separação física (VEIL *et al.*, 2004).

3.3.2.2 *Compostos orgânicos dissolvidos*

Os compostos orgânicos que podem ser encontrados dissolvidos na água produzida são os ácidos orgânicos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, fenóis e hidrocarbonetos voláteis (VEIL *et al.*, 2004). Esses ácidos orgânicos são de baixo peso molecular, onde os ácidos fórmico e acético estão presentes em maiores concentrações, outros ácidos como o propanóico, o butanóico, o pentanóico e o hexanóico também são encontrados na composição da água produzida (LEE; NEFF, 2011).

Os compostos orgânicos dissolvidos apresentam maiores concentrações em reservatórios de gás do que nos de óleo (DURASAMY; BENI; HENNI, 2013). Os compostos mais relevantes são os ácidos naftênicos que, devido a sua acidez, provocam corrosão de tubos de produção e toxicidade, além de serem persistentes no meio marinho (LEE; NEFF, 2011). Compostos orgânicos solúveis não são facilmente removidos da água produzida e, com isso, são normalmente descartados no oceano ou injetados junto com a água produzida, estes não podem ser medidos pelos métodos analíticos de óleo e graxas (VEIL *et al.*, 2004) e são aproximados pelo valor do teor de carbono orgânico total (COT) (LEE; NEFF, 2011).

3.3.2.3 Compostos Químicos

Os compostos químicos presentes na água produzida são os desemulsificantes, biocidas, inibidores de corrosão e de formação de hidratos que são adicionados durante os processos de produção de petróleo e gás para auxiliar o tratamento e prevenir problemas operacionais (FAKHRU'L-RAZI *et al.*, 2009). Eles podem estar presentes como compostos puros ou contendo os componentes ativos dissolvidos em um solvente (IGUNNU; CHEN, 2014). Alguns produtos químicos são altamente tóxicos, como os inibidores de corrosão e os biocidas, e podem apresentar maiores concentrações, se houver nos sistemas de produção esses problemas (LEE; NEFF, 2011). Dependendo do composto, este pode ser mais solúvel em óleo do que em água (LEE; NEFF, 2011).

3.3.2.4 Sólidos Dissolvidos (Sais)

Os sólidos dissolvidos são definidos em termos de íons (cátions e ânions), onde o mais abundante em todas as águas produzidas é o cloreto de sódio ou íons de sódio e cloreto (DANDEKAR, 2013). Além desses, outros íons inorgânicos como cálcio, magnésio, potássio, sulfato, brometo, bicarbonato e iodeto estão presentes na água produzida (LEE; NEFF, 2011).

O teor de sólidos pode ser expresso como salinidade, condutividade ou sólidos dissolvidos totais (SDT).

Apesar de conter os mesmos sais que a água do mar, a maior parte das águas produzidas possuem concentrações diferentes da água do mar, sendo dessa forma mais densa e alterando as características do ambiente, o que contribui para a toxicidade aquática (LEE; NEFF, 2011). Água do mar, normalmente, possui concentração de 35.000 ppm (3,5% em massa) de sólidos totais, enquanto que a água produzida é maior que 300.000 ppm (30% em massa) (DANDEKAR, 2013).

3.3.2.5 *Metais*

Os metais como zinco, chumbo, manganês, ferro, bário e mercúrio são normalmente encontrados na composição da água produzida em altas concentrações (DURASAMY; BENI; HENNI, 2013; LEE; NEFF, 2011). Eles são menos tóxicos que os compostos orgânicos, mas precipitam e formam sólidos indesejáveis que dificultam o processo de tratamento (DURASAMY; BENI; HENNI, 2013).

Os metais bário, ferro, manganês, mercúrio e zinco podem estar contidos na água produzida em concentrações de até 1.000 vezes mais elevada em relação os metais presentes na água do mar limpa. Parte dos compostos de zinco e de chumbo são das estruturas de aço galvanizado nas etapas de produção e tratamento que a água produzida teve contato (LEE; NEFF, 2011).

Na superfície, os metais ferro e manganês costumam precipitar como oxihidróxidos de ferro e manganês, e outros metais co-precipitam com ferro e manganês (LEE; NEFF, 2011). Muitos desses metais podem ser removidos por decantadores e filtros (REYNOLDS; KIKER, 2003).

3.3.2.6 *Radioisotopos*

Os principais materiais radioativos naturais que podem estar presentes na água produzida são o radio-226 (^{226}Ra) e radio-228 (^{228}Ra). Outros radionuclídeos podem estar presentes em baixa atividade. O ^{210}Pb é um outro radioisotopo que pode estar presente em maior atividade que o ^{226}Ra e o ^{228}Ra (LEE; NEFF, 2011).

A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros da água produzida em campos de petróleo no mundo.

Tabela 1- parâmetros da água produzida em campos de petróleo no mundo.

Parâmetros	Valores	Metais Pesados	Valores (mg/L)
Densidade (Kg/m ³)	1.014-1.140	Cálcio	13-25.800
Tensão Superficial (dinas/cm)	43-78	Sódio	132 – 97.000
COT (mg/L)	0-1.500	Potássio	24 – 4.300
DQO (mg/L)	1.220	Magnésio	8 – 6.000
Sólidos suspensos totais (mg/L)	1,2-10.000	Ferro	< 0,1 – 100
pH	4,3-10	Alumínio	310 – 410
Óleo total (IR: mg/L)	2-565	Boro	5 – 95
Voláteis (BTX; mg/L)	0,39-35	Bário	1,3 – 650
(Óleos e Graxas não-voláteis totais por CLG/EM) base (µg/L)	275	Cromo	0,02 – 1,1
Cloretos (mg/L)	80-200.000	Cobre	< 0,002 – 1,5
Bicarbonatos (mg/L)	77 – 3.990	Lítio	3 – 50
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	10 – 300	Manganês	< 0,004 – 175
Sulfetos (mg/L)	10	Chumbo	0,002 – 8,8
Fenóis (mg/L)	0,009 – 23	Zinco	< 0,01 – 35
Ácidos graxos voláteis (mg/L)	2 – 4900	Arsênio	<0,005 – 0,3
		Mercúrio	<0,001 – 002
		Prata	<0,001 – 0,15

Fonte: Tibbetts *et al.* (1992)

3.3.3 PRODUÇÃO

No início da vida produtiva de um reservatório, a fração de água no petróleo produzido é quase nula e essa fração aumenta com os anos de produção contínua, geralmente, chega a passar dos 50% e pode se aproximar de 100% à medida que o poço chega ao fim de sua vida produtiva (THOMAS, 2004). Quando um campo apresenta uma razão de água muito elevada, o campo é denominado como maduro, essa fração é determinada pelo ensaio de BS&W (Basic Water and Sediment) que, além da água produzida, determina também o teor de sedimentos sobre a produção total (KUNERT *et al.*, 2007).

Segundo Igunnu e Chen (2014), são produzidos aproximadamente 250 milhões de barris de água por dia, ou seja, 39,75 bilhões de litros por dia nos campos de petróleo e gás do mundo, onde mais de 40% dessa água é descartada no meio ambiente.

Com base nas fontes de dados de Exploração e Produção da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no Brasil, de janeiro de 2015 a março de 2016, foram produzidos cerca 43,5 milhões de barris de água, ou seja, cerca de 273 bilhões de litros de água somando-se a produção dos 338 campos de petróleo e gás (ANP, 2016).

3.3.4 DESTINOS E LEGISLAÇÃO

As possíveis opções de destinos da água produzida, segundo Arthur, Langhus e Patel (2005), são: disposição no solo, disposição em rios, irrigação, descarte no mar, descarte no subsolo e água de injeção.

1. Injeção de água produzida – injetar a água produzida na mesma formação ou em outra formação adequada, o que envolve o transporte de água produzida do poço produtor até ao local de injeção. Pode ser necessário o tratamento da água de injeção para reduzir incrustações e agentes corrosivos, além das bactérias. A água é inserida volta ao subsolo.
2. Descarte de água produzida - a água produzida é tratada para atender aos regulamentos de descarte no mar ou na terra. Em alguns casos, o tratamento da água produzida pode não ser necessário.
3. Reutilizar em operações de petróleo e gás - a água produzida é tratada para atender a qualidade exigida para usá-lo para a perfuração, estimulação e operações de condicionamento.
4. Consumir em uso benéfico - Em alguns casos, o tratamento significativo de água produzida é necessário para atender a qualidade exigida para usos benéficos, como a irrigação, recuperação de pastagens, gado e consumo animal, e água potável para uso privado ou em sistemas públicos de água.

Segundo Duraisamy, Beni e Henni (2013), a gestão da água produzida com os custos relacionados ao tratamento adequado para cada aplicação pode ser apresentada da seguinte forma:

- a. Injeção em poços de petróleo: A água produzida é injetada no mesmo poço de petróleo, de onde é obtido ou transportado para o poço de descarga em outro local. O custo varia de US\$ 0,70 a US\$ 4,00.
- b. A descarga direta: A água produzida é diretamente descarregada de acordo com as normas regulamentares. O custo varia de US \$ 0,03 a US \$ 0,05.
- c. Reutilizar na operação de petróleo e gás: A água produzida pode ser tratada e utilizada nas indústrias de petróleo e processamento de gás. O custo varia de US\$ 0,04 a US\$ 0,07.
- d. Consumidos em uso benéfico: Tratar a água produzida para convertê-la em um ativo. O custo varia de US\$ 0,25 a US\$ 2,00.

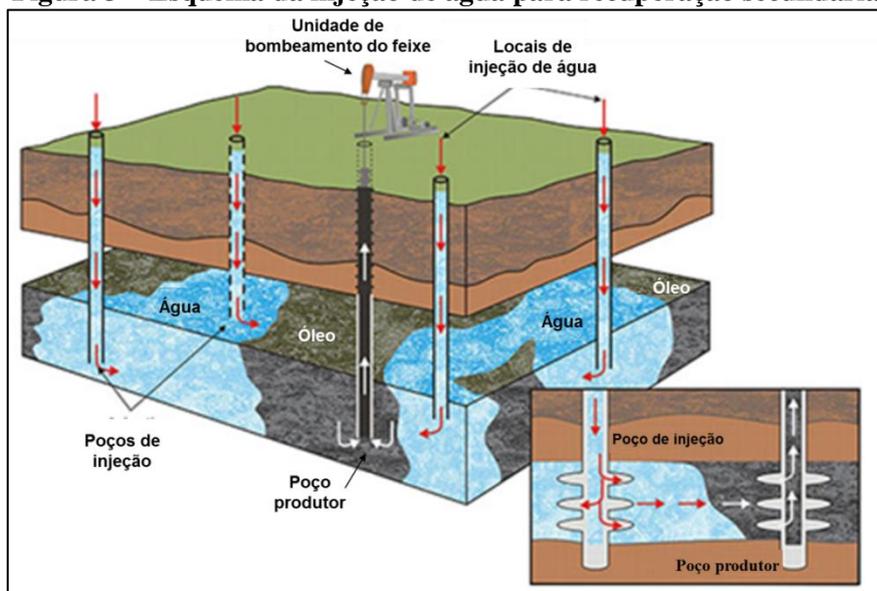
O destino final da água produzida deve ser realizado próximo possível da área de produção, dessa forma evita problemas no transporte e armazenamento, além de ser mais econômico em termos de energia (THOMAS, 2004). Dos destinos citados, os mais comuns são a injeção e o descarte no mar.

3.3.4.1 Injeção

À medida que o petróleo é produzido a energia natural do reservatório vai diminuindo até que a pressão do poço torna-se insuficiente para expulsar naturalmente o petróleo que é necessário se utilizar de métodos de recuperação para aumentar a produção e manter a pressão do reservatório (CORRÊA, 2003). O objetivo da injeção de água é repressurizar o reservatório, com a água ocupando o volume poroso vazio deixado pelo óleo produzido, e aumentar a recuperação de óleo com deslocamento deste para fora dos poros da rocha pela água injetada, otimizando a produção (CORRÊA, 2003). A injeção da água produzida é realizada utilizando poços de injeção, com isso a água desloca o petróleo, pelo processo de varredura, para os poços produtores (Figura 3).

A injeção da água produzida é uma prática adotada principalmente nos campos de petróleo terrestres, e trata-se da melhor alternativa ambiental e econômica, já que há disponibilidade deste fluido durante as operações de produção e substitui o uso da água doce dos aquíferos, além de propiciar um destino final e promover a recuperação secundária do óleo presente nos reservatórios (THOMAS, 2004).

Figura 3 – Esquema da injeção de água para recuperação secundária.



Fonte: <http://plant-engineering.tistory.com/267>.

O tratamento da água produzida a ser injetada nos reservatórios é necessário para atender padrões de qualidade impostos, e dessa forma, evitar o tamponamento do meio poroso do reservatório, comprometendo o fluxo dos hidrocarbonetos e a produção, evitar problemas a injetividade e danos aos equipamentos e tubulações, como corrosão e incrustação (KUNERT *et al.*, 2007).

Os componentes da água produzida que podem trazer problemas a injetividade nos poços de petróleo são (BRASIL; ARAÚJO; SOUSA, 2012; REYNOLDS; KIKER, 2003):

- Microorganismos: principalmente as bactérias redutoras de sulfato, que formam H_2S e provoca corrosão. São controladas com o uso de biocidas e filtração;
- Óleo emulsionado (disperso): são prejudiciais, pois as bactérias se alimentam do óleo bruto, o óleo é adsorvido em sulfuretos de ferro e outros depósitos de incrustações, o que torna difícil de remover esses depósitos com tratamento ácido, e o óleo reduz a permeabilidade da água no poço injetor, o que necessitaria de uma maior pressão para injetar essa água;
- Sólidos em suspensão ou sedimentos: são partículas de argila e areia ou precipitados de carbonato de cálcio, sulfuretos de ferro, entre outros, que podem provocar danos ao poço ou o tamponamento dos poros do reservatório;
- Gases dissolvidos: os gases encontrados na água produzida são o oxigênio (O_2), dióxido de carbono (CO_2) e sulfureto de hidrogênio (H_2S), são gases que aumentam os problemas com corrosão e devem ser removidos ou apresentar baixos teores.

- Sólidos dissolvidos: formam depósitos e incrustações de inorgânicos, causando entupimentos e bloqueio.

O recomendado é que a água utilizada na injeção em poços produtores de petróleo tenha 98% das partículas maiores que 2 microns removidas, teor de óleo e graxas (TOG) < 5 mg/L e teor de oxigênio < 50 ppb. Para atender essas especificações de qualidade, o tratamento da água implica em custos excessivos, mas há de considerar que água de má qualidade pode resultar na perda de produção devido à redução na eficiência de varredura e a presença de óleo na água pode trazer danos à formação dos poços injetores. (REYNOLDS; KIKER, 2003)

3.3.4.2 Descarte

Os campos de petróleo marítimos (*offshore*) geralmente descartam a água produzida no mar, após o tratamento adequado para atender as normas regulamentadoras (LEE; NEFF, 2011). Apesar de a água produzida conter diversos compostos químicos, o único parâmetro fiscalizado é o teor de óleos e graxas (TOG). Cada país impõe um limite diferente para o descarte da água produzida no mar, assim como o método de análise (GOMES, 2014). O não cumprimento do regulamento pode resultar em: penalidades civis, elevadas multas e perda de produção (STEWART; ARNOLD, 2011). A Tabela 2 apresenta alguns limites permitidos em alguns países.

Tabela 2- Limites adotados por diferentes países.

País	Limites do TOG
Brasil	Média: 29 mg/L Máximo: 42 mg/L
Estados Unidos	Média: 29 mg/L Máximo: 42 mg/L
Convenção OSPAR – Mar do Norte*	Média: 30 mg/L Máximo: não há
Canadá	Média: 30 mg/L Máximo: 44 mg/L
Convenção de Barcelona – Mar Mediterrâneo**	Média: 40 mg/L Máximo: 100 mg/L

Fonte: Gomes, A. P. P. (2014), Lee; Neff (2011), Gabardo (2007).

* (Bélgica, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Islândia, Irlanda, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Portugal, Espanha, Suécia, Suíça e Reino Unido)

** (Albânia, Argélia, Bósnia e Herzegovina, Croácia, Chipre, Egito, União Europeia, França, Grécia, Israel, Itália, Líbano, Líbia, Malta, Mônaco, Montenegro, Marrocos, Eslovênia, Espanha, Síria, Tunísia e Turquia).

As Agências Reguladoras Ambientais são as responsáveis pelas normas. No Brasil, o órgão regulamentador é o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). O descarte é feito de acordo com a Resolução CONAMA 393/2007 que “dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, estabelece padrão de descarte de óleos e graxas, define parâmetros de monitoramento, e dá outras providências.” (CONAMA, 2007). Alguns pontos importantes da resolução CONAMA 393/2007 são:

- Os descarte de água produzida deverá obedecer à concentração média mensal de óleos e graxas de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L;
- A concentração de óleos e graxas deve ser determinada pelo método gravimétrico, sendo aceitas outras metodologias de análise, desde que tenham correlação estatística com o método gravimétrico;
- Plataformas localizadas a menos de doze milhas náuticas da costa, a possibilidade e as condições de descarte são definidas pelo órgão ambiental, após estudo de dispersão, mas preferencialmente nesses casos a vazão deve ser zero;
- É proibido o descarte de água produzida em um raio inferior a dez quilômetros de unidades de conservação e a cinco quilômetros de áreas ecologicamente sensíveis;
- O monitoramento semestral da água produzida a ser descartada deve ser feito para análise de parâmetros como: compostos inorgânicos, radioisótopos, compostos orgânicos, toxicidade crônica, carbono orgânico total (COT), salinidade, pH e temperatura.

As plataformas offshore devem ter em suas instalações tecnologias capazes de tratar e reduzir o teor de óleos e graxas para que esteja conforme a regulamentação antes do descarte (STEWART; ARNOLD, 2011). É necessário tratar a água antes do descarte para evitar efeitos nocivos dos contaminantes presentes na água sobre o meio receptor, seja ele o mar, água doce ou reservatórios subterrâneos não produtores (LEE; NEFF, 2011).

A salinidade das águas produzidas normalmente as tornam tão densas quanto ou mais densas do que a água do mar, com isso se dispersam abaixo da superfície do mar, diluindo rapidamente em cima da descarga nas águas marinhas, que são realizadas por tubos em profundidades de 10 a 100 m (LEE; NEFF, 2011).

Como a Resolução CONAMA nº 393/2007 não inclui as atividades onshore, é de responsabilidade do estado/município definir os limites dos parâmetros da qualidade da água produzida a ser descartada, considerando as características do local do corpo hídrico receptor (GOMES, 2014).

A água produzida também é descartada no subsolo, em reservatórios subterrâneos de água e não produtores de petróleo. No Brasil, esta forma de descarte deve obedecer a Resolução CONAMA nº 396/2008 e deve ser feita em águas subterrâneas da Classe 5, que são definidas como: “águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, que possam estar com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, destinadas a atividades que não têm requisitos de qualidade para uso.” (CONAMA, 2008).

As águas subterrâneas de Classe 5 não possuem condições e padrões de qualidade. Para as águas desta classe, segundo a resolução, poderá ser feita a injeção direta, com o controle dos órgãos competente, desde que o interessado apresente estudos hidrogeológicos que demonstrem que a injeção não provocará alteração da condição de qualidade em relação ao enquadramento das águas subterrâneas adjacentes, sobrejacentes e subjacentes, por meio de monitoramento (CONAMA, 2008).

3.4 Emulsões

Emulsões são definidas como a mistura de dois líquidos imiscíveis, onde pequenas gotas de um líquido estão dispersas ou distribuídas num outro líquido (fase contínua) (TREYBAL, 1980).

3.4.1 FORMAÇÃO E ESTABILIDADE

A formação de uma emulsão só é possível se houver dois líquidos imiscíveis em contato, a presença de algum agente emulsificante e a ação de energia mecânica para misturá-los intimamente. (IIDA *et al.*, 2007; KUNERT *et al.*, 2007). Os emulsificantes têm como função reduzir a tensão interfacial, através da formação de um filme na interface das gotas dispersas, e reduzir o tamanho das gotas, e a agitação através de energia mecânica promove a quebra das gotas em tamanhos menores (SCHRAMM, 1992).

Quanto menores as gotículas, mais estável é o sistema, ou seja, mais difícil de ser separado e maior é o tempo de separação quando em repouso. ACS Industries (2006) classificou as emulsões, onde a fase contínua tem viscosidade inferior a 3 centipoise, de

acordo com o tamanho das gotículas relacionando com o tempo necessário para separação natural das fases, como mostra a Tabela 3:

Tabela 3 – Tempo necessário para observar a separação de fases de acordo com o tamanho das gotas.

Tempo de separação	Estabilidade da Emulsão	Tamanho das gotas, microns
< 1 minuto	Muito fraca	> 500
< 10 minutos	Fraca	100 – 500
Horas	Moderada	40 -100
Dias	Forte	1 – 40
Meses	Muito forte	< 1 (coloidal)

Fonte: ACS Industries (2006)

Schramm (1992) citou que os seguintes fatores que favorecem a estabilidade da emulsão:

- Baixa tensão interfacial: baixa energia livre de superfície torna mais fácil manter a estabilidade das grandes áreas interfaciais;
- Filme mecanicamente forte: a força do filme pode ser aumentada pela adsorção de sólidos finos na superfície da gota ou presença de moléculas de tensoativo, ambos atuam como uma barreira à coalescência;
- Dupla camada elétrica: evita colisões e agregação, promovendo a repulsão das gotas;
- Pequeno tamanho das gotículas: quanto menor o tamanho das gotas, menor é a velocidade de sedimentação;
- Pequeno volume da fase dispersa: reduz a frequência de colisões e agregação, além de reduzir a velocidade de sedimentação;
- Alta viscosidade: resulta na diminuição das taxas de flutuação (creaming) e coalescência.

Para o preparo da água produzida sintética deste trabalho, foram utilizadas as condições indicadas como ótimas por Maiti *et al.* (2011) em sua pesquisa, onde verificou que:

- A dosagem de emulsionante ótima era de 1% em volume, utilizando o óleo diesel como fase dispersa e o emulsificante Lauril Sulfato de Sódio;
- Uma maior intensidade de agitação resulta na formação de uma emulsão estável, e que a intensidade de agitação ótima foi 2000 rpm para o sistema de emulsão investigado;

- A estabilidade da emulsão aumentou com o tempo de agitação até 18 min, e permaneceu quase constante até 30 min e posteriormente diminuiu lentamente.

Na indústria de petróleo há formação de dois tipos de emulsão: água em óleo (A/O), quando gotas de água estão dispersas em óleo, e óleo em água (O/A), quando gotas de óleo estão dispersas na água (SCHRAMM, 1992). A água produzida é uma emulsão do tipo óleo em água. Segundo Kunert *et al.* (2007), essas emulsões podem ser geradas a partir da forte agitação durante as operações de elevação e do intenso cisalhamento provocado pela queda de pressão nas válvulas *choke* que controlam a vazão, como também de tubulações, vasos de carga pressurizados e separadores, bombas centrífugas e medidores de vazão, que provocam a quebra das gotas em gotas menores.

Outro fator que contribui para formação de emulsões na indústria de petróleo é a presença na composição do petróleo de grupos de substâncias que atuam como emulsificantes, como é o caso dos asfaltenos e resinas, além de alguns sólidos inorgânicos como argila, sais e óxidos, que contribuem para a estabilidade da emulsão (BRASIL; ARAÚJO; SOUSA, 2012). Estes compostos criam um rígido filme estabilizante na interface nas gotas.

Segundo Kunert *et al.* (2007), a estabilidade das emulsões de petróleo, principalmente das emulsões água em óleo (A/O), dependem dos seguintes fatores:

- Natureza do petróleo: quanto maior a quantidade de emulsificantes naturais presentes na composição do petróleo, mais estável será a emulsão. Os petróleos mais pesados possuem mais compostos emulsificantes em sua composição;
- Envelhecimento da emulsão: quanto mais tempo levar para a emulsão ser desestabilizada, mais emulsificantes naturais irão depositar-se na interface e mais estável será a emulsão com maior rigidez do filme interfacial;
- Presença de sólidos: tornam mais rígido o filme interfacial e dificulta a coalescência das gotas;
- Tamanho das gotas geradas: quanto menor a gota, menor é a velocidade de sedimentação;
- Volume da fase dispersa: quanto maior o teor da fase dispersa, maior é possibilidade das gotas colidirem e coalescerem.

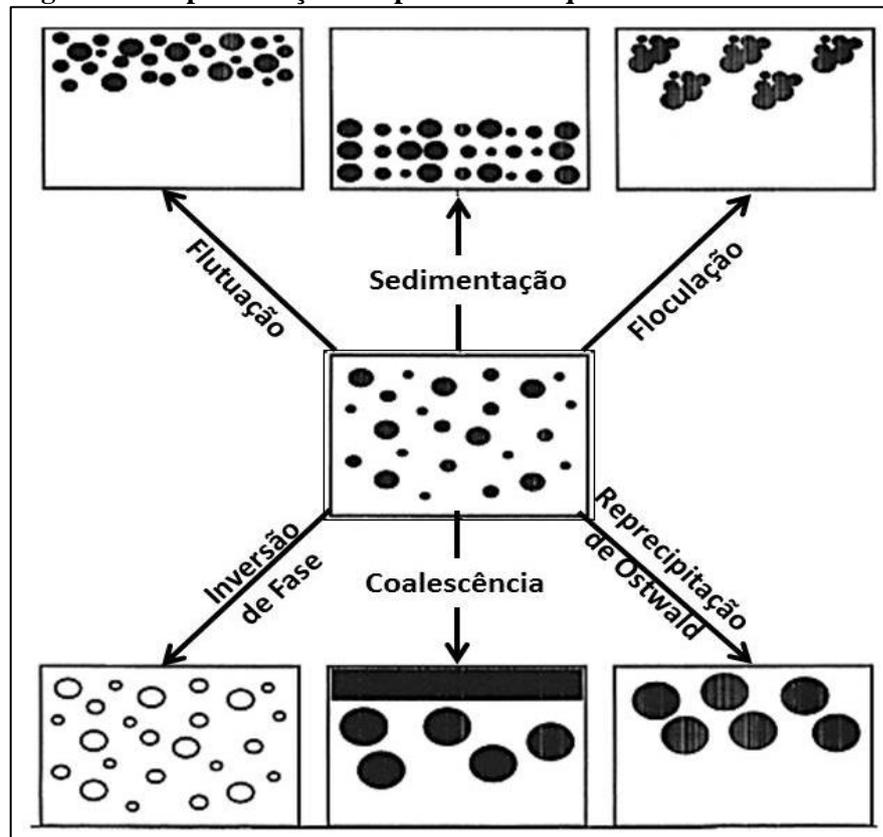
3.4.2 PROCESSOS DE QUEBRA DAS EMULSÕES

Tadros (2013) citou os seguintes processos de quebra das emulsões:

- Floculação: consiste no processo de agregação das gotículas, formando um conjunto de gotas agregadas, sem alteração no tamanho das gotas primárias (sem coalescência). Ocorre quando não há repulsão suficiente para manter as gotas distantes, onde a atração de van der Waals é fraca. Dependendo da intensidade da energia de atração, a floculação pode ser “forte” ou “fraca”. É um processo reversível.
- Inversão de fase: é o processo pelo qual haverá uma troca entre a fase dispersa e o meio. Onde, uma emulsão O/A pode, com o tempo ou alterações das condições, inverter para uma emulsão A/O ou vice e versa. Em muitos casos, a inversão de fase passa por um estado de transição onde múltiplas emulsões são produzidas.
- Flutuação (Creaming) e Sedimentação: é resultado da ação de forças externas, normalmente gravitacionais ou centrífugas. Onde, as gotas podem se acumular na parte superior (creaming) ou na parte inferior do sistema (sedimentação). Quando a densidade da fase dispersa é inferior ao do meio, ocorre formação de natas ou a flutuação das gotas (creaming), enquanto que se a densidade da fase dispersa é maior do que a do meio ocorre a sedimentação.
- Coalescência: consiste no processo de afinamento e ruptura do filme interfacial líquido entre as gotículas, resultando na fusão de duas ou mais gotículas formando gotas de maior tamanho. A condição limite para a coalescência é a separação completa da emulsão em duas fases líquidas contínuas e distintas. A força que promove a coalescência é resultante das flutuações na superfície ou no filme resultando na aproximação das gotículas, onde as forças de van der Waals são fortes e impedem a separação das gotas coalescidas.
- Reprecipitação de Ostwald (Ostwald ripening): os líquidos considerados imiscíveis muitas vezes têm solubilidades mútuas que não são insignificantes. O processo considera que as gotículas de menor tamanho terão maior solubilidade que as gotas maiores, devido a efeitos de curvatura. Com isso, pode ocorrer a solubilização das gotículas menores e as suas moléculas difusas se depositam sobre as gotículas maiores. Com o tempo, a distribuição de tamanho de gotícula desloca-se para valores maiores.

A Figura 4 apresenta uma representação dos processos acima comentados.

Figura 4 – Representação dos processos de quebra de emulsões.

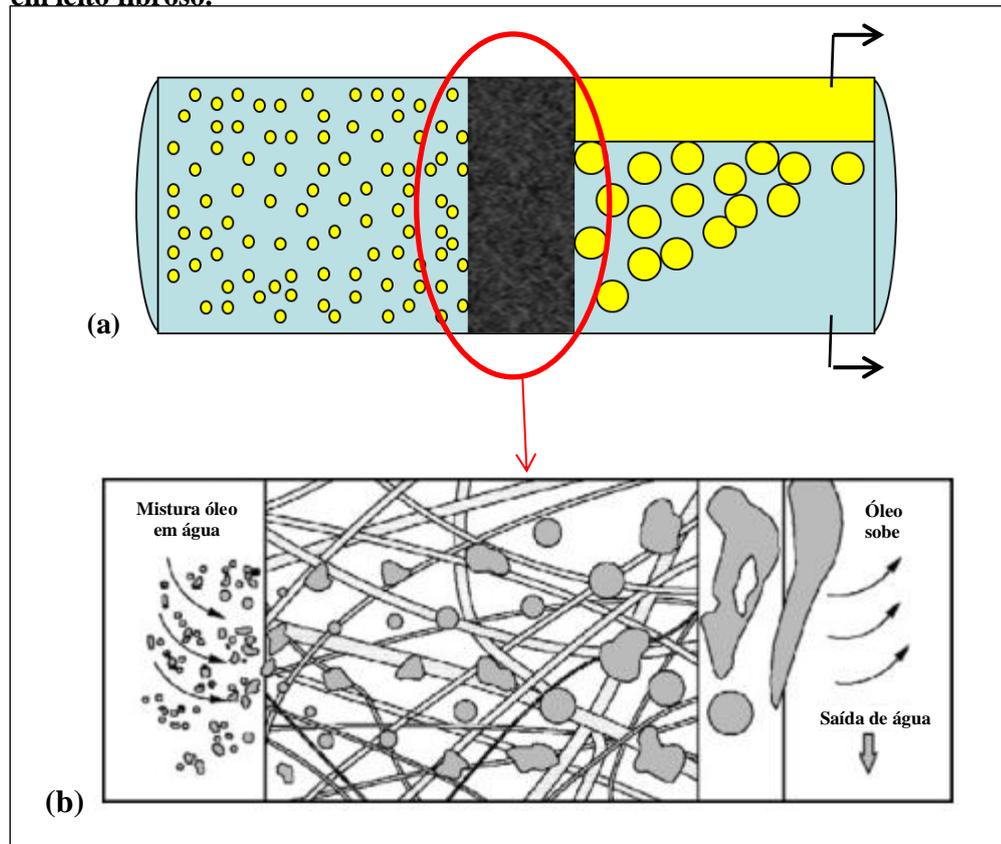


Fonte: Tadros (2013)

3.5 Coalescedores de Leito

Os coalescedores de leito são indicados para emulsões em que a coalescência natural é lenta, onde a aplicação de um leito com material coalescente, ou seja, a adição de uma malha de alta área superficial, umedecida pela fase dispersa, dentro do equipamento coalescedor pode acelerar a fusão das gotículas e melhorar a eficiência da coalescência, promovendo o crescimento de pequenas gotas, que formarão um menor número de gotas com maior diâmetro (PERRY; GREEN, 2007). A principal função do leito é promover a coalescência, fornecendo um caminho tortuoso que force o contato de pequenas gotas, facilitando as colisões gota-gota, ou a aderência das gotículas ao material do leito seguida da adesão dessas gotículas a outras (JAYA; KOLMETZ, 2012; PERRY; GREEN, 2007). A Figura 5 é uma representação do que foi descrito.

Figura 5 – (a) Coalescedor em leito; (b) destaque para a coalescência do óleo em leito fibroso.



Fonte: (a) Autor (2016), (b) Stewart; Arnold (2011).

As gotas coalescidas, ou seja, de maior tamanho são mais propensas a separação gravitacional após deixar o leito, reduzindo consideravelmente o tempo de residência (JAYA; KOLMETZ, 2012). De acordo com a Lei de Stokes para sedimentação, a velocidade em que o óleo sobe depende do diâmetro das gotículas e da viscosidade do fluido (VEIL, 2011). A velocidade de sedimentação de uma gota com $d_g \leq 0,1$ mm e $Re < 1$ é descrita pela seguinte equação de Stokes (Equação 1):

$$V_g = \frac{(\rho_a - \rho_o) \cdot d_g^2}{18 \cdot \eta} \cdot g \quad (1)$$

Onde, V_g é a velocidade de sedimentação das gotas (cm/s), $\rho_a - \rho_o$ é o valor da diferença entre as massas específicas da água e do óleo (g/cm^3), η é a viscosidade da fase contínua ($\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$), d_g é o diâmetro das gotículas que sedimentarão ou flutuarão (cm), e g é a aceleração da gravidade (cm/s^2).

A escolha do material do leito, a geometria e outras características são pontos importantes para uma separação eficiente no coalescedor em leito. O leito deve ter uma área

superficial suficiente para recolher as gotículas de óleo que irão se fundir a outras. Podem ser formados por fibras, grãos (granular) (LI; GU, 2005) ou tubos (CHAWALOESPHONSIYA; PAINMANAKUL, 2014). Para que ocorra a coalescência, o leito deve ser composto por material hidrofóbico e oleofílico, para que as gotas de óleo possam aderir e molhar o leito, e com poros menores que o tamanho das gotículas dispersas (AGARWAL, S. *et al.*, 2013b). No entanto, materiais hidrofóbicos aumenta a queda de pressão. Kulkarni, Patel e Chase (2012) combinaram camadas de material hidrofóbico (fibras de polipropileno e poliéster) com hidrofílico (fibras de vidro) e seus resultados mostraram uma menor queda de pressão e melhorou a eficiência de um coalescedor que fosse composto apenas com fibras de vidro (hidrofílicas).

Os coalescedores em leito tem como vantagens a possibilidade de autolimpeza do leito, são compactos, fáceis de instalar, automatizar e manter, tendo como desvantagem a necessidade de substituir o leito com o tempo (ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; GOVEDARICA; SOKOLOVIĆ, D. S., 2010). Nos leitos coalescentes pode ocorrer o entupimento dos poros, neste caso, um leito mais aberto, ou seja, menos compactado e com área superficial menor, pode ser preferível (PERRY; GREEN, 2007), já que quanto mais apertado o meio, maior a chance de provocar entupimentos. A presença de sólidos também pode reduzir a eficiência do coalescedor e vida operacional pelo entupimento dos poros do leito, neste caso, para a água produzida, o ideal seria empregar antes do coalescedor um sistema de filtragem para remoção dos sólidos presentes (MOFARRAH *et al.*, 2011).

3.5.1 MECANISMO DE COALESCÊNCIA NO LEITO COALESCENTE

O mecanismo do processo de separação de uma emulsão por coalescência em meios fibrosos é complexo, não é totalmente compreendido e é baseado em hipóteses, além de envolver mecanismos alternativos para cada etapa, não existindo, dessa forma, uma teoria que relacione a coalescência das gotículas (HAZLETT, 1969; BUFO, 2006; LU *et al.*, 2016).

“Até o momento, não houve nenhuma abordagem sistêmica para o problema dos complexos fenômenos de coalescência em leito. As condições experimentais diferem de estudo para estudo ao longo de diferentes propriedades do leito e orientações de fluxo do fluido. Muitas vezes, as condições escolhidas não permitem estudar o fenômeno desejado por causa da influência simultânea de várias variáveis. Nestas circunstâncias é difícil configurar quaisquer conclusões gerais. Por outro lado, o conhecimento existente de mecanismos de coalescência, mecanismos de ruptura de película e de fluxo de dois líquidos imiscíveis através leito poroso é ainda

adequadamente ligados uns aos outros.” (ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; SOKOLOVIĆ, D. S.; GOVEDARICA, D. D., 2015)

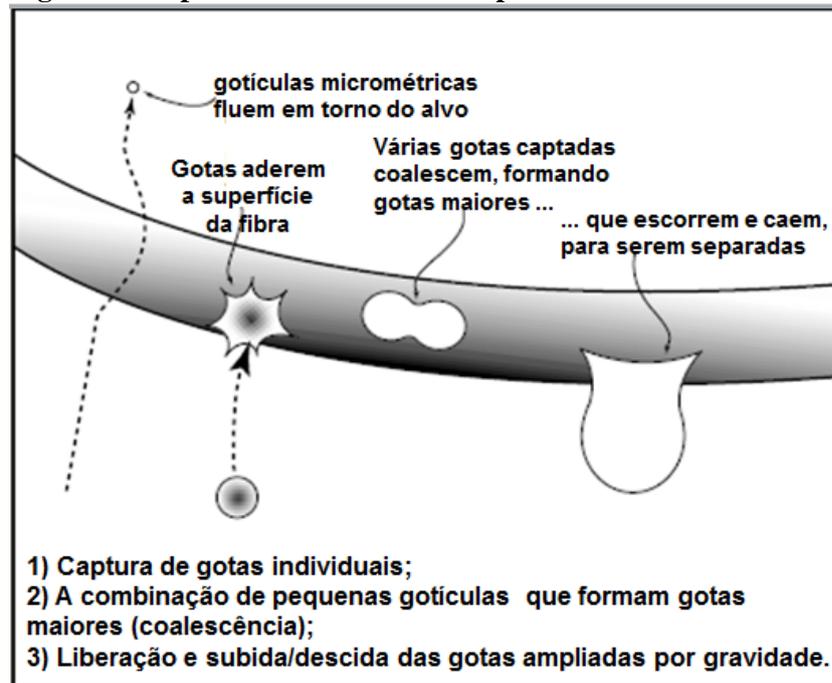
Na emulsão óleo em água, após a passagem pelo leito, as gotas aumentadas continuam coalescendo até formar a fase contínua de óleo (GOVEDARICA, D. *et al.*, 2015)

O mecanismo de coalescência no leito de fibras pode ser dividido em três etapas (AUSTIN, 1979; ACS INDUSTRIES, 2006; JAYA; KOLMETZ, 2012):

- (1) captura de gotas dispersas: consiste na adesão das gotículas do líquido disperso na superfície da fibra. Há três mecanismos de transporte, semelhantes aos de filtração, para explicar esta primeira etapa: interceptação direta, interceptação indireta, impacto inercial, sedimentação e difusão.
- (2) coalescência das gotas e fluxo da fase contínua através do leito poroso: choque e fusão das gotículas subsequentes com as capturadas e aderidas ao leito, formando uma gota maior, minimizando a energia interfacial. A velocidade do fluxo, e conseqüente, o tempo de residência, deve ser suficientes para que não ocorra o arraste de gotículas que ainda não coalesceram.
- (3) liberação das gotas coalescidas: consiste na saída das gotas coalescidas do leito para a região do coalescedor depois (a jusante) do leito, onde acontece a separação das fases por gravidade. O grau de separação nessa etapa depende da geometria do recipiente e do tamanho das gotículas formadas.

A Figura 6 representa as três etapas da coalescência na superfície de uma fibra comentadas acima:

Figura 6- Etapas da coalescência na superfície de uma fibra.



Fonte: Adaptado de ACS Industries (2006).

De acordo com Jaya e Kolmetz (2012), “a primeira e a última etapa podem ser modelada com boa precisão e repetibilidade, enquanto que a modelagem da segunda etapa de coalescência é uma função complexa da tensão superficial e efeitos viscosos, momento da gota, e dinâmica dos tamanhos das gotas na dispersão”.

3.5.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA

Uma vez que várias gotas são recolhidos numa placa, fio, ou de fibra, eles tenderão a combinar de forma a minimizar a energia interfacial, e prevendo a rapidez com que isso ocorrerá sem testes piloto é muito difícil de fazer (ACS INDUSTRIES, 2006). O volume adequado e, portanto, tempo de residência, nos leitos coalescentes são guiados pela experiência e as propriedades do fluido e do leito (JAYA; KOLMETZ, 2012).

Muitos parâmetros são fundamentais para a eficiência de separação de uma dispersão líquido-líquido. Esses parâmetros podem ser classificados da seguinte forma: (GOVEDARICA, D. *et al.*, 2015; MOTTA, 2014)

- Propriedades das fases dispersa e contínua: diâmetro das gotas, diferença de densidade entre as fases dispersas e contínua, tensão interfacial, viscosidade e presença de surfactantes.

- Condições operacionais: sentido do leito e do fluxo, velocidade do fluido na entrada do leito, queda de pressão, temperatura e TOG da alimentação.
- Propriedades do leito: molhabilidade e rugosidade superficial, tamanhos de poros, espessuras da fibra, permeabilidade, espessura do leito, etc.

3.5.2.1 Design do Coalescedor e Orientação do Fluxo

Devido ao complexo mecanismo da coalescência, o dimensionamento e seleção de um coalescedor é uma combinação de experiência empírica e modelagem analítica, baseado em informações de ensaios pilotos (JAYA; KOLMETZ, 2012). Além disso, para se ter um coalescedor líquido-líquido eficiente é necessário, previamente, se ter o conhecimento das propriedades e origem da emulsão a ser tratada (ACS INDUSTRIES, 2006).

Algumas sugestões quanto ao design do coalescedor são encontradas na literatura e em manuais, como:

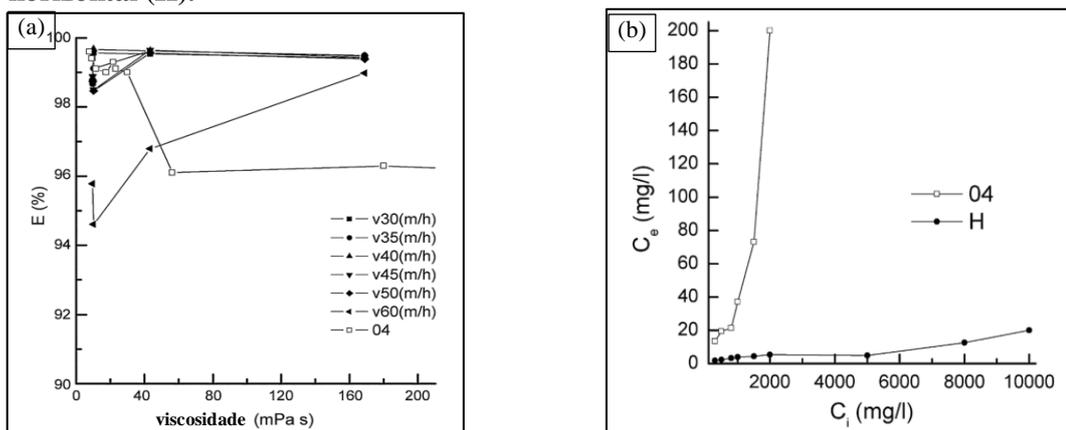
- Grupo Shell (2008) sugere manter a relação de $2,5 \leq L / D \leq 6$, onde L é o comprimento total do equipamento e D é o diâmetro interno, e uma distância inicial até o leito coalescente de $0,45 D$, essa distância deve ser suficiente para que o regime alcance a condição laminar. Já a seção de sedimentação, após o leito, deverá ter comprimento suficiente para se atingir a eficiência de separação em termos de tamanho das gotas coalescidas, ou seja, que as gotas coalescidas possam subir ou descer até a interface no equipamento;
- ACS Industries (2006) manter a relação L / D no intervalo entre 3 a 5;
- Cusack (2009) recomenda instalar uma placa de isolamento entre a entrada (alimentação) e o início do leito para impedir que os efeitos de turbulência criados na entrada possam comprometer as etapas da coalescência e, conseqüentemente, a eficiência de separação. E a posição ótima das seções deve ser encontrada através de experimentação por tentativa e erro.

O coalescedor pode ser orientado verticalmente ou horizontalmente. A eficiência de separação em leitos coalescentes é altamente influenciada pelo modo de fluxo (ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; VULIĆ; SOKOLOVIĆ, S. M., 2006a). O design vertical é utilizado para separar água de hidrocarbonetos quando a tensão interfacial é maior do que 3 dina/cm. Na configuração horizontal, uma zona de sedimentação consegue a separação por gravidade. Esta

configuração é utilizada quando a tensão interfacial é inferior a 3 dina/cm ou para a separação de óleo da fase aquosa. (JAYA; KOLMETZ, 2012)

Šećerov Sokolović, Govedarica e Sokolović (2010) estudaram o efeito da geometria de um leito coalescente, operando em estado estacionário, comparando a eficiência dos coalescedores com duas geometrias diferentes, horizontal e vertical com fluxo ascendente e descendente, ambos com mesma permeabilidade, num intervalo de diferentes velocidades de fluxo, óleos de diferentes propriedades e alterando a concentração do afluente. A velocidade utilizada para coalescedor vertical foi de 7m/h e horizontal no intervalo de 30 a 60 m/h. Os resultados mostraram que a geometria do coalescedor a baixas velocidades não apresentou diferença significativa na eficiência de separação, no entanto, o coalescedor horizontal permite operar com velocidades muito mais elevadas (figura 7(a)). Além disso, para uma mesma velocidade de escoamento, variando a concentração de óleo afluente (figura 7(b)), observou-se que a eficiência do coalescedor vertical diminui com o aumento da concentração, enquanto que para o horizontal foi possível obter uma alta eficiência de separação com a mudança de concentração. Concluíram, então, que o coalescedor horizontal é mais eficiente, apresentando como vantagens velocidades de trabalho muito mais elevada e a eficiência de separação não foi sensível às alterações na concentração do afluente.

Figura 7 – (a) Efeito da variação da velocidade em óleos de diferentes viscosidades; (b) Dependência da concentração de óleo no efluente (C_e) com relação a concentração de óleo no afluente (C_i) para o coalescedor vertical (04) e o coalescedor horizontal (H).

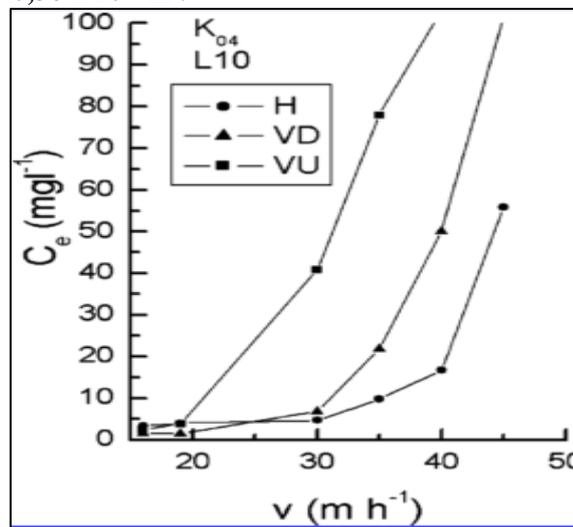


Fonte: Šećerov Sokolović, Govedarica e Sokolović (2010).

Šećerov Sokolović, Vulić e Sokolović (2006) investigaram três diferentes orientações de fluxo (horizontal [H], vertical ascendente [VU] e vertical descendente [VD]) em coalescedores com leito composto por poliuretano, em um certo intervalo de propriedades e

de velocidades de trabalho (16 – 50 m/h), em três comprimentos de leito (3, 5 e 10 cm). A emulsão de óleo de base naftênica em água com concentração de 500 mg/L (figura 8). Os resultados mostraram que o fluxo horizontal é mais eficaz para um leito coalescente em estado estacionário, sob todas as condições de trabalho, principalmente em altas velocidades de fluxo, por apresentarem maior velocidade crítica. A diferença na eficiência dos fluxos horizontal e vertical ascendente diminui com o aumento do comprimento do leito. E comparando os fluxos verticais, o descendente é sempre melhor do que o fluxo vertical ascendente, para todos os comprimentos de leito investigados.

Figura 8 - Influência da velocidade em diferentes geometrias de coalescedores, $K_0 = 0,38 \times 10^{-9} \text{ m}^2$.



Fonte: Šećerov Sokolović, Vulić e Sokolović (2006)

A explicação dada pelos autores está relacionada às forças hidrodinâmica, gravitacional e flutuante. Onde, os três fluxos estudados são diferenciados somente pela orientação das forças hidrodinâmicas. As forças da gravidade e de flutuação agem sempre no plano vertical, independente da orientação utilizada para o fluxo, já a força hidrodinâmica é determinada pela orientação do fluxo e sua intensidade. Segundo os autores (ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; VULIĆ; SOKOLOVIĆ, S. M., 2006a):

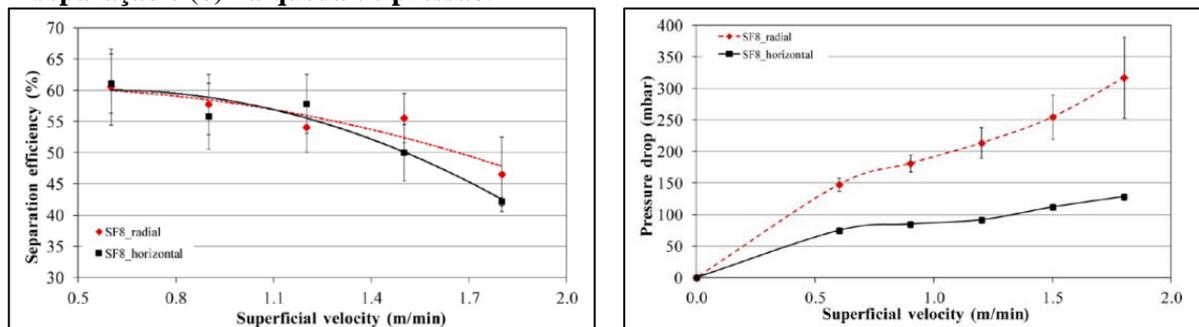
- No fluxo horizontal, as forças hidrodinâmicas empurram na direção horizontal o líquido do leito, e ao mesmo tempo a gravidade e as forças flutuantes agem no plano vertical separando as fases. Após a passagem pelo leito, a separação por sedimentação em um fluxo horizontal, independe da força hidrodinâmica e depende das forças gravitacional e flutuante. Essas duas forças agem desde a entrada do fluido no

equipamento, com isso, parte da fase dispersa pode ser separada antes de passar pelo leito.

- No fluxo vertical, todas as três forças agem no mesmo plano vertical. Não há separação antes do leito. No fluxo ascendente, as forças hidrodinâmicas também empurram o óleo saturado, que por ser menos denso que a água tende a sair do leito. Dependendo da intensidade das forças, ou seja, da velocidade do fluxo, as gotas de óleo podem deixar o leito antes de coalescerem, diminuindo a eficiência. E no fluxo descendente, as forças hidrodinâmicas tendem a manter o óleo no leito, pois a medida que as gotas de óleo coalescem tendem a subir em direção contrária ao fluxo, aumentando assim a coalescência e a eficiência de separação no leito. (ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; VULIĆ; SOKOLOVIĆ, 2006)

Agarwal, von Arnim, *et al.* (2013b) pesquisaram o efeito da direção do fluxo na horizontal e na radial em diferentes velocidades superficiais (0,6 – 1,8 m/min) sobre a eficiência de separação (n), a queda de pressão (ΔP) e o fator de qualidade ($FQ = -\ln(1-n)/\Delta P$). Observaram que a direção do fluxo não provocou uma diferença significativa na eficiência de separação, no entanto a queda de pressão do fluxo radial foi aproximadamente o dobro da observada no fluxo horizontal (figura 9), com isso o fator de qualidade do fluxo horizontal foi maior em todas as velocidades testadas. Foi explicado que, a elevada queda de pressão seria devido ao número de Reynolds na superfície do meio coalescente do fluxo radial ser cerca de 1,2 vezes maior do que o do fluxo horizontal, mas que a turbulência provocou elevada colisões e força de cisalhamento entre as gotículas, não havendo redução na eficiência de separação.

Figura 9 - Efeito da velocidade superficial e da direção de fluxo (a) na eficiência de separação e (b) na queda de pressão.



Fonte: Agarwal, von Arnim, *et al.* (2013)

Como o presente trabalho tem foco na separação de óleo da água produzida, e como já foi discutido em seções anteriores o volume de água durante a vida produtiva de um reservatório é variável e com o decorrer dos anos esse volume tende a aumentar, optou-se por construir um coalescedor em leito com orientação de fluxo horizontal para o desenvolvimento da pesquisa.

3.5.2.2 Velocidade do fluido

A velocidade superficial (V_s) do fluido é definida como a velocidade de uma fase de um fluxo multifásico, considerando que a fase ocupa toda a seção transversal do tubo. É calculada pela equação 2 para cada uma das fases (MOKHATAB; POE; MAK, 2015):

$$V_s = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Onde, Q é a vazão volumétrica e A é a área da seção transversal do tubo.

A velocidade do fluido pode influenciar os mecanismos de captura das gotas, a distribuição da fase dispersa e a separação do óleo retido (ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; SOKOLOVIĆ, S. M.; ĐOKOVIĆ, 1997), alterando a linha de fluxo que conduz a gota de óleo até o meio coalescente ou provocando condições de turbulência com o aumento do número de Reynolds (MOTTA, 2014).

Segundo Jaya e Kolmetz (2012), os coalescedores em leito funcionam melhor em fluxo laminar pelos seguintes motivos:

1. Gotas ficarão nas linhas de corrente em torno das fibras desejadas.
2. Quando as elevadas velocidades de fluido superam as forças de tensão superficial, as gotículas são arrastadas do meio coalescente, evitando que as gotas subam/afundem por não terem tamanho suficiente para sedimentação;
3. velocidades mais lentas resultam em maior tempo de permanência nos meios coalescentes; e, portanto, mais tempo para o impacto gota-fibra, colisões gota-a-gota, e sedimentação de Stokes no meio.

Se a velocidade do fluxo não for laminar, as gotas não irão aderir facilmente à superfície da fibra do leito ou irão deixar o leito antes da coalescência completa da gota, assim

como pode ocorrer também a redispersão das gotas grandes devido ao fluxo turbulento (SPETH *et al.*, 2002)

Alguns autores consideraram que há uma velocidade máxima de trabalho para alcançar determinada concentração final no efluente tratado, chamada de velocidade crítica.

Sareen *et al.* (1966) definiram a velocidade crítica de separação como a velocidade em que ocorre a redispersão das gotas, onde o grau de coalescência das gotas no leito não foi suficiente para separação completa, com isso, um coalescedor, com determinado comprimento de leito, deve ser operado abaixo desta velocidade para alcançar uma eficiente separação.

Šećerov Sokolovic *et al.* (2003) definiram a velocidade crítica como a velocidade na qual a concentração da fase dispersa no efluente tratado excede o valor desejado, ou seja, a máxima concentração no efluente de saída. É um importante parâmetro, pois define os limites e o intervalo da velocidade de trabalho para atingir as condições definidas, ou seja, o valor máximo da velocidade de trabalho a ser utilizado.

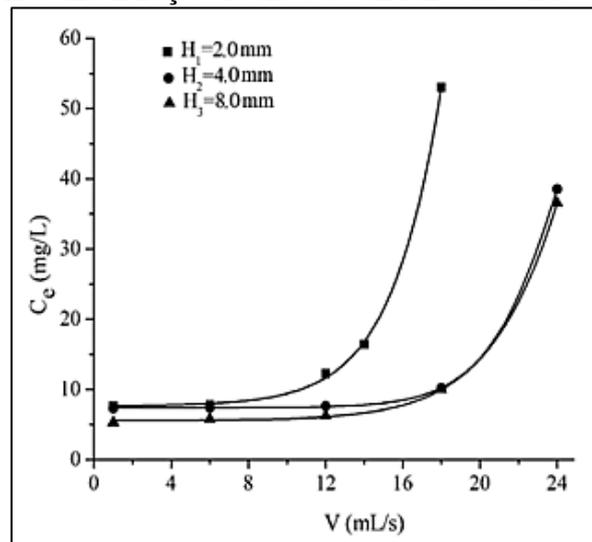
A velocidade crítica é dependente da orientação do fluxo e também do comprimento e permeabilidade do leito (ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; VULIĆ; SOKOLOVIĆ, S. M., 2006a). Como foi comentado anteriormente, coalescedores em leito com fluxo horizontal tem velocidade crítica maior do que os verticais. O aumento da superfície de coalescência, ou seja, do comprimento do leito e o tempo de contato produz um aumento significativo na probabilidade de captura gota, isto é, na eficiência de separação. A velocidade crítica aumenta com o aumento da permeabilidade do leito, até a permeabilidade crítica (ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; VULIĆ; SOKOLOVIĆ, S. M., 2006a).

Vários autores têm estudado a influência e importância da velocidade superficial do fluido, assim como a determinação da velocidade crítica para diferentes situações.

Ma, Kang e Cui (2013) estudaram o efeito da velocidade do fluido em um coalescedor de leito vertical, com microfibras de vidro, na remoção de óleo de uma emulsão de óleo diesel em água. As velocidades variaram no intervalo de 1 mL/s a 24 mL/s para um afluente com concentração de 2000 mg/L e porosidade de 0,850 em diferentes comprimentos de leito (2, 4 e 8 mm). Observou o aumento da concentração de óleo no efluente (diminuição da eficiência) com o aumento da velocidade do fluido para as três alturas do leito testadas (figura 10). Neste trabalho, a velocidade crítica foi determinada quando a concentração de óleo no efluente foi maior que 10 mg/L. Quando a velocidade do fluido foi inferior à velocidade crítica, a concentração média de óleo efluente foi mantido em torno 7,20 mg/L, sem alterações significativas. No entanto, quando a velocidade do fluido foi além do valor crítico, a concentração de óleo do efluente aumentou acentuadamente. A conclusão foi que a estrutura

de rede de fibras internas seria mais flexível, assim, substancialmente enfraquecida da função obstáculo do leito, quando excedeu a velocidade crítica. A película de óleo seria esmagada e as minúsculas gotículas de óleo poderiam fluir através das malhas soltas pelo fluxo turbulento de alta velocidade levando um expressivo aumento da concentração de óleo do efluente.

Figura 10 – Influência da velocidade do fluido na concentração de óleos do efluente de saída.



Fonte: Ma, Kang e Cui (2013).

Lu, Yang, Xu, *et al.* (2016) investigaram os efeitos de alguns parâmetros, incluindo a velocidade superficial, quanto à eficiência e o fator de qualidade (FQ) na separação de uma emulsão de óleo diesel e água, em leitos coalescentes fibrosos de Politetrafluoretileno (teflon) e de aço inoxidável de diferentes densidades e áreas de superfície. A orientação do fluxo foi horizontal. No estudo do efeito da velocidade superficial, a concentração do afluente foi constante e igual a 590 mg/L, o comprimento do leito de 10 cm e a velocidade variando no intervalo de 0,6 a 1,7 m/min. Observaram que o aumento da velocidade superficial resultou na redução da eficiência e no aumento da queda de pressão através do leito, o que causaram diminuição no fator de qualidade (FQ). Os autores atribuíram esta diminuição do FQ ao aumento das forças hidrodinâmicas e a diminuição do tempo de residência das gotículas de óleo dispersas dentro do leito, promovendo a liberação de pequenas gotículas. O grau de saturação diminuiu quando aumenta a velocidade do superficial, o que contribuiu para uma menor possibilidade de captura gota. Acima da velocidade superficial crítica foi observado um rápido decréscimo no valor da eficiência. A velocidade crítica variou com as diferentes densidades de empacotamento das fibras no leito, onde uma elevada densidade do

empacotamento tem uma grande velocidade crítica. A velocidade ótima de um coalescedor real deve ser abaixo da velocidade crítica.

Šećerov Sokolović; Sokolović, S. M.; Đoković (1997) observaram em um coalescedor horizontal com leito de fibras de poliuretano as seguintes velocidades críticas para diferentes comprimentos de leito e concentrações de entrada. A tabela 7 mostra os resultados deste estudo, a menor velocidade crítica foi a do ensaio com menor comprimento de leito e maior concentração de óleo na alimentação, enquanto que o valor máximo foi para o ensaio com maior comprimento de leito e menor concentração de óleo.

Tabela 4 - Velocidades críticas médias para diferentes comprimentos de leito e concentrações de óleo na alimentação, em um leito de poliuretano.

Concentração na alimentação (mg.L ⁻¹)	Comprimento do Leito				
	3 cm	5 cm	7 cm	10 cm	15 cm
500	26,60	37,90	-	30,20	38,00
800	25,60	32,00	27,50	30,00	36,00
1100	24,10	32,00	27,00	30,50	36,00
1400	24,70	30,00	28,00	30,20	36,00
2000	23,40	29,00	28,00	30,00	35,00

Fonte: Šećerov Sokolović; Sokolović, S. M.; Đoković (1997).

3.4.2.3 *Materiais do Leito*

No leito dos coalescedores podem ser usadas fibras com alta ou baixa energia de superfície. As fibras de vidro, fibras de aço inoxidável e as fibras de cerâmica são utilizadas como materiais de elevada energia de superfície, enquanto que o polipropileno, poliuretano, tereftalato de polietileno, tereftalato de polibutileno, nylon e Teflon são mais comumente utilizados como materiais com baixa energia de superfície (GOVEDARICA, *et al.*, 2015). Para a separação de óleo disperso, as fibras de polímero são mais frequentemente utilizadas, por serem materiais oleofílicos.

Materiais que são preferencialmente “molhados” pela fase dispersa são melhores. Ou a combinação de materiais hidrófilos e oleofílicos aumenta a eficiência global de coalescência em relação à utilização de apenas um dos materiais (CUSACK, 2009).

A estabilidade térmica, mecânica e química do material de coalescência devem ser consideradas, por exemplo (GRUPO SHELL, 2008):

- polipropileno não deve ser utilizado se a temperatura operacional superior a 80 °C;
- Teflon não deve ser utilizado em temperatura acima de 200 °C.;

- Fibra de vidro não deve ser utilizado em sistemas com um $\text{pH} > 9$.

O material do leito não deve adsorver as impurezas ou surfactantes presentes para não degradar as características de molhabilidade da superfície com o tempo (PERRY; GREEN, 2007).

Li e Gu (2005) utilizaram um coalescedor horizontal para coalescer as gotículas de óleo nas emulsões óleo em água utilizando leitos com fibras de polipropileno (170 μm) e de nylon (80 μm) e grãos de polipropileno (684 μm). Analisaram e discutiram os efeitos da razão do fluxo, concentração de óleo na entrada, comprimento do leito coalescente e o tamanho da fibra sobre a eficiência global da coalescência. Avaliando o efeito do tamanho da fibra em uma velocidade superficial de 1,45 mm/s (ou 5,22 m/h) e comprimento de leito de 20 cm, concluíram que as fibras de menores diâmetros resultam em melhor eficiência do que as fibras maiores, se os outros parâmetros são mantidos invariantes, porque apresentam maior área superficial específica. E a área superficial específica do material granular testados foi de $8,77 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{m}^3$, valor muito menor do que aqueles para coalescedores fibrosos típicos que são maiores que $2,0 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{m}^3$, o que pode reduzir o número de colisões, e a eficiência global coalescência.

A observação feita por Ma, Kang e Cui (2014) foi que quanto maior a área de superfície do leito fibroso, maior será a eficiência de coalescência, com isso, as microfibras são mais eficientes que fibras maiores.

Šećerov Sokolović, Govedarica e Sokolović (2014) testaram quatro fibras poliméricas diferentes para separar diferentes emulsões preparadas com quatro óleos minerais de propriedades diferentes. Os estudos foram realizados em um coalescedor horizontal, com concentração de óleo na entrada de 500 mg/L e comprimento do leito de 5 cm, no intervalo de propriedades de petróleo, permeabilidade do leito ($0,18 \times 10^{-9} - 5,39 \times 10^{-9} \text{ m}^2$) e velocidades de fluido (19 – 80 m/h). As fibras utilizadas foram poliuretano, duas qualidades de Polietileno Tereftalato (denominadas de BA1 e PE) e Polipropileno. As fibras BA1 foram obtidas através do corte das peças de material térmico usado para revestimentos de enchimento, já as fibras de PE são resíduos no corte de meio filtrante para aspiradores de cozinha. Os materiais de poliuretano e BA1 têm grandes áreas com altos valores da velocidade crítica, superior a 50 m/h na zona da mais alta permeabilidade do leito para toda a faixa de óleos naturais. Os resultados mostraram que polipropileno e PE são sensíveis à alteração da natureza da fase de óleo dispersa. O material de poliuretano não é sensível para a diminuição da permeabilidade do leito devido ao entupimento dos poros, enquanto o material BA1 é sensível. A conclusão é

que o poliuretano apresenta mais vantagens em relação aos outros materiais para a separação de óleos de diferentes naturezas. Este material apresenta uma maior confiança de leitos coalescentes num amplo intervalo de qualidade das águas residuais, não só em termos da natureza da fase de óleo, mas também sobre o conteúdo de sólidos suspensos.

3.4.2.4 Comprimento do Leito

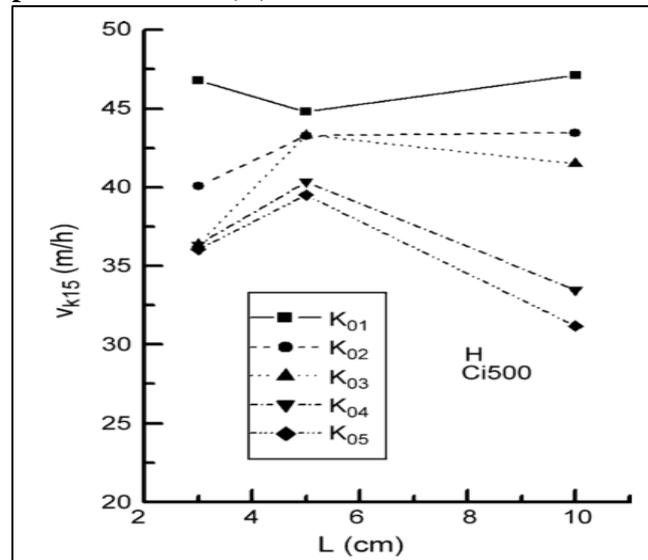
O comprimento do leito é uma importante variável que influencia a eficiência de separação. Os estudos envolvendo o comprimento do leito em valores variados. Alguns autores investigaram o efeito do comprimento do leito menor, entre 0,2 – 3,2 cm (MA; KANG; CUI, 2014; SAREEN *et al.*, 1966) e outros com um leito maior, de até 70 cm (LI; GU, 2005; LU; YANG; LIU; *et al.*, 2016; MOTTA, 2014; ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ; VULIĆ; SOKOLOVIĆ, S. M., 2007).

Sareen *et al.* (1966) investigou o efeito do comprimento do leito de 0,64 – 3,2 cm. Os resultados que com o aumento do leito, há também um aumento no grau de coalescência, pois um leito de maior comprimento resulta em um maior tempo de residência no leito favorecendo a coalescência das gotas, no entanto há uma alta queda de pressão através dele e isto resulta na redispersão das gotas coalescidas. Avaliando esse fatores, o autor concluiu que há um comprimento ótimo do leito, que foi de 1,9 cm.

Li e Gu (2005) estudaram um leito de 20, 40 e 70 cm de comprimento, e concluíram que pode existir um comprimento mínimo do leito, acima do qual a eficiência de coalescência permanece quase a mesma.

Šećerov Sokolović; Vulić; Sokolović (2007) estudaram o efeito do comprimento do leito num intervalo de 1 – 15 cm, em um coalescedor horizontal com leito composto por fibras de poliuretano, operando em estado estacionário. Encontraram a presença de um comprimento de leito mínimo, o qual chamaram de comprimento crítico do leito, L_c , que é predominantemente determinada pela permeabilidade do leito e a concentração de óleo no afluente, independente do modo de fluxo. A velocidade crítica aumenta tanto com o aumento da permeabilidade do leito ($K_{01} > K_{02} > K_{03} > K_{04} > K_{05}$) quanto com o comprimento. O valor ótimo do comprimento do leito, nas condições experimentais estudadas pelos autores foi de 5 cm para o leito de fibras de poliuretano.

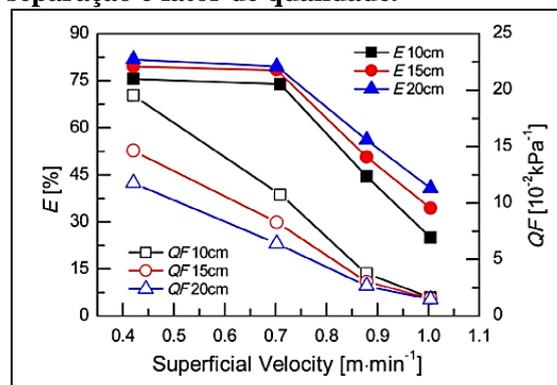
Figura 11 - Velocidades críticas (V_{k15}) em diferentes comprimentos de leito (L) e permeabilidades (K).



Fonte: Šećerov Sokolović; Vulić; Sokolović (2007).

Lu, Yang, Liu, *et al.*, (2016) investigaram o efeito de leitos com comprimentos de 10, 15 e 20 cm e, assim como os outros trabalhos, a eficiência aumentou com o aumento do comprimento do leito, resultado dos efeitos da área superficial e tempo de contato que aumentaram. No entanto, observaram que o aumento do comprimento do leito aumentou significativamente a queda de pressão, diminuindo o fator de qualidade (figura 12). Analisando pelo fator de qualidade, o leito de 10 cm teve um significativo valor para o fator em baixas velocidades superficiais do fluido (0,4 m/min), a medida que a velocidade aumenta essa diferença no valor do fator de qualidade é insignificante.

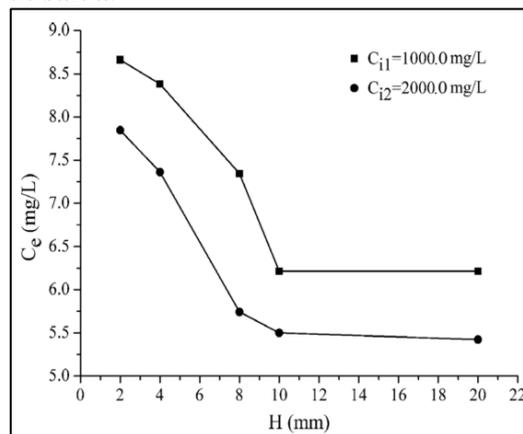
Figura 12 - Efeito da velocidade superficial e comprimento do leito na eficiência de separação e fator de qualidade.



Fonte: Lu, Yang, Liu, *et al.*, (2016).

Ma, Kang e Cui (2014) investigou o efeito de diferentes alturas do leito na remoção de óleo nas seguintes condições: concentração de óleo afluyente de 1000,0 e 2000,0 mg/L, velocidade de fluxo de 6,0 mL/s (ou 21,6 L/h) e uma porosidade de leito de 0,850. Observou a diminuição da a concentração de óleo efluente na saída com o aumento na altura do leito. Mas não houve uma correlação entre eles e nem uma a tendência da flutuação da curva. A melhora na eficiência foi explicada pela proporcionalidade com o tempo de retenção hidráulica da emulsão no leito. O leito mais largo poderia conter mais gotículas de óleo e construir um ambiente de formação de filme melhor, aumentando a probabilidade de microgotículas coalescerem ao atravessar o leito. Observou que quando a altura do leito excedeu 10,0 mm, não houve melhoras contínuas na interceptação e coalescência.

Figura 13 - Efeito do comprimento do leito na concentração de óleo do efluente de saída.



Fonte: Ma, Kang e Cui (2013).

O quadro 1 apresenta um resumo quanto aos materiais utilizados no leito, orientação do leito, condições operacionais, tipo de óleo e resultados dos principais artigos que utilizaram leitos coalescedores para o tratamento de emulsões de óleo em água.

Quadro 1 – Resumo dos artigos de coalescedores em leite.

Artigo	Material	Direção do Fluxo	Condições de operação	Preparo Emulsão	Eficiência
<p>Agarwal, S. <i>et al.</i>, (2013a)</p> <p>Alemanha</p>	<p>- tereftalato de polibutileno (PBT) (tecido poroso)</p> <p>- poliéster (de tecido entrelaçado e agulhados)</p>	<p>Vertical</p> <p>Horizontal/radial</p> <p>Estado estacionário</p>	<p>Alimentação: 1% de isso-octano em água deionizada</p> <p>Velocidade: 0.6– 1.8 m/min ($Re = 0,022 - 0,465$)</p> <p>Porosidade: 0,78 -0,88</p>	<p>Iso-octano + água deionizada</p> <p>estabilizados com dodecil sulfato de sódio (SDS, 0,00025%) tensoactivo</p>	<p>32 - 80%</p> <p>Melhor condição: combinação dos três materiais, 3,93 mm, 0,84 porosidade</p>
<p>Govedarica <i>et al.</i>, (2014)</p> <p>Sérvia</p>	<p>Fibras de Polipropileno</p>	<p>Horizontal</p>	<p>Velocidade: até 50 m/h</p> <p>Comprimento do leite: 5 cm</p>	<p>Três diferentes óleos minerais (óleo nafténico bruto (A), nafténicos-base de fracção de vácuo (A4), e produto de petróleo misturado com um maior teor parafínico (P1)) + água</p>	<p>< 15 ppm</p>

Quadro 1 – Resumo dos artigos de coalescedores em leite.

Artigo	Material	Direção do Fluxo	Condições de operação	Preparo Emulsão	Eficiência
Lu <i>et al.</i> (2016) China	Fibras comerciais oleofílicas de: - politetrafluoretileno (teflon) (PTFE) - fibras de aço inoxidável	Horizontal com dois estágios	Velocidade: 0,6 – 1,7 m/min Escala industrial: 0,9 m/min Comprimento do leite: 10 e 20 cm Alimentação: 600 – 700 mg/L	Óleo diesel+ água de torneira. Um emulsionante de dodecil sulfato de sódio (SDS; ECUST, China) na proporção de agente tensioativo ao óleo de 1: 5.000 em peso.	Até 99,7%
Sokolović, Govedarica e Sokolović (2010) Sérvia	Fibras de Poliuretano (PU) PU + Granulado de Poliestireno Expandido (EPS)	Horizontal Vertical	Vertical : 7 m/h Horizontal: 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60 m/h Alimentação: 500 mg/L	14 amostras de óleos com características diferentes	Maiores que 94,6%

Quadro 1 – Resumo dos artigos de coalescedores em leite.

Artigo	Material	Direção do Fluxo	Condições de operação	Preparo Emulsão	Eficiência
Motta (2014) Brasil	Grãos de Polietileno de Alta densidade Resinas Catiônicas	Vertical Regime transiente	Velocidade: 4,4, 8,7 e 17,4 m/h Comprimento do leite: 5 e 8 cm Alimentação: 200 e 400 mg/L	Emulsão de petróleo bruto com grau API de 28,3° em água	35 – 52%
Šećerov Sokolovic; Govedarica, D. D.; Sokolović (2014) Sérvia	- Poliuretano (PU) - Polipropileno (PP) - Polietileno Tereftalato (PET) (duas qualidades BA1 e PE)	Horizontal Regime estacionário	Velocidade: 19 – 80 m/h Comprimento do leite: 5 cm Porosidade: 0,85 – 0,97 Alimentação: 500 mg/L	4 óleos diferentes (óleo bruto (A), as duas frações de destilação (A1, A4), e um produto de petróleo misturado com alto teor de parafina (P1))	3 – 50 mg/L Melhor material: PU

Quadro 1 – Resumo dos artigos de coalescedores em leite.

Artigo	Material	Direção do Fluxo	Condições de operação	Preparo Emulsão	Eficiência
Li; Gu (2005) Canadá	- Fibras de polipropileno - Fibras de nylon - Grãos de polipropileno	Horizontal	Velocidade: 3,6 – 5,4 m/h Comprimento do leite: 20, 40 e 70 cm Alimentação: 2000, 5000 e 10000 ppm	Óleo bruto, óleo mineral + água de torneira emulsificante octilfenoxipolietoxietanol	
Ma; Kang; Cui (2014)	Microfibras de vidro	Vertical	Vazão: 3,6 – 86,4 L/h Comprimento do leite: 2 – 20 mm Porosidade: 0,850 – 0,925 Alimentação: 200 - 3000 mg/L	Óleo Diesel + água deionizada	96.4–99.8%

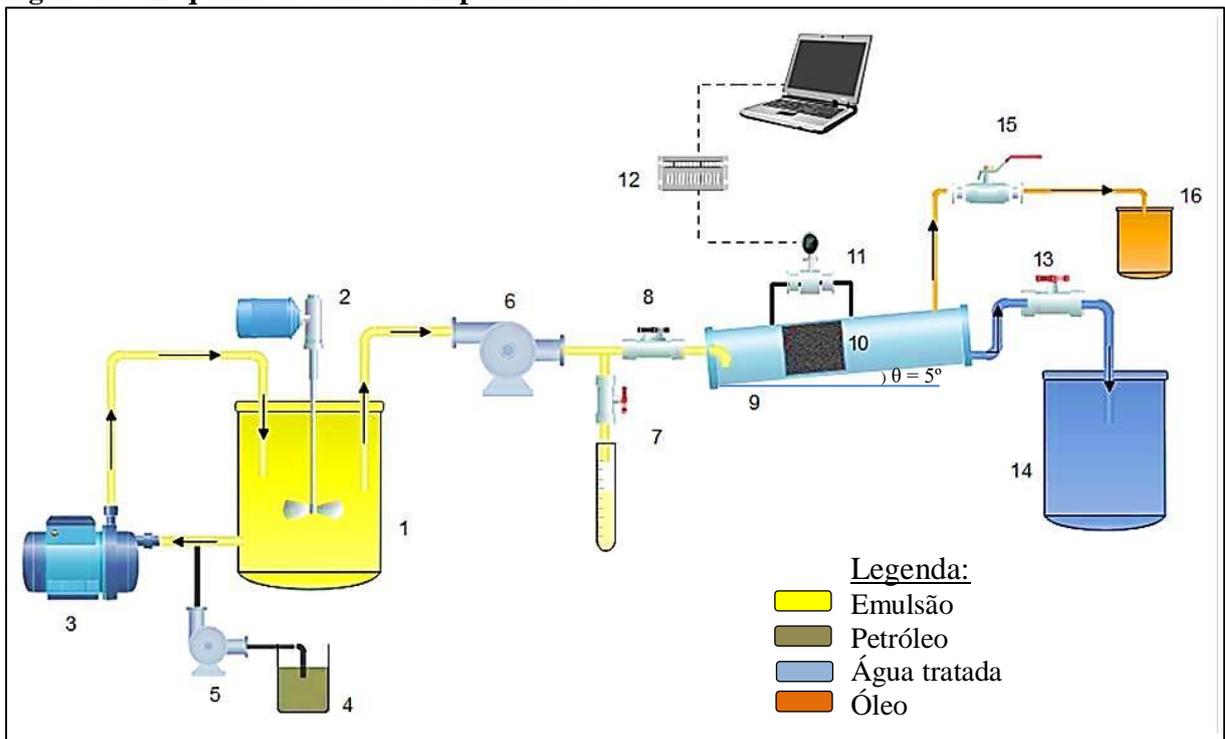
Fonte: Autor (2017)

4 METODOLOGIA

4.1 Unidade Experimental

Os experimentos foram realizados em um coalescedor com leito horizontal, onde foram testados dois materiais, fibras de coco seco e esponja fibrosa de material sintético, operando em regime estacionário. A unidade experimental está esquematizada na Figura 14 e é composta por uma unidade geradora de emulsão, um equipamento coalescedor em leito e tanques para separação das fases. A unidade está localizada no Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), Campus A. C. Simões, Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

Figura 14 - Esquema da Unidade Experimental.



Fonte: Autor (2017).

A emulsão de petróleo em água é preparada em um tanque de aproximadamente 150 L (1), onde um agitador mecânico (Fisatom, modelo 723) (2) e a recirculação com uma bomba centrífuga (Schneider Motobombas, modelo BCR-2000 1/3CV) (3) promove a dispersão dos hidrocarbonetos de petróleo na água. O petróleo (4) é dosado a partir de uma bomba peristáltica (Masterflex, modelo 7553-75) (5) em uma derivação a montante da bomba

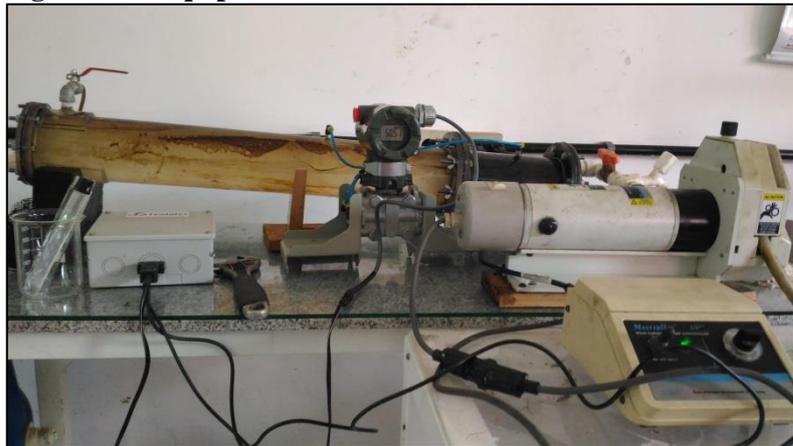
centrífuga, que ao passar pelo rotor da bomba já inicia a dispersão. Uma segunda bomba peristáltica (Masterflex, modelo 7591-55) (6) introduz a emulsão no coalescedor.

A válvula 7 é utilizada para fazer a amostragem da alimentação, e só é aberta neste instante, enquanto que a válvula 8 é a de alimentação e deve permanecer sempre aberta, sendo fechada apenas no momento de coleta das amostras. O coalescedor horizontal (9) tem uma pequena inclinação de cerca de 5°, a emulsão introduzida no coalescedor, atravessa o leito de fibras (10) e promove a coalescência das gotículas de óleo. Um transmissor de pressão diferencial (Yokogawa, modelo EJA110A) (11) mede a queda de pressão do fluxo antes e após passar pelo leito. O transmissor está conectado a um condicionador de sinal (12) que envia os dados da pressão diferencial, a cada décimo de segundo, para um computador, onde é feita a aquisição dos dados e o armazenamento em planilhas. Ao deixar o leito, as gotas maiores de óleo coalescidas sobem para o topo do equipamento, por ser menos denso que a água, e há a separação das fases óleo e água.

O efluente tratado é descarregado continuamente pela parte inferior com controle da vazão realizado pela válvula gaveta de ½” (13) e armazenado no recipiente (14). Enquanto que o óleo separado deve ser descarregado descontinuamente pela parte superior e tem a vazão controlada pela válvula esfera ¼” (15), sendo armazenado no recipiente (16).

A figura 15 mostra o sistema do equipamento coalescedor em leito em operação.

Figura 15 – Equipamento coalescedor em leito.



Fonte: Autor (2017).

4.2 Projeto e Construção do Coalescedor

A construção do coalescedor em leito foi uma das primeiras etapas do presente trabalho. Foi construído no LASSOP utilizando um tubo cilíndrico de acrílico transparente

com dimensões de 87 cm de comprimento total com diâmetro interno de 9,4 cm e externo de 10,0 cm. Para a construção do coalescedor foi realizada um levantamento bibliográfico dos coalescedores em leito e a leitura de manuais de design para entender o objetivo e a distância necessária para cada uma das partes (seção 3.5.2.1). Duas bases de madeira foram posicionadas para que se tenha uma inclinação com cerca de 5° no coalescedor, o que contribui para o acúmulo de óleo gradual de óleo na parte superior. A figura 16 mostra o projeto inicial do equipamento coalescedor.

Figura 16 - Projeto inicial do equipamento coalescedor.



Fonte: Autor (2016).

O coalescedor foi dividido em duas seções, a primeira seção do equipamento possui 20 cm, e é unida a segunda seção por um par de flanges. Essa divisão auxilia a limpeza do equipamento e substituição e manuseio dos leitos. As flanges foram construídas a partir de placas de acrílico, onde foram cortadas na forma circular utilizando uma furadeira de bancada e acessórios (figura 17).

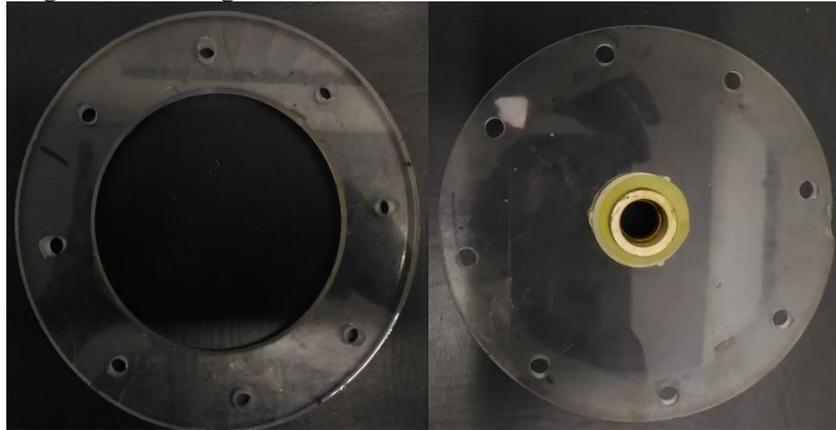
Figura 17 - Fabricação da flange.



Fonte: Autor (2016).

Nas flanges foram feitos 8 furos simétricos para colocar os parafusos. Cada extremidade do equipamento possui uma flange cega. No total foram construídas 6 flanges, onde 2 dessas eram flanges cegas. A figura 18 mostra os dois tipos de flanges fabricadas, onde a da direita é a flange cega.

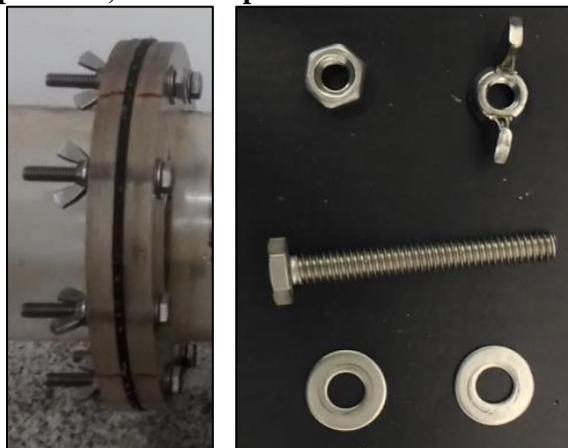
Figura 18 - Flanges.



Fonte: Autor (2016).

O conjunto porca, parafuso e duas arruelas são utilizados para unir as peças e entre cada par de flanges foi colocado uma junta de borracha para garantir a vedação (figura 19). As porcas borboletas foram usadas na união das seções, já que facilita a abertura e fechamento das peças.

Figura 19 - (a) Par de flanges unidas e (b) parafuso, arruelas e porcas.



Fonte: Autor (2017).

Os tubos são conectados ao equipamento através de furos feitos nas flanges cegas ou na própria estrutura do equipamento. Após a construção do equipamento, foram feitos testes hidráulicos para detectar vazamentos e algumas adaptações foram feitas.

4.3 Preparo da Emulsão

Petróleo e água de torneira são utilizados para o preparo da emulsão de água produzida sintética com concentração média de 400 mg/L, onde a fase dispersa é o óleo. O tanque é preenchido com a água enquanto o petróleo é bombeado em quantidade necessária para alcançar a concentração desejada. A temperatura de trabalho foi a ambiente de cerca de 24°C. O petróleo é dosado a partir de uma bomba peristáltica com uma vazão de 5mL/min, em uma derivação antes da bomba de recirculação, que tem como objetivo permitir uma melhor agitação e cisalhamento da mistura água óleo. A emulsão foi continuamente agitada no decorrer do experimento tanto pelo agitador mecânico como pela recirculação com uma bomba centrífuga.

O preparo da emulsão foi baseado no trabalho Maiti *et al.*, (2011) que verificou que dosagem ótima de emulsificante é de 1% volume. A adição de cerca de 1,2g do emulsificante Lauril Sulfato de Sódio 27% ao petróleo e de 40g de NaCl na água em cada preparo de emulsão favorece a estabilização. A figura 20 mostra o preparo da emulsão.

Figura 20 - Preparo da emulsão.



Fonte: Autor (2016).

A estabilização da emulsão foi acompanhada por um teste de proveta durante 24 horas, onde em dados intervalos de tempo era feita a análise do TOG para avaliar a separação do óleo presente na emulsão pela coalescência natural.

4.4 Condições e Operação do Coalescedor

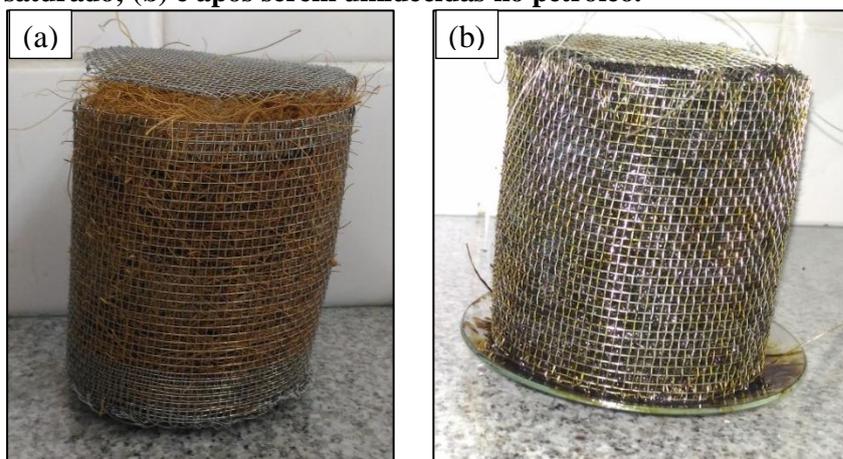
As condições escolhidas para o estudo do leito coalescente foram baseadas no levantamento bibliográfico realizado e apresentado na seção 3.5.2 e no resumo do quadro 1. O leito foi estudado em três diferentes comprimentos: 5, 10 e 15 cm. A vazão de entrada é regulada pela bomba peristáltica, que é ajustada, previamente, para a vazão desejada. As vazões estudadas foram de 60, 85, 110 e 180 L/h, que corresponde, respectivamente, às velocidades superficiais, em relação ao diâmetro do equipamento coalescedor, de 8,7; 12,3; 15,9 e 25,9 m/h.

O leito com a fibra a ser utilizada em cada experimento é suportado em um cesto cilíndrico feitos com tela de aço inoxidável com aberturas de 2 mm. Os cestos foram feitos em um diâmetro mais próximo possível do diâmetro interno do coalescedor, de forma que ficassem juntos a parede interna do coalescedor e a altura da tela correspondente a do leito a ser utilizado. Foram preparados dois tamanhos de leito, um de 5 e um de 10 cm, visto que, para o leito de 15 cm, os dois leitos preparados eram usados juntos em série. O topo e a base do leito foram fechados com a mesma tela.

A fibra foi inserida no cesto em pequenas porções, de forma a manter a uniformidade no leito, empacotada e pesada em uma balança analítica para o cálculo da porosidade, que foi mantida constante em todos os ensaios. Em seguida, o cesto com a fibra compactada é mergulhado em petróleo para promover a saturação do leito.

Os estudos foram avaliados em estado estacionário, logo, as fibras do leito foram pré-umidecidas no petróleo por alguns minutos. Com o leito fibroso saturado instalado no coalescedor, a bomba peristáltica é acionada e a emulsão começa a fluir para o coalescedor com a vazão previamente programada na bomba. A direção do fluxo é horizontal. A emulsão entra no coalescedor e passa pelo leito coalescente, seguindo até a extremidade oposta a entrada, onde a água tratada é descarregada em um tanque. A válvula de saída de óleo é mantida fechada, pois o acúmulo de óleo durante o experimento é pequeno, não necessitando de descargas. A figura 21 mostra o leito de fibra de coco compactado no cesto antes e após ser saturado.

Figura 21 - (a) Fibras de coco compactadas no cesto antes de ser saturado; (b) e após serem umedecidas no petróleo.



Fonte: Autor (2016).

As condições de operação (vazão, comprimento do leito e material) foram mantidas fixas durante 45 minutos, e amostras do afluente de entrada e do efluente de saída foram coletados de 15 em 15 minutos e analisados quanto ao TOG. Com esses resultados, a eficiência de separação e a média do TOG foram calculadas. O diferencial da pressão foi acompanhado pelo instrumento medidor e pela geração de planilhas com os dados.

Foram realizadas 24 corridas seguindo o seguinte esquema do quadro 2:

Quadro 2 - Esquema com os experimentos realizados e suas condições de operação.

(continua)

Material	Comprimento do leito	Vazão (L/h)
Coco	5 cm	60
		85
		110
		180
	10 cm	60
		85
		110
		180
	15 cm	60
		85
		110
		180

Quadro 2 - Esquema com os experimentos realizados e suas condições de operação.

		(conclusão)
Esponja de material sintético com abrasivo	5 cm	60
		85
		110
		180
	10 cm	60
		85
		110
		180
	15 cm	60
		85
		110
		180

Fonte: Autor (2017).

Como respostas do processo foram observadas o TOG de saída e o diferencial da pressão de cada experimento.

4.5 Propriedades dos Fluidos

Neste trabalho foram feitos estudos utilizando uma emulsão de petróleo em água como água produzida sintética. O petróleo utilizado neste trabalho foi fornecido pela PETROBRAS, unidade Alagoas.

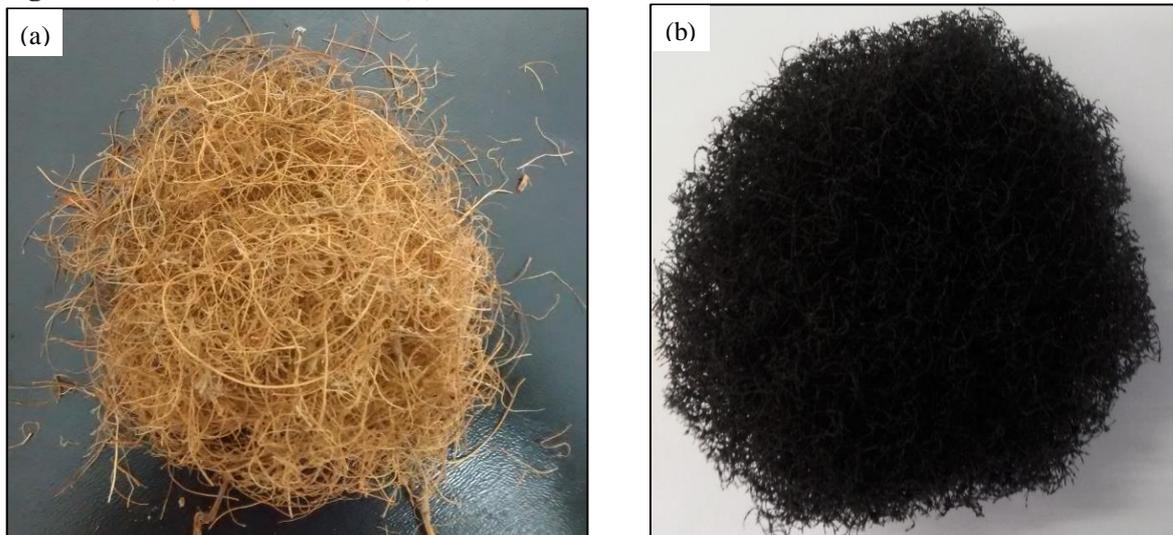
O petróleo foi caracterizado quanto à densidade e à viscosidade. O Viscosímetro CT 52, fabricado pela SCHOTT (figura 22), foi utilizado para medição da viscosidade cinemática do óleo a 35°C, utilizando um capilar de nº 200. As densidades da água e do petróleo foram determinadas a partir de um picnômetro de 25 mL a 24 °C, realizada em triplicata. O pH da emulsão e da água foram determinadas a partir de um pHmetro digital.

Figura 22 - Viscosímetro CT 52.

Fonte: Autor (2017)

4.6 Propriedades das Fibras e do Leito

Dois diferentes materiais fibrosos foram utilizados, fibras de coco seco e fibras sintéticas com material abrasivo Scotch-Brite™ fabricadas pela 3M (figura 23), também conhecidas como fibraço. A fibra de coco foi obtida desfibrando a casca de coco seco em um desfibrador e a fibra sintética é comercialmente vendida como esponja de limpeza. O diâmetro das fibras foi determinado utilizando um paquímetro e a densidade das fibras a partir do deslocamento da água em uma proveta.

Figura 23 - (a) Fibras de coco e (b) fibras sintéticas com material abrasivo.

Fonte: Autor (2016).

Esses dois materiais foram escolhidos por apresentarem uma boa adsorção de óleo que foi verificada por testes, mergulhando em um recipiente com óleo e água, observou a capacidade de adsorção dos materiais.

A porosidade do leito (ε) foi calculada a partir da equação 3 e mantida constante nos experimentos em função da massa de fibras (m_F) usada nos leitos:

$$\varepsilon = \frac{V_L - V_F}{V_L} \quad (3)$$

Onde, V_L é o volume aparente do leito e V_F é o volume da fibra usada no leito e são calculados pelas equações 4 e 5:

$$V_L = S_L \cdot H_L \quad (4)$$

$$V_F = \frac{m_F}{\rho_F} \quad (5)$$

Onde, S_L é a área da seção transversal do leito, H_L é o comprimento do leito, m_F é massa da fibra usada no leito e ρ_F é a massa específica do material fibroso.

As amostras de fibra de coco e fibra sintética foram caracterizadas pela análise termogravimétrica (TG) para observar as temperaturas em que ocorre a perda de massa do material. Essas análises foram feitas utilizando o analisador térmico da marca Shimadzu DTG-60, com fluxo de 50 mL/min de ar, na faixa de temperatura de 29 a 600°C e com taxa de aquecimento de 10°C/min. Para a fibra sintética foi realizada também análise elementar por Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio X (EDX) utilizando o equipamento EDX-7000 da Shimadzu, no Laboratório de Tecnologia de Nanossistemas Carreadores de Substâncias Ativas – TecNano – da Escola de Enfermagem e Farmácia da (ESENFAR) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

4.7 Análises de TOG

A leitura do teor de óleos e graxas (TOG) foi realizada utilizando o método de espectrofotometria de absorção molecular. O espectrofotômetro utilizado foi o da marca Hach, modelo DR 2700 (figura 24), com faixa de comprimento de onda de 400 – 900 nm. O

óleo presente nas amostras do afluente e do efluente foi extraído utilizando o hexano como solvente extrator, numa proporção de 25 mL de amostra para 15 mL de solvente. A leitura no espectrofotômetro foi realizada utilizando comprimento de onda de 400 nm. Para utilizar este método foi construída uma curva padrão de calibração, onde foram preparadas amostras de TOG com valor teórico conhecido utilizando o mesmo petróleo usado no preparo da água produzida sintética. O resultado da leitura é dado em absorbância. Utilizando como branco (amostra de referência) o Hexano PA antes de iniciar as leituras.

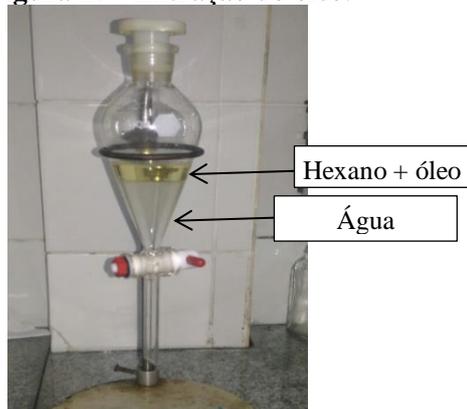
Figura 24 - Espectrofotômetro DR2700.



Fonte: Autor (2016).

A extração do óleo presente nas amostras colhidas durante o experimento foi realizada utilizando um funil de separação. A amostra de água contendo óleo foi transferida para o funil, onde é adicionado o solvente extrator hexano e o sistema é agitado. Em seguida, foi deixado em repouso e observado a separação das fases hexano+óleo e água (figura 25). A água é drenada e o hexano+óleo é recolhido e colocado em uma cubeta para realizar a medição da absorbância.

Figura 25 - Extração do óleo.



Fonte: Autor (2016).

Com a curva padrão é possível correlacionar os valores de absorvância das soluções de petróleo + hexano com o valor da concentração de óleo e graxas (TOG).

4.7.1 PROCEDIMENTO DE CONSTRUÇÃO DA CURVA PADRÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO

- Preparo das Soluções Padrões: Inicialmente, foi preparada uma solução padrão de petróleo em hexano com concentração próxima de 1000mg/L. A partir desta solução foram feitas diluições próximas de 25, 50, 100, 200, 300, 500 e 750. A leitura do hexano puro também foi realizada, representando a amostra de referência ou o branco com concentração de 0 mg/L.
- Leitura das Amostras Padrões: As leituras no espectrofotômetro foram realizadas utilizando comprimento de onda de 400 nm, apresentando como resultado o valor da absorvância. A tabela 5 apresenta os valores da concentração de óleo (TOG) das amostras relacionadas à absorvância:

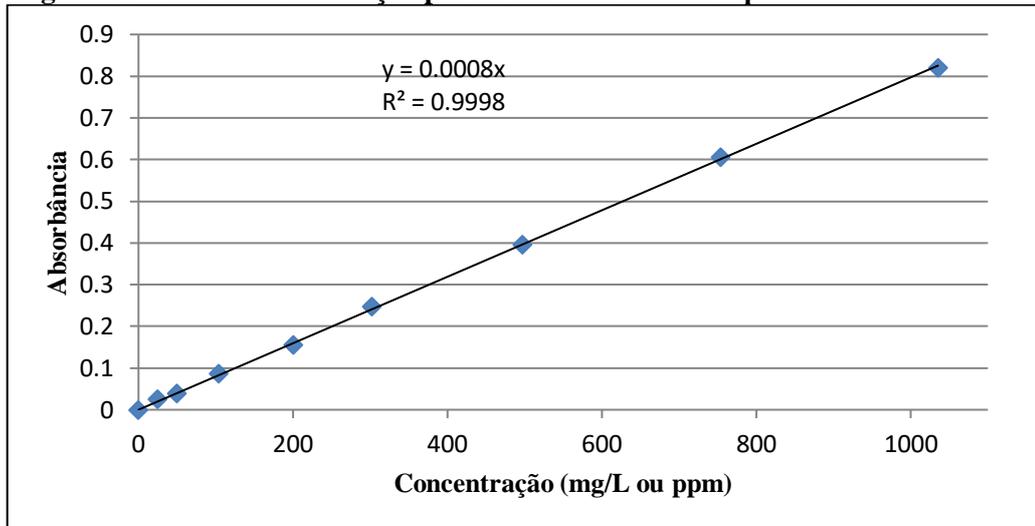
Tabela 5 - Leitura das absorvâncias das soluções padrões preparadas com hexano e petróleo.

Concentração (mg/L)	Absorvância
0	0
24,8496	0,025
49,6992	0,039
103,5400	0,086
200,3676	0,155
302,3368	0,248
496,9920	0,396
753,7712	0,606
1035,4000	0,820

Fonte: Autor (2017).

- Construção da curva de calibração: Com os valores das concentrações e sua respectiva absorvância foi construído o gráfico da figura 26. Aos pontos plotados adicionou uma curva de tendência e a equação da reta.

Figura 26 - Curva de calibração para o solvente hexano + petróleo em $\lambda=400\text{nm}$.



Fonte: Autor (2017).

A curva apresenta coeficiente de correlação de dados “R” muito próximo de 1, o que indica que o ajuste da curva foi bom e que a equação $y=0,0008x$, onde y é a absorbância e x é a concentração de óleos e graxas (TOG), pode ser utilizada para calcular o TOG em função do valor da absorbância indicado no espectrofotômetro. No entanto, é necessário multiplicar a absorbância por $3/5$ de forma a corrigir o TOG, já que a proporção usada foi de 3:5 (15 mL de hexano para 25 mL de amostra). Logo, o resultado da leitura do espectrofotômetro, dado em absorbância, é utilizado para calcular o TOG a partir da equação 6.

$$TOG = \frac{Absorbância}{0,0008} \cdot \frac{3}{5} \quad (6)$$

4.8 Eficiência de Remoção do Óleo

Os resultados foram analisados com base na eficiência de separação. A eficiência do coalescedor foi calculada a partir da concentração de óleos e graxas do afluente de entrada ($C_{afluente}$) e do efluente de saída ($C_{efluente}$), a partir da equação 7:

$$Eficiência = \frac{C_{afluente} - C_{efluente}}{C_{afluente}} \cdot 100\% \quad (7)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros avaliados nos experimentos foram a eficiência de remoção do óleo presente na emulsão, o TOG da água tratada e a queda de pressão.

Durante os experimentos foram avaliados os TOGs da emulsão na corrente de alimentação e da água tratada na saída do coalescedor. Foram feitas 3 análises para cada corrente, de 15 em 15 minutos, constatou-se que os valores do TOG da alimentação não eram constantes, ainda que o procedimento de preparo da emulsão tenha sido o mesmo para todos ensaios. Na corrente de saída, esses valores foram bem mais próximos um dos outros. De um ensaio para o outro variaram, mas mantendo em torno de 300-600 ppm, e nas velocidades de fluxo mais baixas, em que o tempo de residência nos tubos que levam a emulsão do tanque ao coalescedor foi maior, o TOG da alimentação apresentou os menores valores. Como não foi possível manter a concentração de alimentação constante, os gráficos dos resultados são apresentados com o desvio padrão e a média das medidas. Motta (2014) também observou esse fato em seu trabalho e justificou que o óleo adere às paredes internas dos tubos e retornam ao seio da dispersão.

Outro fato observado foi o acúmulo de óleo antes do leito, esse fato foi comentado também no trabalho de Šećerov Sokolović; Vulić; Sokolović, S. M. (2006) em um coalescedor horizontal e atribuiu às forças hidrodinâmicas e flutuantes que agem desde a entrada do fluido no equipamento em planos diferentes e que podem provocar choque entre as gotas resultando na coalescência e separação. A geometria inclinada do equipamento pode contribuir também com esse acúmulo, onde as gotas que coalescem no início do leito, ao invés de seguirem ao longo do leito, retornem para o começo. A figura 27 mostra o acúmulo de óleo antes do leito.

Figura 27 - Acúmulo de óleo antes do leito.



Fonte: Autor (2017).

Os resultados dos ensaios com o coalescedor de leite utilizando as duas fibras se encontram nas tabelas do apêndice A.

5.1 Caracterização dos fluidos

Esta seção apresenta os resultados da caracterização do petróleo, da água da torneira utilizada no preparo da emulsão e da emulsão. Estes resultados são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Características do petróleo, da água da torneira e da emulsão.

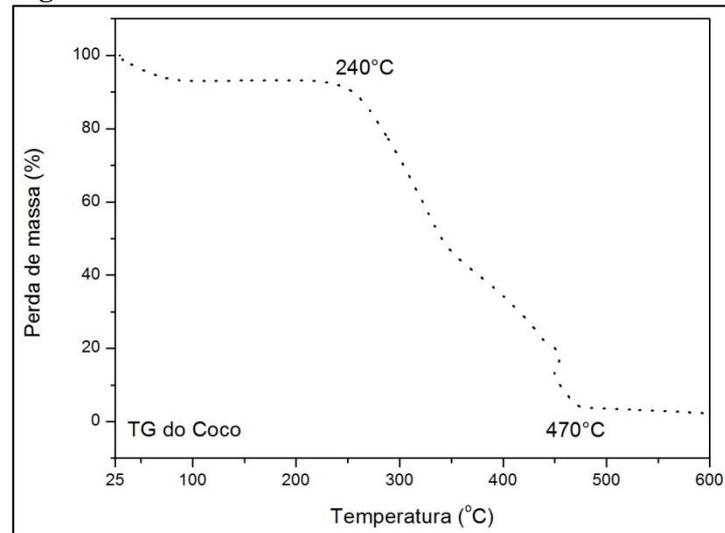
Fluido	Características	Método	Resultado
Petróleo	Massa específica à 24°C	Picnometria	0,825 g/cm ³
	Viscosidade cinemática à 35°C	Viscosímetro	9,88 cSt
	Viscosidade dinâmica		8,17 cP
Água da torneira	Massa específica à 24 °C	Picnometria	0,998 g/cm ³
	pH	pHmetro	5,8
Emulsão (água produzida sintética)	pH	pHmetro	6,7-7,2
	TOG	Espectrofotometria	300 – 500 ppm

Fonte: Autor (2017).

5.2 Caracterização das fibras e do leite

As fibras de coco seco e sintética com material abrasivo foram caracterizadas quanto a densidade e diâmetro da fibra, além de análise termogravimétrica para determinar a temperatura de degradação da massa. Para uma análise mais detalhada da fibra sintética foi feito o EDX que apresenta uma análise elementar dos átomos inorgânicos presentes na amostra e seus respectivos percentuais.

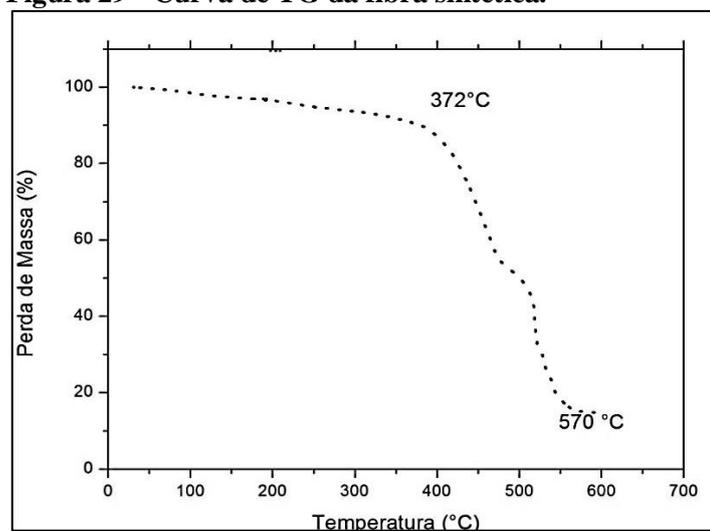
A propriedade térmica dos materiais utilizados é importante na discussão da viabilidade da utilização como leitos coalescedores. Foram feitas análise termogravimétricas para verificar as temperaturas em que ocorre a perda de massa do material. As figuras 28 e 29 apresentam as curvas de TG da fibra do coco e da fibra sintética, respectivamente, mostrando a variação da massa em relação a temperatura aplicada.

Figura 28 - Curvas de TG da fibra de coco.

Fonte: Autor (2017).

A partir da curva de TG da figura 28 é possível observar a mudança do peso da amostra em função da temperatura. Os resultados da curva mostraram que a degradação dos componentes da fibra de coco inicia na temperatura de 240 até 470 °C, onde o percentual de massa final é de aproximadamente 4%. De 25 a 100°C tem um leve perda de massa que corresponde à água que pode estar presente na fibra. O primeiro componente a se degradar na análise termogravimétrica do coco é a hemicelulose, seguida da celulose e por fim da lignina (ALIAS *et al.*, 2014).

A figura 29 apresenta a curva de TG da fibra sintética.

Figura 29 - Curva de TG da fibra sintética.

Fonte: Autor (2017).

Pela curva da figura 29, observa-se que a perda de massa da fibra sintética inicia-se na temperatura de 372 °C. Na temperatura de cerca de 570 °C, a massa de fibra é de 15% da inicial. Como o estudo do TG foi até 600 °C, provavelmente o restante da massa corresponde a outro composto presente na fibra que deve ter temperatura de degradação de massa maior que os 600°C.

A caracterização das fibras quanto ao diâmetro, à massa específica e ao ponto de fusão são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Características das fibras de coco e da fibra sintética.

Características	Fibra de Coco	Fibra Sintética	Método
Diâmetro (µm)	180 – 340	360	Micrômetro
Massa específica (g/cm³)	0,8259	1,0249	Princípio de Arquimedes
Ponto de Fusão (°C)	240 - 470	372 - 570	Termogravimetria

Fonte: Autor (2017).

Os leitos foram caracterizados quanto à porosidade e densidade. Os materiais foram pesados antes de serem inseridos no leito de forma que a porosidade fosse constante. A tabela 8 apresenta as características dos leitos de coco e de fibra sintética.

Tabela 8 - Características dos leitos de coco e de fibra sintética.

Características	Fibra de Coco	Fibra Sintética	Método
Porosidade	0,944	0,944	Equação 3
Densidade (Kg/m³)	47	59	$\frac{\text{Massa de fibra}}{\text{Volume do leito}}$

Fonte: Autor (2017).

Para fibra sintética utilizada no leito foi realizada a análise de EDX que trata-se da espectroscopia de raio X por dispersão de energia, onde os átomos presentes na amostra geram raios X característicos e que possuem comprimento de onda e energia específicos. O resultado da análise de EDX da fibra sintética é apresentado na tabela 9,

Tabela 9 - Resultados da análise de EDX da Fibra Sintética.

Componente	Resultados (%)
Al	71,182
Ti	12,333
Si	4,047
Ca	2,996
Fe	2,518
Zr	2,008
K	1,139
Mn	1,079
Cu	0,804
P	0,786
Cr	0,456
S	0,361
Sr	0,170
Os	0,123

Fonte: Autor (2017).

O resultado da análise de EDX mostra que esta fibra é rica em compostos de alumínio, apresentando concentração maior que 70%. Em menores proporções há a presença de composto com titânio (12,333%), silício (4,047%), cálcio (2,996%), ferro (2,518%), zircônio (2,008%) e outros em proporção menores. O composto de alumínio presente na fibra é, conforme descrição do fabricante, o abrasivo óxido de alumínio.

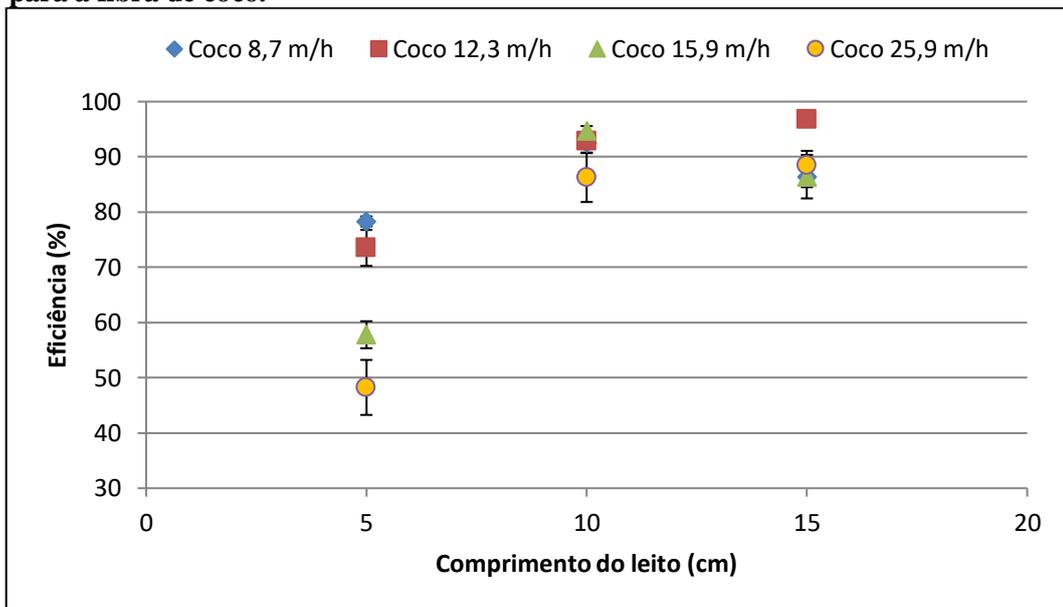
5.3 Efeito do Comprimento do Leito

O comprimento do leito é uma das variáveis que influenciam na eficiência do processo. Neste trabalho foram estudados três comprimentos de leito, 5, 10 e 15 cm com 4 diferentes vazões, baseado na revisão bibliográfica realizada, o comprimento ótimo encontrado por alguns autores estava neste intervalo de comprimentos. Para todos os comprimentos dos leitos, a porosidade foi mantida constante em 0,944.

Leito de Fibra de Coco

A figura 30 apresenta o gráfico do comprimento do leito versus a eficiência do processo de separação por coalescência para a fibra do coco com a barra representando o desvio padrão da eficiência de cada ensaio, onde cada símbolo representa uma velocidade:

Figura 30 - Gráfico da influência do comprimento do leito na eficiência do processo para a fibra de coco.



Fonte: Autor (2017).

A partir da figura 30, percebe-se que o aumento do comprimento do leito resultou, em geral, no aumento da eficiência, principalmente, entre os leitos de 5 e 10 cm e nas maiores velocidades superficiais de fluxo, onde essa melhora na eficiência foi mais visível onde a diferença da eficiência foi de cerca de 37%. Quando o leito excedeu o comprimento de 10 cm, observa-se que a melhora da eficiência foi menos significativa. Como Li; Gu (2005), Ma; Kang; Cui (2014), Šećerov Sokolović; Vulić; Sokolović, S. M. (2007) já haviam comentado em seus trabalhos, o aumento da eficiência com relação ao comprimento do leito tem um certo limite, o chamado comprimento ótimo, onde excedido este comprimento a eficiência permanece praticamente a mesma, ou seja, é o mínimo comprimento de leito que alcança altas eficiências. Dessa forma, a eficiência de coalescência é diretamente proporcional ao comprimento do leito até o comprimento ótimo. Para a fibra de coco seco nas condições estudadas, observando o gráfico, o comprimento ótimo do leito, dentre os três, foi o de 10 cm.

A melhor eficiência foi observada no leito de 15 cm com velocidade de fluxo de 12,3 m/h, que corresponde a vazão de 85 L/h, com eficiência de remoção de 96,7%, enquanto que

o pior resultado foi observado na combinação do menor comprimento de leito (5 cm) com a maior velocidade estudada (25,9 m/h ou 180L/h) com eficiência de 48,3%. O desvio padrão médio das eficiências foi de 2,34%.

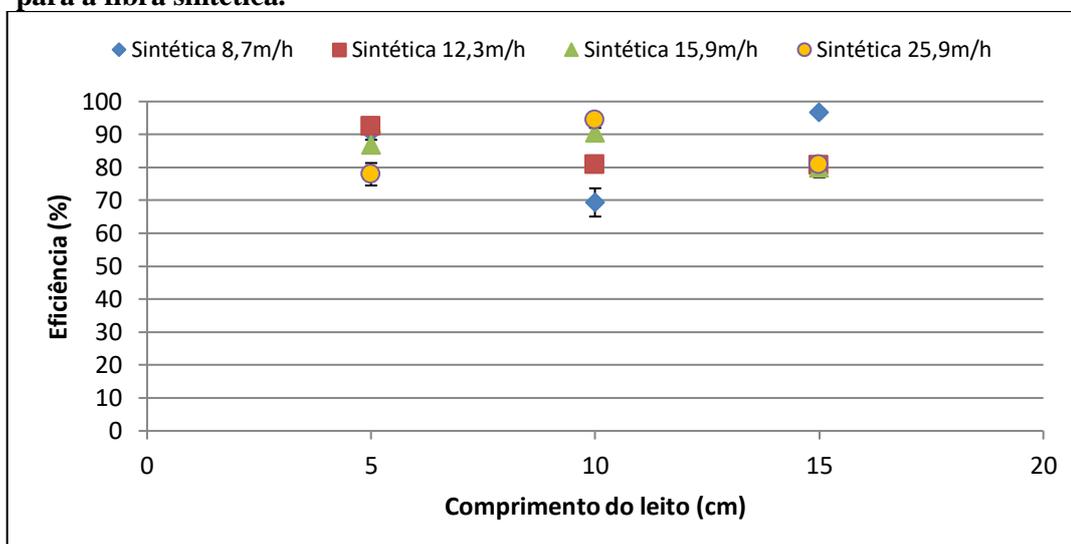
Maiores comprimento de leito significa maior área de contato, maior tempo de residência, maior volume de poros, o que resulta em maiores chances das gotas serem capturadas pelas fibras do leito, e com isso, o aumento no grau de coalescência das gotas. No entanto, leitos maiores tendem a provocar maior queda de pressão o que pode resultar na redispersão das gotas diminuindo, assim, a eficiência (SAREEN *et al.*, 1966).

Considerando a legislação vigente no Brasil para o descarte de água produzida no mar, a resolução CONAMA 393/2007, em que a concentração média mensal de óleos e graxas deve ser de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L, o leito de 10 cm nas velocidades de 8,7; 12,3 e 15,9 m/h e o leito de 15 cm nas velocidades 8,7 e 12,3 m/h alcançaram resultados dentro dos limites diários exigidos pela legislação brasileira. As outras duas velocidades no leito de 15 cm ficaram tiveram resultados próximos dos 42 ppm. Enquanto que no leito de 5 cm, nenhuma das velocidades atingiu a concentração exigida.

Leito de Fibra Sintética

A figura 31 apresenta o gráfico do comprimento do leito versus a eficiência do processo de separação por coalescência para a fibra sintética, onde cada símbolo representa uma velocidade e a barra é o desvio padrão para cada medida:

Figura 31 - Gráfico da influência do comprimento do leito na eficiência do processo para a fibra sintética.



Fonte: Autor (2017).

Os pontos do gráfico da figura 31 não apresentaram uma tendência. Os resultados da eficiência ficaram próximos uns dos outros para uma mesma velocidade superficial de fluxo, o que sugere que a fibra sintética não foi sensível às mudanças de comprimento de leito para uma mesma velocidade. Não foi possível através dos resultados da eficiência nas velocidades estudadas estabelecer o comprimento ótimo, haja vista que na média a eficiência foi praticamente a mesma para todos os experimentos avaliados.

A maior eficiência foi de 96,8% no leito de 15 cm de comprimento com velocidade de 8,7 m/h, enquanto que a menor foi de 69,4% no leito de 10cm também na velocidade de 8,7 m/h. As outras eficiências ficaram entre próximas de 80 e 90%, com desvio padrão médio de 1,70%.

Com relação ao TOG na corrente de saída, este variou de 22 ppm com leito de 15 cm e velocidade de 8,7 m/h até 108 ppm com leito 15 cm e velocidade de 15,9 m/h. No leito de 15 cm, nas velocidades mais elevadas o TOG da corrente de saída foi maior do que no de 10 cm para as mesmas velocidades, isso pode ser explicado pelo fato de que leitos mais longos e velocidades mais elevadas provocam uma maior perda de carga o que pode provocar a redispersão das gotas.

Assim como foi feito para a fibra do coco, considerando o valor máximo diário de 42 mg/L, a concentração de acordo com a legislação brasileira, foi observado que no leito de fibra sintética as condições que ficaram abaixo deste limite foram: leito de 10 cm com velocidades de 15,9 e 25,9 m/h e o leito de 15 cm na velocidade de 8,7 m/h. Com o leito de 5 cm, em nenhuma das velocidades o TOG foi menor que os 42 mg/L. Um fato a ser destacado é que para a fibra sintética as condições de maiores velocidades no leito de 10 cm foram as que apresentaram TOG menores. O comprimento ótimo do leito pode ser considerado o de 10 cm, que foi o menor comprimento que atingiu o objetivo de tratar a água produzida sintética gerando um efluente com concentração de óleos menor que o exigido na legislação para o descarte no mar.

5.4 Efeito da Velocidade do Fluxo

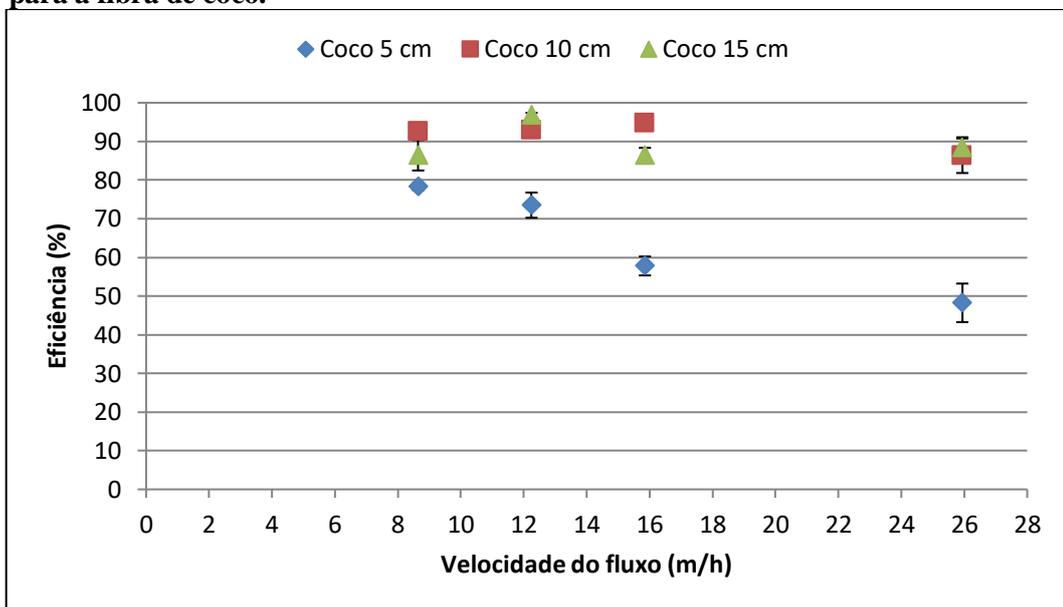
A velocidade do fluxo de alimentação do coalescedor é outra variável que influencia na eficiência do processo e que foi estudada neste trabalho. Encontrar a maior velocidade que se possa trabalhar mantendo o TOG de saída desejado, ou seja a velocidade crítica, é uma das

buscas na otimização da separação por leitos coalescedores. Foram estudadas quatro velocidades superficiais de fluxo: 8,7; 12,3; 15,9 e 25,9 m/h.

Leito de Fibra de Coco

A figura 32 mostra o gráfico do comportamento da eficiência em relação à velocidade do fluxo para fibra de coco, onde cada símbolo corresponde a um comprimento de leito.

Figura 32 - Gráfico da dependência da velocidade do fluxo na eficiência do processo para a fibra de coco.



Fonte: Autor (2017).

Como pode-se observar pelo gráfico da figura 32, de maneira geral, a eficiência diminuiu com o aumento da velocidade do fluxo. Para o leito de coco com 5 cm de comprimento, entre as velocidades de 12,3 e 15,9 m/h, o decréscimo da eficiência foi de 16%, caindo de cerca de 73% para 57%. Já no leito de 10 cm, observa-se que a eficiência de separação quase não foi afetada nas primeiras velocidades, observando-se um pequeno decréscimo, somente, entre as velocidades de 15,9 e 25,9 m/h. Esses decréscimos indicam que as velocidades críticas de separação para o respectivo material e tamanho de leito foram atingidas, ou seja, quando a velocidade de trabalho excede a velocidade crítica é observado decréscimo acentuado da eficiência de separação ou aumento da concentração de óleos na corrente de saída do efluente tratado (LU; YANG; XU; *et al.*, 2016). É a velocidade em que ocorre a redispersão das gotas de óleo (SAREEN *et al.*, 1966).

No leito de 15 cm foi observado que a maior eficiência esteve na velocidade intermediária de 12,3 m/h, com 96,8%, e que, na maior velocidade de fluxo, de 25,9 m/h, esse comprimento de leito foi o que obteve a maior eficiência com cerca de 87% de eficiência. Li e Gu (2005) obtiveram em seu trabalho maior eficiência em velocidades intermediárias. No mesmo leito de 15 cm observa-se que não houve um decréscimo acentuado na eficiência, o que leva a crer que a velocidade crítica para este comprimento de leito com fibra de coco é maior do que as foram estudadas.

Como foi comentado, a velocidade de fluxo está diretamente relacionada ao tempo de residência, que se este for rápido a gota não pode ser capturada pelo leito, ao tempo de coalescência, bem como à redispersão de gotas devido a turbulência causada pela velocidade do fluxo.

Šećerov Sokolović; Vulić; Sokolović, S. M. (2006) e Ma; Kang; Cui (2014) definiram e avaliaram em seus trabalhos a velocidade crítica como a velocidade na qual a concentração do efluente de saída excede o valor desejado. Considerando esta definição e adotando o valor desejado do TOG de saída como o limite diário de 42 mg/L exigido pela resolução do CONAMA para descarte no mar, podemos encontrar as seguintes velocidades críticas:

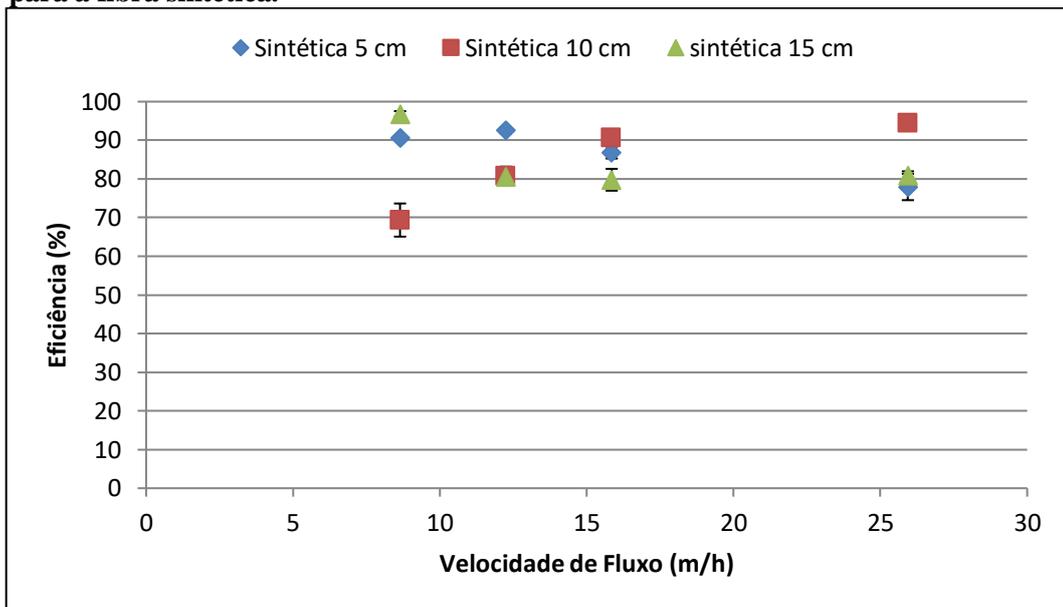
- No leito de 5 cm, a velocidade crítica está abaixo da velocidade de fluxo de 8,7 m/h, visto que em todas as velocidades estudadas TOG de saída ultrapassou os 42 ppm desejado, com concentrações maiores que 80 ppm;
- No leito de 10 cm, podemos considerar a velocidade crítica em 15,9 m/h, onde o TOG de saída ficou no limite dos 42 ppm e aumentou para 102 ppm quando na velocidade de 25,9 m/h;
- Para o leito de 15 cm, em todas as velocidades estudadas, o TOG pouco variou, ficando entre 11 e 51 ppm, o que sugere que a velocidade crítica para este comprimento de leito está próxima a velocidade de 25,9 m/h.

A velocidade ótima deve estar abaixo da velocidade crítica e para determiná-la com mais precisão deveria ser feito um estudo com mais velocidades em intervalos menores.

Leito de Fibra Sintética

A figura 33 apresenta o gráfico do comportamento da eficiência em relação à velocidade do fluxo para a fibra sintética, onde cada símbolo é um comprimento de leito e a barra corresponde ao desvio padrão.

Figura 33 - Gráfico da dependência da velocidade do fluxo na eficiência do processo para a fibra sintética.



Fonte: Autor (2017).

No gráfico da figura 33, não foi observado diferenças significativas com o aumento da velocidade. Os leitos de fibra sintética não foram sensíveis às mudanças das velocidades, permanecendo a eficiência praticamente constante. Com isso, pelas eficiências, não é possível determinar as velocidades críticas para estes leitos dentro das velocidades estudadas, já que não foi observado decréscimos acentuados da eficiência, o que supõe que as velocidades críticas cada comprimento de leito devem estar em valores acima dos estudados.

Avaliando a velocidade crítica do leito de fibra sintética, assim como foi feito com a fibra de coco, como a velocidade na qual a concentração do efluente de saída excede o valor desejado de 42 mg/L. As velocidades críticas encontradas são:

- No leito de 5 cm, com a menor velocidade de trabalho, 8,7 m/h, o TOG na corrente de saída foi de cerca de 53 ppm, portanto a velocidade crítica para este leito é uma velocidade menor que 8,7 m/h;
- No leito de 10 cm, não foi possível determinar a velocidade crítica, pois as duas maiores velocidades de fluxo, 15,9 e 25,9 m/h, foram que apresentaram TOG de

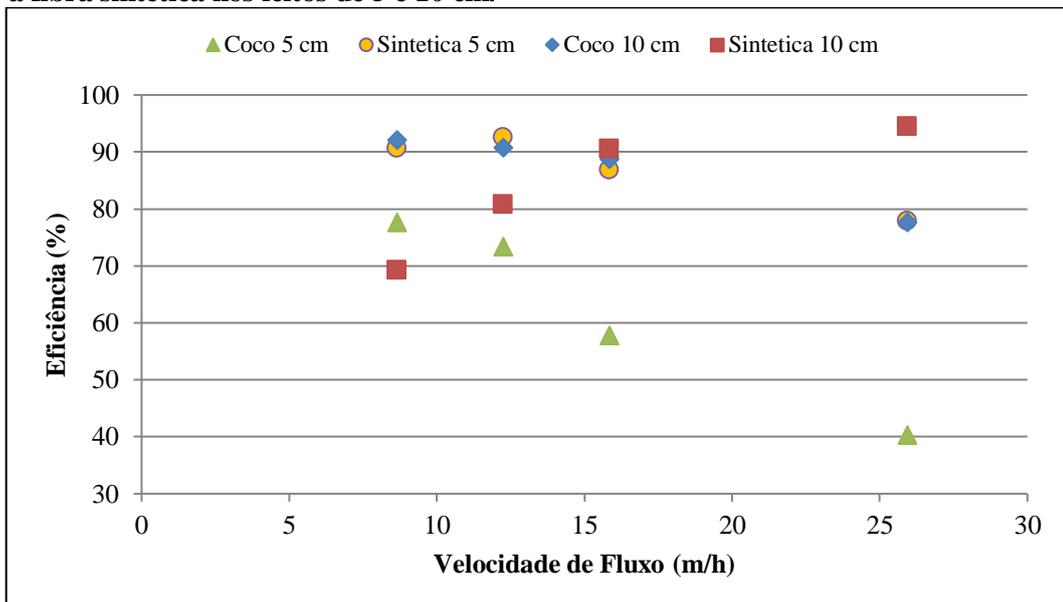
saída menores que os 42 ppm. Ou seja, o leito de 10 cm apresentou melhores resultados quanto o TOG da corrente de saída nas maiores velocidades.

- No leito de 15 cm, o TOG da corrente de saída que ficou abaixo dos 42 ppm foi com a velocidade de 8,7 m/h, o que sugere que a velocidade crítica para este leito está entre as velocidades de 8,7 e 12,3 m/h. A combinação de um comprimento de leito mais extenso com velocidade de fluxo mais elevada pode ter causado redispersão das gotas de óleo, aumentando o TOG na corrente de saída.

5.5 Efeito do material

Os dois materiais estudados, fibra de coco e fibra sintética, foram comparados quanto à eficiência de separação por coalescência do óleo presente na emulsão. Os resultados da comparação entre esses dois materiais nos leitos de 5 e 10 cm é apresentado na figura 34:

Figura 34 - Gráfico da velocidade de fluxo versus a eficiência para a fibra de coco e a fibra sintética nos leitos de 5 e 10 cm.



Fonte: Autor (2017).

Comparando os materiais estudados, a partir do gráfico da figura 34, no leito de 5 cm, observa-se pelas curvas que a fibra sintética foi mais eficiente que a fibra de coco, principalmente quando se aumentou a velocidade do fluxo e essa diferença chegou a ser de quase 40%. No leito de 10 cm, nas velocidades de 8,6 e 12,3 m/h, a eficiência da fibra de coco foi maior, essa diferença foi diminuindo com o aumento da velocidade, onde na velocidade de 25,9 m/h a eficiência da fibra sintética foi maior que a do coco. Uma observação importante é

que o comportamento da curva com o leito de 10 cm da fibra de coco foi semelhante ao da curva com o leito de 5 cm da fibra sintética. Os leitos de 15 cm não foram comparados no gráfico, visto que a variação da eficiência com a velocidade superficial de fluxo não foram significativas para ambos materiais.

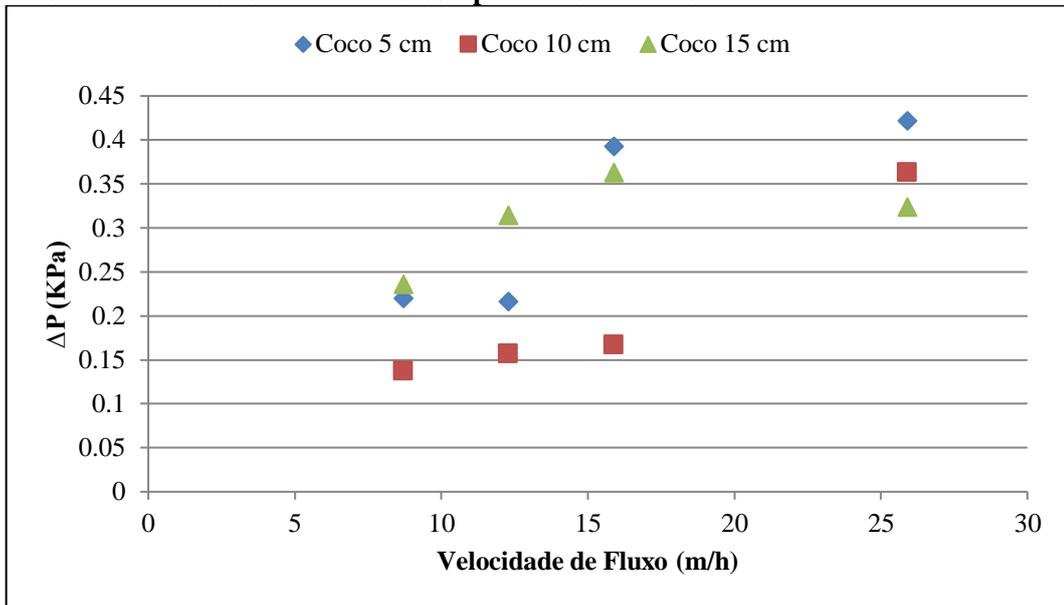
De modo geral, a fibra sintética apresentou melhores resultados de eficiência comparado com a fibra de coco, observou-se também que essa foi menos sensível à variação da velocidade, apresentando altas eficiências mesmos nas condições mais críticas, ou seja, no menor leito com maior velocidade do fluxo.

Analisando do ponto de vista econômico, o coco é um resíduo e está disponível sem custos, o uso deste material como leitos coalescentes no tratamento da água produzida representa o aproveitamento deste resíduo. O custo associado ao uso da fibra do coco está no processamento da casca do coco seco para obter a fibra, onde se tem gastos com energia. Já a esponja é vendida comercialmente como produto de limpeza com dimensões de 8,7 x 12,5 x 2,5 cm (271,88 cm³) e tem custo médio de R\$3,50. Ou seja, mesmo utilizando leitos com comprimentos maiores para a fibra de coco, estes podem ser uma alternativa mais viável economicamente e ecologicamente.

5.6 Efeito da Queda de Pressão

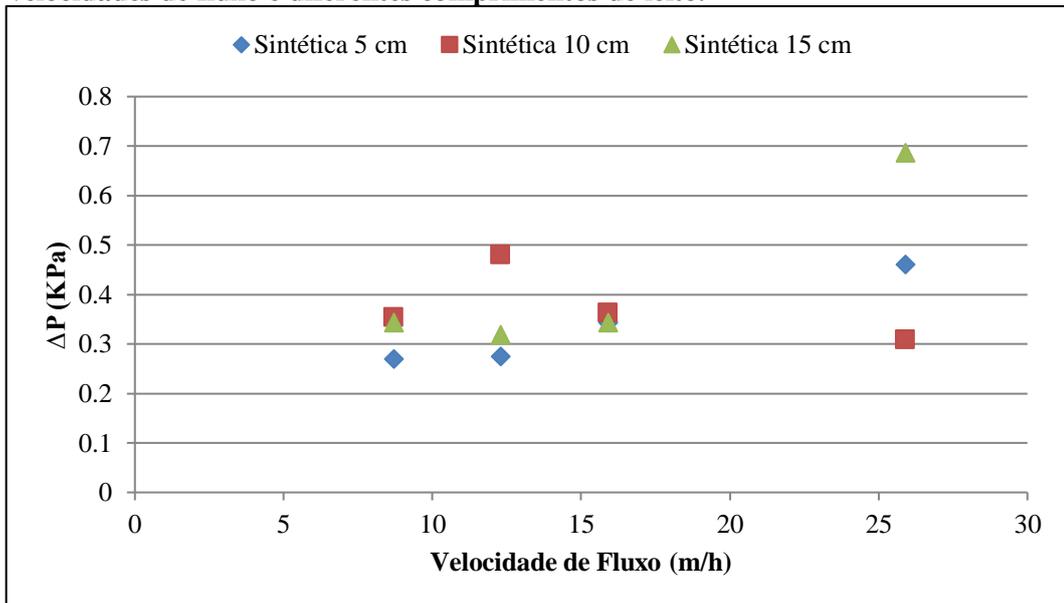
A queda de pressão no leito coalescente foi acompanhada através de um transmissor de pressão diferencial que conectado a um condicionador de sinal faziam a coleta de dados em linha, gerando ao fim dos ensaios, planilhas com os dados da queda de pressão, onde com esses dados foi calculada a média da queda de pressão para cada ensaio. As figuras 35 e 36 apresentam os gráficos com as médias da queda de pressão (ΔP) dos ensaios realizados para a fibra de coco e para a fibra sintética, respectivamente, versus a velocidade superficial do fluxo, onde cada símbolo é um comprimento de leito.

Figura 35 - Gráfico da queda de pressão do leito de fibra de coco em diferentes velocidades de fluxo e diferentes comprimentos de leito.



Fonte: Autor (2017).

Figura 36 - Gráfico da queda de pressão do leito de fibra sintética em diferentes velocidades de fluxo e diferentes comprimentos de leito.



Fonte: Autor (2017).

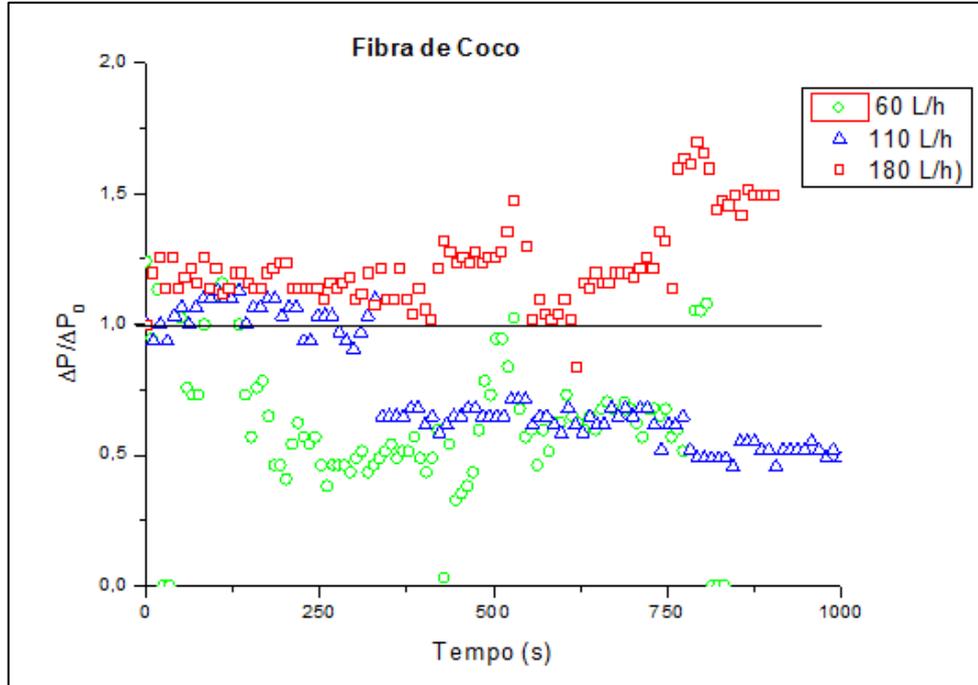
Observa-se que os diferenciais de pressões variaram de 0,13 a 0,42 KPa para o leito de fibra de coco e 0,27 a 0,69 KPa para a fibra sintética, não foi observada uma tendência no aumento da pressão. Os valores das quedas de pressão observados no trabalho de Lu, Yang, Xu *et al.* (2016) variaram de 0,23 a próximo de 0,6 KPa em um leito horizontal com porosidade de 0,8918 e 10 cm de comprimento, composto por fibras de politetrafluoroetileno

e aço inox variando nas velocidades de 36 a 72 m/h. No entanto, no trabalho destes autores a queda de pressão aumentou com o aumento da velocidade, seguindo uma tendência linear.

As quedas de pressão obtidas durante os experimentos foram baixa e não houve mudanças significativas entre um ensaio e outro, o que mostra que para as velocidades, a porosidade e os comprimentos de leitos estudados não influenciaram muito no processo. O comportamento da queda de pressão não seguiu um padrão e com a variação das velocidades quase não se observa mudança.

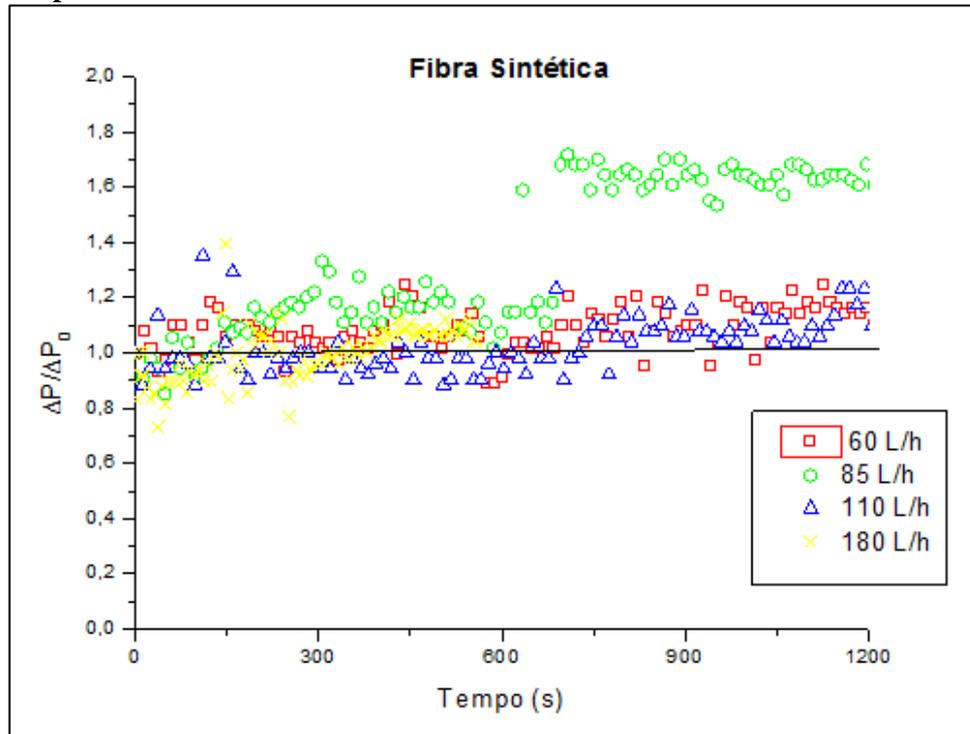
Durante cada ensaio a pressão oscilou e a presença de possíveis caminhos preferenciais no leito, mesmo com todo procedimento de compactação e preparo do leito, pode ser a principal causa. Essas oscilações foram maiores no leito de fibra de coco do que no leito de fibra sintética, o fato da esponja de fibra sintética ter seus poros definidos pode ser a justificativa para o que foi observado. As figuras 37 e 38 apresentam os gráficos da razão $\Delta P/\Delta P_0$ versus o tempo para a fibra de coco e para a fibra sintética, respectivamente, em leitos de 10 cm de comprimento, onde mostram essas oscilações.

Figura 37 - $\Delta P/\Delta P_0$ versus tempo para o leito de fibra de coco com 10 cm de comprimento.



Fonte: Autor (2017).

Figura 38 - $\Delta P/\Delta P_0$ versus tempo para o leito de fibra sintética com 10 cm de comprimento.



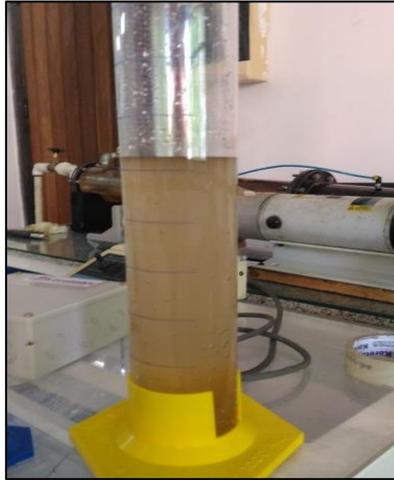
Fonte: Autor (2017).

Além de considerar a presença de caminhos preferenciais nos leitos, outros fatores como formação de bolhas de ar ou a pulsação da bomba peristáltica podem ter contribuído para a oscilação do diferencial de pressão. Durante a realização dos experimentos, alguns problemas operacionais ocorreram com a aquisição de dados através do condicionador de sinal, por garantia de tempos em tempos o diferencial de pressão apresentado na tela do transmissor era anotada manualmente. não houve prejuízo operacional do processo.

5.7 Acompanhamento da Coalescência Natural

Uma batelada foi feita para acompanhar a coalescência natural da emulsão preparada na unidade geradora (água produzida sintética). Com uma amostra da emulsão em uma proveta foram colhidas amostras e feitas as análises de TOG. A figura 37 apresenta a emulsão na proveta para análise e acompanhamento da redução do TOG pela separação por coalescência natural.

Figura 39 - Proveta com emulsão para teste de coalescência.



Fonte: Autor (2017).

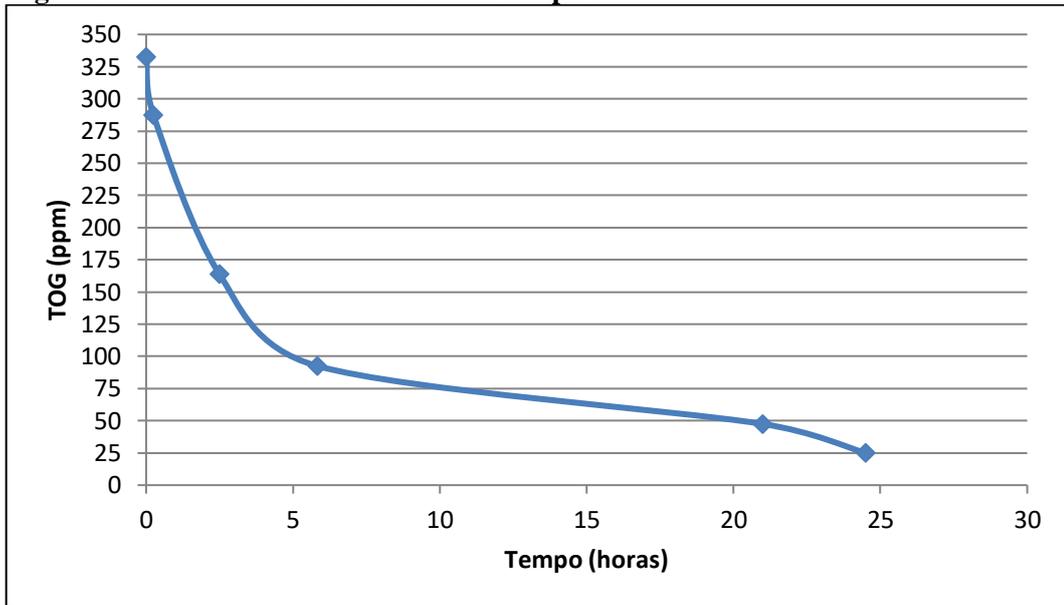
A tabela 10 apresenta os resultados da redução do TOG com o tempo.

Tabela 10 - Dados da coalescência natural da emulsão.

Tempo	Abs	TOG (ppm)	% Redução
0	0,266	332,5	0
15 min	0,23	287,5	13,53
2 hrs e 30 min	0,131	163,75	50,75
6 hrs	0,074	92,5	72,18
21 hrs	0,038	47,5	85,71
24 hrs e 30 min	0,02	25	92,48

Fonte: Autor (2017).

Com os dados da tabela 10, o gráfico da figura 40 foi plotado para mostrar o decaimento do TOG com o tempo.

Figura 40 - Decaimento do TOG com o tempo em uma coalescência natural.

Fonte: Autor (2017).

Observa-se que nas primeiras 2 horas o TOG da emulsão reduziu em 50% do valor inicial, provavelmente os óleos menos solúveis. Para alcançar resultados próximos do que foi obtido nos ensaios com os leitos coalescedores em regime contínuo, a coalescência natural deveria ocorrer por cerca de 24 horas. O que demonstra que os leitos coalescedores foram capazes de acelerar a coalescência das gotas e facilitar a separação com alguns minutos de operação o que levaria horas para separar de forma natural.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O coalescedor construído se mostrou eficiente no tratamento da água produzida sintética utilizando leitos de fibra de coco seco e fibra sintética com mineral abrasivo, alcançando eficiências maiores que 90% em alguns casos. O leito com fibra de coco apresentou comportamento como na teoria, onde, em geral, o aumento do comprimento do leito e a redução da velocidade produziram maiores eficiências.

A menor eficiência observada foi de 48% no leito com fibra de coco de 5 cm de comprimento e velocidade superficial de fluxo de 25,9 m/h, enquanto que a maior eficiência para o mesmo material foi de 96% em um leito de 15 cm e velocidade 12,3 m/h. As velocidades críticas para o leito de fibra de coco foram determinadas nos comprimentos de 5 e 10 cm, a partir da diminuição acentuada da eficiência. O comprimento ótimo para o leito de fibra de coco foi de 10 cm, visto que a eficiência deste comprimento para o de 15 cm foi pouco significativa, ao contrário do que se observou entre o leito de 5 cm e o de 10 cm.

O leito com fibra de coco e comprimento 10 cm nas velocidades de 8,7; 12,3 e 15,9 m/h e o leito de 15 cm nas velocidades 8,7 e 12,3 m/h alcançaram resultados dentro dos limites diários de 42 mg/L, exigidos pela legislação brasileira para descarte no mar. Já para a fibra sintética, o leito de 10 cm com velocidades de 15,9 e 25,9 m/h e o leito de 15 cm na velocidade de 8,7 m/h ficaram com TOG na corrente de saída menores que o exigido pela lei.

Os resultados da eficiência com a fibra sintética ficaram próximos uns dos outros para um mesmo comprimento de leito. Conclui-se que a fibra sintética não foi sensível às mudanças de velocidades propostas para este trabalho. O melhor resultado da fibra sintética quanto à eficiência de separação foi no leito com 15 cm com velocidade de 8,7 m/h com 96,8%, enquanto que a menor foi no leito de 10 cm também na velocidade de 8,7 m/h com 69%.

Na comparação dos materiais utilizados no leito, de modo geral, a fibra sintética apresentou melhores resultados de eficiência quando comparado com o coco, sendo menos sensível à variação da velocidade, apresentando altas eficiências mesmos nas condições mais críticas, ou seja, no menor leito com maior velocidade do fluxo. No entanto, quando avaliamos do ponto de vista econômico, o coco é um resíduo e está disponível sem custos, enquanto que a fibra sintética tem valor no mercado, com isso, o uso da fibra de coco, mesmo que em leitos maiores, pode representar um boa alternativa como leitos coalescentes.

As quedas de pressão observadas durante os experimentos foram baixas e não houve mudanças significativas entre um ensaio e outro, o que mostra que as velocidades, porosidade e comprimentos de leitos estudados não influenciaram muito no diferencial de pressão.

Para trabalhos futuros propõe-se:

- Testar o coalescedor em leito com a fibra de coco e a fibra sintética utilizando o efluente real da água produzida de petróleo;
- Testar velocidades superficiais de fluxo mais elevadas;
- Estudar a combinação da fibra de coco e da fibra sintética em um mesmo leito;
- Realizar ensaios no regime transiente, ou seja, partindo do leito não saturado;
- Testar outros materiais para o leito.

REFERÊNCIAS

- ACS INDUSTRIES. **Liquid-liquid coalescer design manual**. Houston, Texas, 2006. p. 20.
- AGARWAL, S.; VON ARNIM, V.; STEGMAIER, T.; PLANCK, H.; AGARWAL, A. Effect of fibrous coalescer geometry and operating conditions on emulsion separation. **Industrial & engineering chemistry research**, 2013a. v. 52, n. 36, p. 13164–13170.
- _____. Role of surface wettability and roughness in emulsion separation. **Separation and purification technology**, abr. 2013b. v. 107, p. 19–25.
- AHMED, T. **Working guide to reservoir rock properties and fluid flow**. 3. ed. Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2009. V. 1.
- ALIAS, N. *et al.* Thermogravimetric analysis of rice husk and coconut pulp for potential biofuel production by flash pyrolysis. **The malaysian journal of analytical sciences**, 2014. v. 18, n. 3, p. 705–710.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Dados de E&P**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/gestao-de-contratos-de-e-p/dados-de-e-p>>. Acesso em: 24 de Abril de 2016.
- ARTHUR, J. D.; LANGHUS, B. G.; PATEL, C. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. **Tech. Rep. National Energy Technology Laboratory**. V. 307, n. 1-2, 2005, p. 1–53.
- AUSTIN, D. G. **Coalescence of secondary dispersions**. Dissertação de mestrado. University of Aston, Birmingham, Reino Unido, 1979.
- BRASIL, N. Í. do; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E. C. M. De. **Processamento de petróleo e gás**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- BUFO, M. J. **Coalescência de imiscíveis em filme de água residuária**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006.
- CERQUEIRA, A. A.; REGINA, M.; RUSSO, C. Gestão das águas de produção: histórico, políticas ambientais e alternativa tecnológica. **Revista uniara**, 2009. v. 12, p. 21–36.
- CHAWALOESPHONSIYA, N.; PAINMANAKUL, P. Study of cutting-oil emulsion separation by coalescer process in terms of medium characteristics and bed packing. **Separation science and technology**, 2014. v. 49, n. 18, p. 2960–2967.
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 393, 8 de agosto de 2007. **Ministério do meio ambiente**, 2007.
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. **Ministério do meio ambiente**, 2008. p. 64–68.
- CORRÊA, O. L. S. **Petróleo - noções sobre exploração, perfuração, produção e**

- microbiologia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
- CUSACK, R. Rethink your liquid-liquid separations. **Hydrocarbon processing**, 2009. v. 88, n. 6.
- DANDEKAR, A. Y. **Petroleum reservoir rock and fluid properties**. 2. ed. Estados Unidos: CRC Press, 2013.
- DURASAMY, R. T.; BENI, A. H.; HENNI, A. State of the art treatment of produced water. **Water treatment**, 2013. p. 199–222.
- EIA, Energy Information Administration. **Total petroleum and other liquids production, 2016**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.eia.gov/beta/international/data/browser/>>. Acesso em: 15 Mar. 2017.
- FAKHRU’L-RAZI, A. *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. **Journal of hazardous materials**, 2009. v. 170, n. 2–3, p. 530–551.
- GABARDO, I. T. **Caracterização química e toxicológica da água produzida descartada em plataformas de óleo e gás na costa brasileira e seu comportamento dispersivo no mar**. Tese de Doutorado em Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2007.
- GOMES, A. P. P. **Gestão ambiental da água produzida na indústria de petróleo: melhores práticas e experiências internacionais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- GOVEDARICA, D. *et al.* Separation of mineral oil droplets using polypropylene fibre bed coalescence. **Hemijaska industrija**, 2015. v. 69, n. 4, p. 339–345.
- GRUPO SHELL. Liquid/liquid and gas/liquid/liquid separators - type selection and design rules. **Design and engineering practice manual**. [s.n.], 2008, 112p.
- HAZLETT, R. N. Fibrous bed coalescence of water. steps in the coalescence process. **Industrial & engineering chemistry fundamentals**, nov. 1969. v. 8, n. 4, p. 625–632.
- IGUNNU, E. T.; CHEN, G. Z. Produced water treatment technologies. **International journal of low-carbon technologies**, 2014. v. 9, n. 3, p. 157–177.
- IIDA, P. H. *et al.* Estudo do efeito da água em emulsões de petróleo. **4º congresso brasileiro de p&d em petróleo e gás**, Campinas, SP, 2007. v. 2.3.0080, p. 1–10.
- JAYA, A.; KOLMETZ, K. Coalescer (engineering design guideline). **Practical engineering guidelines for processing plant solutions**. KLM technology group, 2012. v. 1.
- KULKARNI, P. S.; PATEL, S. U.; CHASE, G. G. Layered hydrophilic/hydrophobic fiber media for water-in-oil coalescence. **Separation and purification technology**, 2012. v. 85, p. 157–164.
- KUNERT, R. *et al.* Processamento primário de petróleo. Rio de Janeiro: **Universidade**

petrobras - escola de ciências e tecnologia e&p, 2007. p. 53.

LEE, K.; NEFF, J. **Produced water - environmental risks and advances in mitigation technologies**. New York, NY: Springer New York, 2011.

LI, J.; GU, Y. Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds. **Separation and purification technology**, 2005. v. 42, n. 1, p. 1–13.

LU, H.; YANG, Q.; LIU, S.; *et al.* Effect of fibrous coalescer redispersion on w/o emulsion separation. **Separation and purification technology**, 2016. v. 159, p. 50–56.

LU, H.; YANG, Q.; XU, X.; *et al.* Effect of the mixed oleophilic fibrous coalescer geometry and the operating conditions on oily wastewater separation. **Chemical engineering & technology**, fev. 2016. v. 39, n. 2, p. 255–262.

MA, S.; KANG, Y.; CUI, S. Oil and water separation using a glass microfiber coalescing bed. **Journal of dispersion science and technology**, 2014. v. 35, n. 1, p. 103–110.

MAITI, S. *et al.* Removal of oil from oil-in-water emulsion using a packed bed of commercial resin. **Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects**, 2011. v. 389, n. 1–3, p. 291–298.

MOFARRAH, A. *et al.* Decision-making tool for produced water management. **Produced water**. 1. ed. Canadá: Springer Science, 2011, p. 573–586.

MOKHATAB, S.; POE, W. A.; MAK, J. Y. **Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices**. 3 ed ed. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 2015.

MOTTA, A. R. P. Da. **Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo através da integração dos processos com coalescedor em leito e microfiltração**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2014.

MULLINS, L. Reserves uncertainty quantification: an executive perspective. **Stochastic oil and gas industry**, [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://community.stochasticsimulation.com/reserves-uncertainty-quantification-executive-perspective/>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's chemical engineers' handbook**. 8. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 2007.

REYNOLDS, R. R.; KIKER, R. D. Produced water and associated issues — a manual for the independent operator. **Oklahoma geological survey open file report**, 2003. 65p.

SAREEN, S. S. *et al.* Coalescence in fibrous beds. **Aiche journal**, 1966. v. 12, n. 6, p. 1045–1050.

SCHRAMM, L. L. Petroleum emulsions: basic principles. **Emulsions: fundamentals and applications in the petroleum industry**, 1992. p. 1–49.

ŠEĆEROV SOKOLOVIC, R. M. *et al.* Effect of fibrous bed permeability on steady-state coalescence. **Industrial & engineering chemistry research**, 2003. v. 42, p. 3098–3102.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ, R. M.; GOVEDARICA, D. D.; SOKOLOVIĆ, D. S. Selection of filter media for steady-state bed coalescers. **Industrial and engineering chemistry research**, 2014. v. 53, n. 6, p. 2484–2490.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ, R. M.; GOVEDARICA, D. D.; SOKOLOVIĆ, D. S. Separation of oil-in-water emulsion using two coalescers of different geometry. **Journal of hazardous materials**, 2010. v. 175, n. 1–3, p. 1001–1006.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ, R. M.; SOKOLOVIĆ, D. S.; GOVEDARICA, D. D. Liquid-liquid separation using steady-state bed coalescer. 2015, p. 1–39.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ, R. M.; SOKOLOVIĆ, S. M.; ĐOKOVIĆ, B. D. Effect of working conditions on bed coalescence of an oil-in-water emulsion using a polyurethane foam bed. **Industrial & engineering chemistry research**, nov. 1997. v. 36, n. 11, p. 4949–4953.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ, R. M.; VULIĆ, T. J.; SOKOLOVIĆ, S. M. Effect of fluid flow orientation on the coalescence of oil droplets in steady-state bed coalescers. **Industrial & engineering chemistry research**, 2006a. v. 45, n. 11, p. 3891–3895.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ, R. M.; VULIĆ, T. J.; SOKOLOVIĆ, S. M. Effect of fluid flow orientation on the coalescence of oil droplets in steady-state bed coalescers. **Industrial & engineering chemistry research**, maio. 2006b. v. 45, n. 11, p. 3891–3895.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ, R. M.; VULIĆ, T. J.; SOKOLOVIĆ, S. M. Effect of bed length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion. **Separation and purification technology**, 2007. v. 56, n. 1, p. 79–84.

SPETH, H. *et al.* Coalescence of secondary dispersions in fiber beds. **Separation and purification technology**, nov. 2002. v. 29, n. 2, p. 113–119.

STEWART, M.; ARNOLD, K. E. **Produced water treatment field manual**. Elsevier: 2011.

TADROS, T. F. Emulsion formation, stability, and rheology. **Emulsion formation and stability**, 2013. p. 1–76.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

TIBBETTS, P. J. C. *et al.* A comprehensive determination of produced water composition. **Produced water: technological/environmental issues and solutions**. New York: Plenum Publishing Corp., 1992, p. 97–113.

TREYBAL, R. E. **Mass-transfer operations**. 3. ed. Londres: McGraw-Hill Book Company, 1980.

VEIL, J. A. *et al.* **A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane**. Estados Unidos: 2004. p. 87.

VEIL, J. A. *et al.* Produced water management options and technologies. In: LEE, K.; NEFF,

J. (org.) **Produced Water - environmental risks and advances in mitigation technologies.**
1. ed. Springer Science, 2011, p. 537–571.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS

FIBRA DE COCO SECO						
Comprimento do leito	Vazão (L/h)	Velocidade Superficial de fluxo (m/h)	Tog médio da entrada (ppm)	TOG médio saída (ppm)	Média das Eficiências	Desvio padrão das eficiências
5 cm	60	8,7	379,75	82,25	78,31	0,90
	85	12,3	407,25	105,50	73,51	3,26
	110	15,9	434,00	182,50	57,79	2,45
	180	25,9	449,00	229,00	48,25	4,98
10 cm	60	8,7	314,25	22,50	92,48	1,80
	85	12,3	575,50	41,00	92,86	0,18
	110	15,9	819,25	42,25	94,71	0,87
	180	25,9	780,00	102,00	86,30	4,47
15 cm	60	8,7	180,00	23,25	86,42	3,94
	85	12,3	367,25	11,75	96,75	0,63
	110	15,9	319,88	46,13	86,42	1,92
	180	25,9	408,00	51,50	88,43	2,65

FIBRA SINTÉTICA						
Comprimento do leito	Vazão (L/h)	Velocidade Superficial de fluxo (m/h)	Tog médio da entrada (ppm)	TOG médio saída (ppm)	Média das Eficiências	Desvio padrão das eficiências
5 cm	60	8,7	574,70	53,66	90,66	0,39
	85	12,3	828,45	61,74	92,55	0,85
	110	15,9	524,65	69,30	86,83	1,54
	180	25,9	401,45	89,95	77,92	3,41
10 cm	60	8,7	273,00	82,25	69,36	4,29
	85	12,3	533,75	101,15	80,81	2,37
	110	15,9	438,55	41,65	90,59	1,40
	180	25,9	538,30	29,40	94,48	0,96
15 cm	60	8,7	706,13	22,40	96,83	0,72
	85	12,3	326,20	63,35	80,60	0,50
	110	15,9	529,90	108,50	79,79	2,83
	180	25,9	364,70	69,30	80,83	1,14

