



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA



NATIEL JOHNSON SANTOS DE HOLANDA

**USO DE LEITOS COALESCENTES NO TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA
DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO.**

Maceió
2020

NATIEL JOHNSON SANTOS DE HOLANDA

**USO DE LEITOS COALESCENTES NO TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA
DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João Inácio Soletti.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a. Flávia Bartira Pedro da Silva Almeida - IFAL

Maceió
2020

Catlogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

H722u Holanda, Natiel Johnson Santos de.
Uso de leitos coalescentes no tratamento de água produzida da indústria de Petróleo / Natiel Johnson Santos de Holanda . – 2020.
70 f. : il. ; figs. ; tabs. color.

Orientador: João Inácio Soletti.
Coorientadora: Flávia Bartira Pedro da Silva Almeida.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 63-66.
Apêndices: f. 68-70.

1. Água de produção de petróleo. 2. Tratamento de efluentes. 3. Coalescedor em leito. 4. Chicanas. 5. Fibra de coco seco. I. Título.

CDU: 628.3.034.2

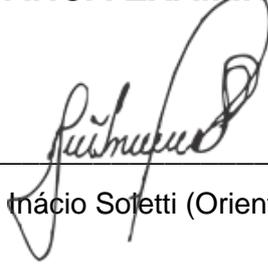
Natíel Johnson Santos de Holanda

**USO DE LEITOS COALESCENTES NO TRATAMENTO DE ÁGUA
PRODUZIDA DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**

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

Aprovada em: Maceió, 26 de Junho de 2020.

BANCA EXAMINADORA



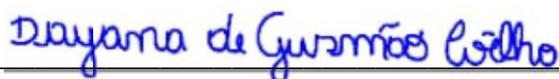
Prof. Dr. João Mácio Soletti (Orientador – PPGEQ/UFAL)



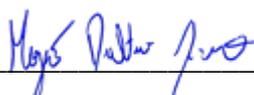
Profª. Drª. Flávia Bartira Pedro da Silva Almeida (Coorientadora – IFAL)



Profª. Drª. Sandra Helena Vieira de Carvalho (PPGEQ/UFAL)



Profª. Drª. Dayana de Gusmão Coelho (CTEC/UFAL)



Prof. Dr. Mozart Daltro Bispo (Pós-doc/PPGEQ/UFAL)

RESUMO

A indústria do petróleo é uma das mais poluentes do mundo, seus vários segmentos podem causar grandes impactos ao meio ambiente. Pode-se destacar a água de produção ou água produzida (AP), gerada em grandes volumes por essas indústrias, constituída por diversos compostos químicos, com elevado teor de óleos e graxas (TOG). Um grande desafio consiste no tratamento desse efluente, pois as tecnologias aplicadas em seu tratamento nem sempre são eficientes para atingir os parâmetros necessários para atender as normas vigentes, principalmente quando há formação de emulsão óleo em água. Dentre as tecnologias aplicadas no processo de tratamento, os leitos coalescentes tornam-se uma alternativa viável para separar essas emulsões. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de um equipamento coalescedor com acoplamento de chicanas no tratamento de água produzida, visando a remoção do óleo da água. Os experimentos foram realizados utilizando amostras de emulsão óleo em água sintéticas, produzidas em laboratório, utilizando petróleo, água, NaCl e lauril sulfato de sódio, com concentração de aproximadamente 400 mg/L. O coalescedor utilizado operou em fluxo horizontal, no estado estacionário. O leito foi composto por fibras de coco seco, uma biomassa muito comum no estado de Alagoas, nos comprimentos 5, 10 e 15 cm, nas vazões de 40, 70 e 108 L/h. Os resultados apresentaram valores de eficiências de 17 a 60% em relação à remoção de TOG, sem o acoplamento das chicanas. Na presença das chicanas as eficiências atingiram valores de 40,4 a 74%. Estes resultados indicam que os leitos coalescentes podem ser uma alternativa no processo de tratamento da água produzida, com a finalidade de reduzir o TOG, seja para fins de descarte, reuso ou reinjeção.

Palavras – chaves: Água produzida. Leito coalescedor. Chicanas. Fibra de coco.

ABSTRACT

The oil industry is one of the most polluting in the world, its various segments can cause major impacts to the environment. It can be highlighted the production water or produced water, generated in large volumes by these industries, consisting of several chemical compounds, with a high content of oils and greases. A major challenge is the treatment of this effluent, as the Technologies applied in its treatment are not always efficient in reaching the parameters necessary to meet the current standards, especially when there is formation of an oil-in-water emulsion. Among the technologies applied in the treatment process, coalescing beds become a viable alternative to separate these emulsions. Therefore, the objective of this work is to evaluate the performance of a coalescing equipment with coupling of baffles in the treatment of produced water, aiming at the removal of oil from water. The experiments were carried out using synthetic oil-in-water emulsion, produced in laboratory, using oil, water, NaCl and sodium lauryl sulfate, with a concentration of approximately 400 mg/L. The coalescing bed used operated in a horizontal flow, in a steady state. The bed was composed of dry coconut fibers (*Cocos Nucifera* L.), a biomass very common in the state of Alagoas, with bed lengths of 5, 10 and 15 cm, in flow of 40, 70 and 108 L/h. The results showed efficiency values from 17 to 60% in relation to concentration of oil and greases removal, without the coupling of the baffles. In the presence of baffles, efficiencies reached values of 40.4 to 74%. These results indicate that coalescing beds can be an alternative in the process of treatment of produced water, with the purpose of reducing the concentration of oil, whether for the purposes of disposal, reuse or reinjection.

Keywords: Water produced. Bed coalescence. Baffles. Coconut fiber.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Sequência esquemática da colisão de duas gotas e subsequente coalescência, aglomeração ou repulsão. | 25 |
| Figura 2 – Coalescedor de leito horizontal: 1ª seção (emulsão), 2ª seção (gotas coalescidas). | 26 |
| Figura 3 - Coalescência entre gotículas adjacentes: duas gotas de tolueno em água. | 27 |
| Figura 4 - Esquema representativo dos mecanismos de coalescência de gotículas na interface líquido-líquido. | 28 |
| Figura 5 – Principais etapas da coalescência em um leito de fibras. | 29 |
| Figura 6 - Dependência da velocidade crítica no comprimento do leito para concentração de entrada de 500 mg/L para todos os três modos de fluxo aplicados. | 37 |
| Figura 7 - Influência do comprimento do leito de fibra de poliacrilonitrila modificada (MPANF) sobre a concentração do efluente (concentração do afluente = 630 mg/dm ³). | 37 |
| Figura 8 - Evolução da eficiência do coalescedor para valor de TOG de 200 mg/L. | 38 |
| Figura 9 - Unidade experimental esquematizada. | 39 |
| Figura 10 – Unidade experimental: coalescedor com chicanas. | 41 |
| Figura 11 - Modelo das chicanas construídas. | 41 |
| Figura 12 - Distância entre as hastes na chicana. | 42 |
| Figura 13 - Leito de acrílico, 5 cm. | 43 |
| Figura 14 - Fibras de coco. | 43 |
| Figura 15 - Cesto metálico de 10 e 5 cm com fibras de coco umedecidas em petróleo e empacotadas no leito de acrílico. | 44 |
| Figura 16 - Leito na disposição de 15 cm. | 44 |
| Figura 17 - Curva de calibração para o solvente hexano + petróleo em $\lambda = 340\text{nm}$ | 48 |
| Figura 18 - Curvas de TG e DTG da fibra de coco seco. | 52 |
| Figura 19 - Influência da velocidade do fluido (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 5 cm. | 53 |
| Figura 20 - Influência da velocidade do fluido (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 10 cm. | 54 |
| Figura 21 - Influência da velocidade do fluido (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 15 cm. | 55 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 22 - Influência das chicanas (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 5 cm..... | 57 |
| Figura 23 - Influência das chicanas (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 10 cm..... | 59 |
| Figura 24 - Influência das chicanas (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 15 cm..... | 60 |
| Figura 25 - Influência do comprimento de leito (5, 10 e 15 cm) na eficiência do processo na presença das chicanas. | 61 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----------|
| Quadro 1 - Processos disponíveis para tratamento de água produzida. | 21 |
| Quadro 2 - Relação de potenciais aspectos e impactos da água produzida. | 23 |
| Quadro 3 - Fatores que influenciam no processo de coalescência. | 31 |
| Quadro 4 - Planejamento dos experimentos. | 46 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 1 - Parâmetros de qualidade da água produzida em campos de petróleo. | 15 |
| Tabela 2 - Concentração média de ânions em água produzida e água do mar. | 17 |
| Tabela 3 - Concentração de água produzida ao redor do mundo..... | 19 |
| Tabela 4 - Propriedades de alguns materiais utilizados na confecção de leitos coalescentes. | 35 |
| Tabela 5 - Massa das fibras do leite..... | 45 |
| Tabela 6 - Características do petróleo, água e da emulsão..... | 50 |
| Tabela 7 - Características das fibras de coco..... | 51 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 12 |
| 2.1 | Geral | 12 |
| 2.2 | Específicos | 12 |
| 3 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 13 |
| 4 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 4.1 | Água Produzida | 14 |
| 4.2 | Características da água produzida | 15 |
| 4.3 | Tratamento e destinação da AP | 18 |
| 4.4 | Impactos ambientais..... | 23 |
| 4.5 | Processo de coalescência | 24 |
| 4.6 | Leitos coalescentes | 25 |
| 4.7 | Mecanismos de coalescência | 27 |
| 4.7.1 | Coalescência entre gotículas adjacentes..... | 27 |
| 4.7.2 | Coalescência de gotículas na interface líquido-líquido..... | 28 |
| 4.7.3 | Coalescência de gotículas em leitos de fibras..... | 29 |
| 4.8 | Fatores que influenciam na eficiência do processo de coalescência..... | 30 |
| 4.8.1 | Orientação do fluxo em um coalescedor | 31 |
| 4.8.2 | Velocidade do Fluido | 33 |
| 4.8.3 | Materiais do leito poroso | 34 |
| 4.8.4 | Comprimento do leito | 36 |
| 5 | METODOLOGIA..... | 39 |
| 5.1 | Unidade experimental | 39 |
| 5.1.1 | Coalescedor..... | 40 |
| 5.1.2 | Construção das chicanas | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1.3 Leito coalescedor | 42 |
| 5.1.4 Caracterização da biomassa utilizada..... | 45 |
| 5.2 Realização experimental | 46 |
| 5.3 Análise do teor de óleos e graxas..... | 47 |
| 5.3.1 Construção da curva padrão para determinação do teor de óleos e graxas..... | 48 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 50 |
| 6.1 Caracterização dos fluidos..... | 50 |
| 6.2 Caracterização das fibras | 50 |
| 6.3 Influência da velocidade do fluido na eficiência do coalescedor | 52 |
| 6.4 Influência do comprimento do leito | 56 |
| 6.5 Efeito das chicanas no coalescedor | 57 |
| 7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS..... | 62 |
| REFERÊNCIAS | 64 |
| APÊNDICE A – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS A..... | 67 |
| APÊNDICE B – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS B..... | 68 |
| APÊNDICE C - LEITURA DAS ABSORBÂNCIAS DAS SOLUÇÕES PADRÕES PREPARADAS COM HEXANO E PETRÓLEO..... | 69 |

1 INTRODUÇÃO

A água produzida é o maior efluente gerado no processo de produção de petróleo e gás natural. São inúmeras as suas fontes e podem se originar de campos de produção de petróleo, plantas de refinaria de petróleo bruto e unidades de energia (GHIMIRE, 2018).

A geração de água produzida representa um grande problema devido ao imenso volume gerado durante a produção de petróleo. Grandes quantidades de água são usadas em refinarias de petróleo e, conseqüentemente, volumes significativos são produzidos, chegando a obter cerca de 0,4 – 1,6 vezes o volume de óleo processado (COELHO *et al.*, 2006).

Além da preocupação em relação aos grandes volumes gerados, a composição dessa água requer bastante atenção. Segundo Cunha *et al.*, (2007), esse efluente é o poluente que mais se destaca devido ao grande volume e a sua toxicidade. Muitos contaminantes são encontrados, tais como hidrocarbonetos, gases dissolvidos, sais, metais pesados, óleos dispersos e dissolvidos, produtos químicos, enxofre e areia (CARVALHO, 2016). Portanto, o tratamento desse efluente requer muita atenção por partes das indústrias.

O tratamento da água produzida depende muito do destino a ser empregado. Como afirma Motta (2014), usualmente as alternativas adotadas para a sua destinação são o descarte, a injeção ou o reuso. Já os custos associados ao processo de tratamento dependem basicamente da qualidade do efluente e do preço da eletricidade (AL-GHOUTI *et al.*, 2019).

A legislação para a destinação da água produzida depende do país em que ela é produzida. No Brasil, a Conama nº 393/2007 (BRASIL, 2007) dispõe sobre o descarte em plataformas marítimas de petróleo e gás natural. O parâmetro mais importante a ser analisado é o TOG, que de acordo com a norma, deverá obedecer à concentração média aritmética simples mensal de até 29 *mg/L* com valor máximo diário de 42 *mg/L*.

Para o descarte em terra, a Conama nº430/2011 (BRASIL, 2011) que alterou e complementou a Conama nº 357/2005 (BRASIL, 2005) fixa os parâmetros de óleo e graxas em até 20 *mg/L*.

A finalidade do tratamento da água produzida é reduzir o teor de óleos e graxas – TOG para valores abaixo do limite que a norma estabelece. Usualmente, as tecnologias utilizadas para a redução do TOG nem sempre são eficientes, principalmente quando há formação de emulsão (VEIL *et al.*, 2004). Muitos equipamentos são utilizados no tratamento desses efluentes, como flotores,

separadores gravitacionais, hidrociclones, membranas e coalescedores em leito. Este último, de acordo com Govedarica *et al.*, (2013), é altamente eficiente na remoção de óleos e graxas em emulsão, devido ao baixo consumo de produtos químicos e de energia, além de possuir manutenção e operação simples.

O tratamento com leitos coalescentes consiste em induzir a separação das gotas de óleo emulsionadas em água, através da passagem da emulsão por um leito poroso. Ao passarem através do leito poroso, este provoca a coalescência das gotículas, fazendo com que aumente de tamanho e por diferença de densidade, sejam separadas.

Este trabalho visa uma investigação no desempenho de um leito coalescedor no tratamento de água produzida sintética de petróleo. Foram avaliados parâmetros como velocidade do fluido, comprimento do leito e acoplamento de chicanas no equipamento. O objetivo principal é reduzir o percentual de óleo da emulsão com a finalidade de alcançar uma qualidade do efluente que atenda à legislação para o descarte marítimo ou em corpos de água superficiais.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar o desempenho de um coalescedor de leito para remoção de óleo no tratamento de água produzida da indústria de petróleo.

2.2 Específicos

- Utilizar uma metodologia para preparar uma emulsão sintética de água produzida de petróleo que apresente características do efluente real;
- Construir e avaliar um equipamento coalescedor de leito;
- Avaliar os efeitos das condições operacionais: velocidade do fluxo, comprimento do leito e acoplamento de chicanas;
- Avaliar a eficiência do equipamento em função das condições estudadas.

3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está subdividido em capítulos cuja descrição encontra-se a seguir.

No capítulo 4 é apresentada uma descrição sobre os principais aspectos da água produzida de petróleo. São tratadas questões como definição, características, tecnologias no tratamento e impactos ambientais associados. Para o processo de tratamento utilizado nesse trabalho, são tratados os princípios de funcionamento, os mecanismos de coalescência e os principais fatores que influenciam no processo.

No capítulo 5 é apresentada a metodologia utilizada, descrevendo o equipamento, materiais e procedimentos utilizados no trabalho.

No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados do estudo em questão. Esse capítulo apresenta os ensaios realizados com e sem o acoplamento das chicanas.

Por fim, o capítulo 7 e 8 são apresentadas as conclusões e as referências utilizadas.

Inclui-se também um apêndice com os resultados das concentrações das amostras analisadas neste estudo, além dos dados para a construção da curva de calibração para análise do teor de óleos e graxas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está dividida em duas partes: a primeira contempla a água produzida (características, tratamento, destino e impactos ambientais) e a segunda os aspectos relacionados ao processo de coalescência.

4.1 Água Produzida

O petróleo é uma mistura complexa de compostos orgânicos cuja origem apresenta duas teorias distintas, a teoria orgânica e a inorgânica. Com base na teoria orgânica, o petróleo originou-se a partir da decomposição de matéria orgânica como restos de vegetais, algas, restos de animais marinhos e alguns tipos de plâncton que ao longo dos anos foi depositado no fundo dos lagos e oceanos sofrendo diversas transformações químicas ao longo do tempo (CARVALHO, 2016).

Durante a produção do petróleo é comum esperar que ocorra produção de óleo, gás natural e água. Assim, um reservatório típico apresenta uma vazão de produção de óleo, gás natural e água. Durante a produção de óleo e gás ocorre a produção de grandes volumes de água juntamente com impurezas, onde o interesse econômico está apenas na produção de hidrocarbonetos. Além disso, a água torna-se um dos contaminantes mais indesejáveis nesse processo (THOMAS, 2004).

Segundo Veil *et al.*, (2004), água produzida é toda a água retida em formações subterrâneas que são trazidas para a superfície junto com óleo ou gás. É de longe o maior subproduto em volume ou fluxo de resíduos associado com a produção de petróleo e gás.

De acordo com Thomas (2004), essa água pode se originar de até três formas distintas: água de formação do poço produtor, água injetada para aumentar a recuperação do óleo ou água condensada no caso de alguma produção de gás. Ainda segundo o autor, o petróleo é formado, em quase sua totalidade, por uma mistura de hidrocarbonetos, como parafinas (normais e ramificadas), naftênicos, aromáticos e olefinas, e a água produzida está intimamente relacionada à composição do petróleo.

Segundo Neff *et al.*, (2011), a geração de água produzida pode alcançar volume dez vezes maior que o volume de óleo produzido. Segundo Gabardo (2007) a quantidade de água associada ao óleo pode aumentar consideravelmente no fim da vida produtiva de um poço, ou seja, quando a produção de petróleo é acompanhada de elevados teores de água, pode-se deduzir que o poço está no

final de sua vida produtiva e esse poço denomina-se maduro. Sendo assim, o volume da água em um poço varia de acordo com a vida produtiva do mesmo.

4.2 Características da água produzida

A água produzida é uma mistura complexa de compostos químicos orgânicos e inorgânicos dissolvidos. As suas propriedades físicas e químicas variam muito dependendo da idade geológica, profundidade, características geoquímicas e localização da formação rochosa, como também da composição química das fases de óleo e gás no reservatório. Os principais compostos químicos constituintes são metais, sais, radioisótopos e uma ampla variedade de produtos químicos orgânicos, principalmente hidrocarbonetos (NEFF *et al.*, 2011). A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros de qualidade da água produzida em campos de petróleo.

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade da água produzida em campos de petróleo.

| PARÂMETRO | VALORES | METAIS | VALORES (mg/L) |
|--|-------------|----------|----------------|
| Densidade (kg/m ³) | 1014 – 1140 | Cálcio | 13 - 25800 |
| Carbono orgânico total (COT) (mg/L) | 0 – 1500 | Sódio | 132 – 97000 |
| Sólidos suspensos totais (SST) (mg/L) | 1,2 – 1000 | Magnésio | 8 – 6000 |
| pH | 4,3 – 10 | Ferro | < 0,1 – 100 |
| Óleo total (mg/L) | 2 – 565 | Alumínio | 310 – 410 |
| Voláteis (BTX; mg/L) | 0,39 – 35 | Bário | 1,3 - 650 |
| Fenóis (mg/L) | 009 – 23 | Potássio | 24-4300 |

Fonte: MOTTA (2014).

De acordo com a Tabela 1, verifica-se que a água produzida possui valores elevados de vários parâmetros, como carbono orgânico total, sólidos suspensos totais, óleo total, BTX e fenóis. Desses parâmetros, o teor de óleos e graxas (TOG) é um dos que mais requerem atenção, pois toda legislação relacionada à água produzida enfoca nesse parâmetro como fator de qualidade final do efluente.

Os produtos químicos orgânicos são largamente dependentes do campo produtor, e apresenta como principais classes os hidrocarbonetos voláteis (BTEX: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos),

hidrocarbonetos aromáticos (HPA), fenóis e ácidos carboxílicos. Os hidrocarbonetos representam os compostos que mais requerem atenção, principalmente por conter os aromáticos que são muito prejudiciais ao meio ambiente. Os aromáticos compreendem uma diversidade de compostos cíclicos insaturados contendo principalmente em sua composição carbono e hidrogênio (algumas substâncias contêm hetero-átomos tais como nitrogênio, oxigênio e enxofre). Estas substâncias aromáticas possuem uma ampla faixa de características físicas, químicas e propriedades biológicas, fazendo-se necessário classificá-las em subgrupos aromáticos semelhantes. Esses aromáticos são subdivididos em três grupos (GARBADO, 2007):

- BTEX: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (isômeros orto, meta e para). Estes são os compostos monocíclicos aromáticos e são frequentemente os mais abundantes na água produzida, como dito anteriormente.
- NFD: naftalenos, fenantrenos e dibenzotiofenos, incluindo seus alquil homólogos de C_1 a C_3 . Estes são aromáticos de 2 e 3 anéis.
- HPA: compostos policíclicos aromáticos representados pelos 16 HPA prioritários (naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, indeno(1,2,3-c,d)pireno, dibenzo(a,h)antraceno, benzo(g,h,i)perileno).

Esses grupos aromáticos estão presentes na água produzida em concentrações que dependem em grande parte da natureza do reservatório (óleo, gás ou condensado). Em geral, as maiores concentrações desses compostos são de BTEX e NFD, pois apresentam maior solubilidade em água. Além disso, a composição dos aromáticos não apresenta variações significativas ao longo da produção do poço e aparentemente não se correlaciona com o teor de óleos e graxas – TOG (GARBADO, 2007).

Alguns minerais estão dissolvidos na água produzida, tais como metais pesados, sais, elementos radioativos e os sólidos dissolvidos totais – SDT, que são constituintes inorgânicos, compostos por cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+}) e ânions (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^-). O íon Na^+ e o ânio Cl^- são os mais predominantes. A concentração de sólidos totais dissolvidos pode variar muito, podendo chegar a valores menores que 100 até 300.000 mg/L , dependendo da localidade geográfica, da idade e tipo do reservatório de petróleo (STEWART e ARNOLD, 2011).

Segundo Motta (2014), a salinidade pode variar para valores menores que a água potável (250 mg/L em relação a cloretos) ou valores bem acima da água do mar (35.000 mg/L).

É interessante notar que segundo Garbado (2007), os mesmos sais contidos na água do mar estão presentes também na água produzida, embora em concentrações e razões bem diferentes. Grande parte dos compostos inorgânicos mais abundantes estão na forma de íons cloreto, sódio, cálcio, magnésio, amônia e sulfeto.

Os íons sulfetos podem ter origem de atividades microbianas nas linhas de produção, como as bactérias redutoras de sulfato (BRS). A Tabela 2 apresenta as concentrações dos constituintes aniônicos da água produzida e da água do mar.

Tabela 2 - Concentração média de ânions em água produzida e água do mar.

| Íon (concentração) | Água produzida | Água do mar |
|------------------------|----------------|-------------|
| Bicarbonato (mg/L) | 771 | 28 |
| Cloreto (g/L) | 60,9 | 19 |
| Sulfato (mg/L) | 325 | - |
| Nitrato (mg/L) | 1 | - |
| Fosfato (mg/L) | 0 | 0,09 |
| Sulfeto (mg/L) | 140 | - |

Fonte: Adaptado de Garbado (2007).

Além de metais e sólidos dissolvidos totais encontrados na água produzida, alguns gases podem estar dissolvidos também. Segundo Stewart e Arnold (2011), os gases mais encontrados são o gás natural (metano, etano, propano e butano), dióxido de carbono (CO_2) e gás sulfídrico (H_2S). O O_2 não é um gás comumente encontrado, porém quando essa água é elevada à superfície, esse gás é, então, incorporado a sua composição, o que pode causar problemas de corrosão nas tubulações por onde ela passa, além de produzir sólidos insolúveis, devido a reações de oxidação. O CO_2 pode também causar problemas de corrosão nas tubulações ou então precipitar-se como carbonato de cálcio ($CaCO_3$) formando incrustações.

Alguns materiais radioativos também são encontrados, como exemplos encontram-se os isótopos Rádio-236 e o Rádio-238. Estes materiais são radioativos naturalmente ocorrentes e são os mais comuns em água produzida, sendo derivados do decaimento do Urânio-238 e Tório-232

associados a certas rochas e argilas do reservatório de petróleo (CARVALHO, 2016; NEEF, LEE e PEBLOIS, 2011).

4.3 Tratamento e destinação da AP

A água produzida representa um dos maiores efluentes poluidores da indústria de petróleo. O descarte sem o devido tratamento pode ocasionar poluições do solo, de águas subterrâneas e superficiais promovendo impactos negativos ao meio ambiente, além de multas por descumprimento das normas ambientais vigentes.

Segundo Arthur (2005), as possíveis opções de destino são:

- Injeção para recuperação de poços produtores de óleo;
- Descarga oceânica do efluente após seu tratamento;
- Utilização em operações usuais da indústria petrolífera;
- Irrigação e recuperação de pastagens.

Todas essas alternativas apontadas por Arthur (2005) tornam-se soluções para o grande volume desse efluente produzido pelas indústrias petrolíferas. Porém, essas opções requerem condições adequadas para o seu devido destino, logo há necessidade de um tratamento antes de sua destinação.

Segundo Motta (2014) o tratamento de um efluente depende de sua destinação e muitos fatores influenciam nesse processo, tais como: a localização da base de produção, legislação, viabilidade técnica, custos operacionais e disponibilidade de infraestrutura e de equipamentos.

Em relação ao descarte, este deve ser realizado de acordo com a legislação. A Conama nº 393/2007 (BRASIL, 2007) dispõe sobre o descarte de água produzida em plataformas marítimas de petróleo e gás natural. O parâmetro mais importante a ser analisado é o TOG, que de acordo com a norma deverá obedecer à concentração média aritmética simples mensal de até 29 *mg/L* com valor máximo diário de 42 *mg/L*. Além desses parâmetros, as empresas operadoras de plataformas realizarão monitoramento semestral para fins de identificação da presença e concentração de parâmetros tais como:

- Compostos inorgânicos: arsênio, bário, cádmio, cromo, cobre, ferro, mercúrio, manganês, níquel, chumbo, vanádio e zinco;
- Radioisótopos: rádio-226 e rádio -228;
- Compostos orgânicos: hidrocarbonetos policíclicos aromáticos - HPA, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos - BTEX, fenóis e avaliação de hidrocarbonetos totais de petróleo – HTP através de perfil cromatográfico;
- Toxicidade crônica da água produzida determinada através de método ecotoxicológico padronizado com organismos marinhos; e
- Parâmetros complementares: carbono orgânico total - COT, pH, salinidade, temperatura e nitrogênio amoniacal total.

A Conama nº430/2011 (BRASIL, 2011) que alterou e complementou a Conama nº 357/2005 (BRASIL, 2005) dispõe sobre as condições padrões de lançamento de efluentes, tais como pH, temperatura, materiais sedimentáveis, óleo e graxas e demanda bioquímica de oxigênio – DBO. Essa norma fixa os parâmetros de óleo e graxas em até 20 *mg/L*.

As condições adequadas para o descarte da AP dependem da legislação do país onde ela está sendo produzida. Nos EUA, por exemplo, através da Agência de Proteção Ambiental – EPA, exige-se um máximo mensal de 29 *mg/L* de óleo e graxas no efluente. A Tabela 3 apresenta alguns padrões internacionais para o descarte no mar (STEWART e ARNOLD, 2011).

Tabela 3 - Concentração de água produzida ao redor do mundo.

| PAÍS | TOG/Limitações |
|--|--|
| Brasil | 29 <i>mg/L</i> (para todas as instalações) |
| Equador e Colômbia | 30 <i>mg/L</i> (para todas as instalações) |
| Argentina e Venezuela | 15 <i>mg/L</i> (para todas as instalações) |
| Indonésia | 25 <i>mg/L</i> (para todas as instalações) |
| Malásia, Meio Leste | 30 <i>mg/L</i> (para todas as instalações) |
| Nigéria, Angola, Camarões, Costa do Marfim | 50 <i>mg/L</i> (para todas as instalações) |
| EUA | 29 <i>mg/L</i> (para todas as instalações) |

Fonte: Motta (2014).

Uma prática muito comum de destinação desse efluente na indústria petrolífera é a sua injeção em reservatórios subterrâneos de água e reservatórios não produtores de petróleo (armazenamento

geológico) (MOTTA, 2014). Essa destinação está condicionada à resolução CONAMA nº 396/2008 (BRASIL, 2008), que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. Segundo Garbado (2007) essa forma de descarte é muito utilizada e se demonstra como uma solução para a problemática destinação.

De acordo com Vieira (2016), a água produzida pode ser reutilizada para irrigação em campos e plantações, porém essa não é uma prática comum devido a qualidade dessa água. Suas características físico-químicas inviabilizam esse reaproveitamento, além dos custos associados para adequar as condições para irrigação. Assim como o reaproveitamento da água para irrigação, existem outros métodos de reaproveitamento seja para fins industriais ou outras atividades, que também são considerados não convencionais devido aos custos associados para a realização desse tipo de destino.

No Brasil, os destinos mais adotados pela indústria petrolífera em campos *onshore* são a reinjeção ou injeção em reservatório de hidrocarbonetos como forma de recuperação secundária; descarte marítimo ou reaproveitamento não convencional (VIEIRA, 2016).

Segundo Motta (2014) a reinjeção é uma das formas de destinos mais adequadas, já que remove total ou parcialmente os resíduos gerados, e nos casos de recuperação secundária de hidrocarbonetos, transforma-se em matéria prima para o próprio processo.

De acordo com Curbelo (2002), o teor de óleos e graxas para a injeção ou reinjeção deve estar em níveis abaixo de 5 mg/L , pois o óleo remanescente pode bloquear os espaços porosos da rocha, especialmente as de baixa permeabilidade. Isto pode ocorrer devido a algumas frações de óleo pesadas que permanecem na água poderem formar borras ou fixar partículas inorgânicas nas paredes dos espaços porosos, que em outras condições fluiriam sem obstáculos.

Em relação aos tratamentos, a literatura apresenta diversos tipos de tratamentos, sempre visando obter os parâmetros necessários para o destino adequado em relação as normas legais, seja injeção, reuso ou descarte. Segundo Al-Ghouti *et al.*, (2019), os sistemas de tratamentos geralmente requerem uma série de operações unitárias para remoção dos contaminantes que não podem ser removidos através de um único processo. Além disso, o próprio tratamento ajuda a facilitar as opções para o seu destino, incluindo até a reutilização para fins agrícolas e industriais.

Segundo Arthur (2005), o tratamento da água produzida deve ser capaz de atingir os seguintes objetivos:

- Remoção de óleo sob as formas dispersas;

- Remoção de compostos orgânicos solúveis;
- Desinfecção, para remoção de bactérias e algas;
- Remoção de sólidos solúveis, turbidez e areia;
- Remoção de gases dissolvidos, como gases de hidrocarbonetos leves, CO_2 e H_2S ;
- Dessalinização, para remoção de sais dissolvidos, sulfatos, nitratos e agentes de incrustação;
- Abrandamento, para remoção de dureza em excesso;
- Remoção de compostos diversos, como os materiais radioativos de ocorrência natural;
- Ajuste da razão de adsorção de sódio (RAS). Nesse último caso, é adicionado cálcio ou magnésio e o objetivo é o reuso da água na irrigação.

Portanto, torna-se um desafio escolher algum tipo de tratamento que remova a maior parte dos contaminantes desse efluente. Geralmente o método mais barato é o mais preferível e o custo do tratamento depende principalmente da qualidade do efluente, preço da eletricidade e capacidade de tratamento (AL-GHOUTI *et al.*, 2019).

Em geral, o processo de tratamento tem três etapas principais: pré-tratamento, etapa principal de tratamento e o tratamento final de polimento. A etapa de pré-tratamento é feita para remover grandes gotículas de óleos e partículas. A etapa principal envolve o tratamento primário em que pequenas gotículas de óleo serão removidas em sistemas de separador API e o tratamento secundário que envolverá a remoção de gotículas e partículas menores usando flotação, hidrociclones, centrífugas e coalescedores em leito. O tratamento final é geralmente empregado para remover gotículas e partículas ultrapequenas, hidrocarbonetos dispersos ($< 10 \text{ mg/L}$) usando técnicas como filtros e membranas (AL-GHOUTI *et al.*, 2019).

Segundo Fakhru'l-Razi *et al.*, (2009), os tratamentos podem se subdividir em físicos, químicos e biológicos. A combinação física desses processos deve ser utilizada para realização dos diferentes objetivos de tratamento. O Quadro 1 apresenta algumas tecnologias de tratamento disponíveis.

Quadro 1 - Processos disponíveis para tratamento de água produzida.

| Tratamento | Processo | Remoção |
|------------|----------|---------|
|------------|----------|---------|

| | | |
|---|--|--|
| Coalescência | Coleta pequenas gotas de óleo para formar gotas maiores que podem ser removidas com mais facilidade | Óleo disperso e HPAs |
| Adsorção em carbono, carvão ativado, zeólita, resinas poliméricas, etc. | Tratamento físico-químico de superfície, no qual moléculas de fase gasosa ou líquida são aderidas a uma superfície sólida | Compostos orgânicos e inorgânicos, incluindo BTEX |
| Filtração profunda | Pode ser usado em uma variedade de meios de filtro: casca de noz, areia, carvão, cascalho, entre outros | Diferentes tipos de compostos, incluindo hidrocarbonetos |
| Flotação | Consiste em quatro etapas básicas: (1) geração de bolhas de ar, (2) contato entre bolhas de gás e gotas de óleo, (3) fixação de bolhas de gás em gotas de óleo e (4) ascensão da combinação ar-óleo, uma vez que esse agregado é significativamente menos denso que a própria água, ocorrendo separação de fases | Óleo disperso e HPAs |
| Ciclones e hidrociclones | Método físico para separar sólidos de líquidos com base na densidade de sólidos a serem separados | Óleo disperso, HPAs e partículas |
| Centrífugas | Utiliza aceleração centrífuga para reduzir ou aumentar a concentração da fase dispersa | Óleo disperso, HPAs e partículas |

HPA: Hidrocarbonetos poliaromáticos.

Fonte: Adaptado de Almeida (2019).

A coalescência é uma mesclagem de duas ou mais gotas em uma única gota, com a ruptura do filme de superfície de cada gota, formando uma gota nova e maior, independente das outras gotas. É um processo irreversível, diferente da floculação e sedimentação, que também permitem que duas

ou mais gotas se fundam em uma única gota. A coalescência é um processo de grande interesse para a separação de emulsões, pois durante esse fenômeno ocorre a quebra dessas emulsões. Os coalescedores mecânicos podem ser usados para mesclar pequenas gotas de óleo para formar gotas maiores, mostrando-se assim, como uma alternativa na separação primária do petróleo (ALMEIDA, 2019).

As tecnologias atualmente disponíveis removem principalmente o óleo disperso e não conseguem remover o óleo solúvel ou compostos aromáticos solúveis (GARBADO, 2007). É importante salientar que o tipo de destinação desse efluente implicará no método de tratamento, além disso se for necessário, poderão ser combinados diferentes métodos de tratamento.

4.4 Impactos ambientais

Muitos impactos ambientais estão associados a indústria petrolífera como um todo, principalmente na geração da água produzida. Ela é o principal efluente gerado na produção de óleo e gás. De um modo geral, pode-se afirmar que o potencial de geração de impactos está diretamente relacionado com a sua composição (VIEIRA, 2016). O Quadro 2 apresenta a relação entre os aspectos e impactos ambientais.

Quadro 2 - Relação de potenciais aspectos e impactos ambientais da água produzida.

| Aspectos | Impactos Ambientais |
|-------------------------------------|--|
| Volume elevado | Necessidade de superdimensionamento ou redimensionamento de infraestrutura. |
| Elevada concentração de sais | Salinização de solos; Salinização de águas superficiais e subterrâneas (lagos, lençol freático, lagoas e rios); Danos e mortandade da fauna e da flora terrestre e aquática; Corrosão e incrustações em equipamentos e instalações. |

(Continua)

Quadro 3 - Relação de potenciais aspectos e impactos ambientais da água produzida

(Conclusão).

| Aspectos | Impactos Ambientais |
|----------|---------------------|
|----------|---------------------|

| | |
|---|---|
| Presença de HPAs, BTEX e TOG | Contaminação de corpos d'água (impossibilitando determinados usos); Contaminação do solo (diminuição da fertilidade); Danos e mortandade da fauna e da flora terrestre e aquática. |
| Presença de metais pesados | Contaminação de solos; Contaminação de corpos d'água; Geração de depósitos e incrustações nas instalações. |
| Presença de bactérias redutoras de sulfato | Corrosão de instalações e equipamentos (Geração de H_2S); Problemas à saúde do trabalhador. |
| Presença de sólidos dispersos e em suspensão | Formação de depósitos e incrustações; Diminuição da permeabilidade do reservatório (Tamponamento). |

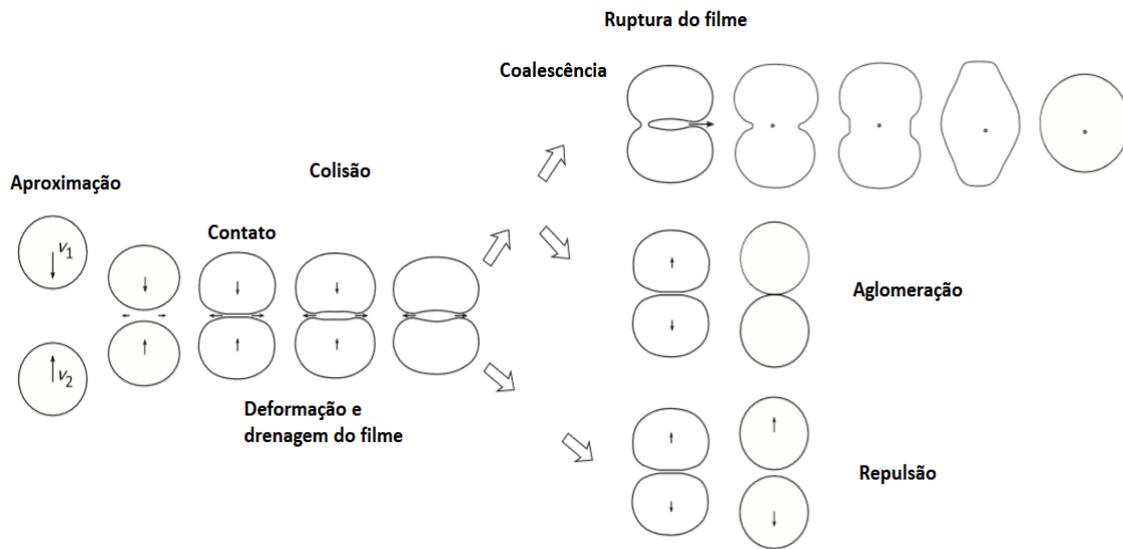
Fonte: VIEIRA (2016).

4.5 Processo de coalescência

Durante o processo de coalescência as gotículas colidem entre si. Sobre a colisão entre duas gotículas Kamp *et al.*, (2017) afirmou que essas podem resultar em coalescência, aglomeração ou repulsão entre as gotículas. Essas etapas podem ser observadas durante cada colisão entre as gotículas, mas a ocorrência e seu período de tempo podem diferir significativamente com as condições do processo. Além disso, os numerosos fatores que influenciam o processo de colisão decidirão se a colisão entre duas gotas resultará em coalescência, aglomeração ou repulsão.

A Figura 1 apresenta a sequência esquemática entre a colisão de duas gotas resultando nos processos de coalescência, aglomeração ou repulsão.

Figura 1 - Sequência esquemática da colisão de duas gotas e subsequente coalescência, aglomeração ou repulsão.

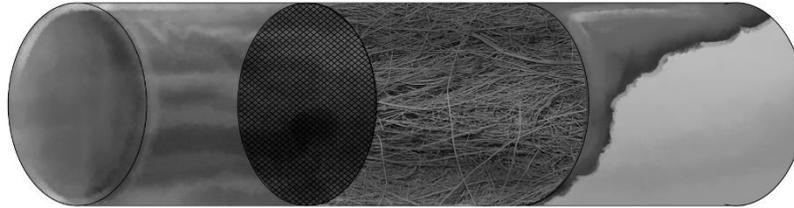


Fonte: Kamp *et al.*, (2017).

4.6 Leitos coalescentes

O tratamento com leitos coalescentes consiste em induzir a separação das gotas de óleo emulsionadas em água, através da passagem da emulsão por um leito poroso (leito coalescedor). O que ocorre, é a fusão de pequenas gotículas dentro do leito, através da colisão com outras gotas menores ou por aderência das gotículas ao material do leito. Com isso, há formação de gotículas maiores por coalescência, desprendendo-se assim, do leito poroso, devido a forças dinâmicas (JAYA, 2012; PERRY; GREEN, 2007). Durante esse processo, as gotículas se fundem umas às outras e aumentam o seu diâmetro, facilitando assim, a separação por diferença de densidade entre as fases. A Figura 2 apresenta um leito coalescente bem como seu princípio de funcionamento.

Figura 2 – Coalescedor de leite horizontal: 1ª seção (emulsão), 2ª seção (gotas coalescidas).



Fonte: Autor (2020).

Após a passagem pelo leito, ocorre a coalescência das gotas, ou seja, aumento de tamanho das gotas a ponto delas se desprenderem do leite por ação gravitacional. As gotículas coalescidas, ou seja, de maior diâmetro, formadas depois do leito coalescedor, requerem um menor tempo de permanência no equipamento, tornando-se mais propensas a separação gravitacional (JAYA, 2012).

Segundo Govedarica *et al.*, (2013) os leitos coalescentes apresentam algumas vantagens em relação a outros processos de separação, dentre as quais destacam-se a facilidade de instalação, autolimpeza dos leitos, possibilidade de automação e trabalho contínuo durante um longo período de tempo. Sua desvantagem consiste no entupimento dos poros do leito, fazendo com que seja necessário efetuar a troca do mesmo.

O material do leito pode ter propriedades bastante diferentes. Os dois tipos de leito usualmente utilizados são os leitos de fibras e o granular, além disso o material ideal deve ter grande capacidade de absorção de óleo (ZHAO; LI, 2011). Ao compararmos ambos os materiais, o leito de fibras pode ser confeccionado para ter uma maior porosidade e superfície específica que os leitos granulares, por isso possibilita uma melhor separação de fases que o leito granular, para uma mesma altura de leito e condições operacionais similares. Apesar dessa vantagem em relação aos leitos granulares, o leito de fibra é mais vulnerável a obstrução por sólidos (MOTTA, 2014).

A operação dos leitos coalescedores se assemelha muito ao processo de filtração. Alguns mecanismos de captura das partículas (impacto inercial, interceptação indireta, difusão, atração eletrostática etc.) são semelhantes nos dois processos. Porém, a diferença consiste na saída do processo. A concentração de óleo, no caso dos leitos coalescentes, é a mesma na entrada e na saída do processo, além de sua operação ocorrer em estado estacionário. Já durante a filtração, ocorre a redução do teor de óleo devido a barreira provocada pelos filtros (MOTTA, 2014).

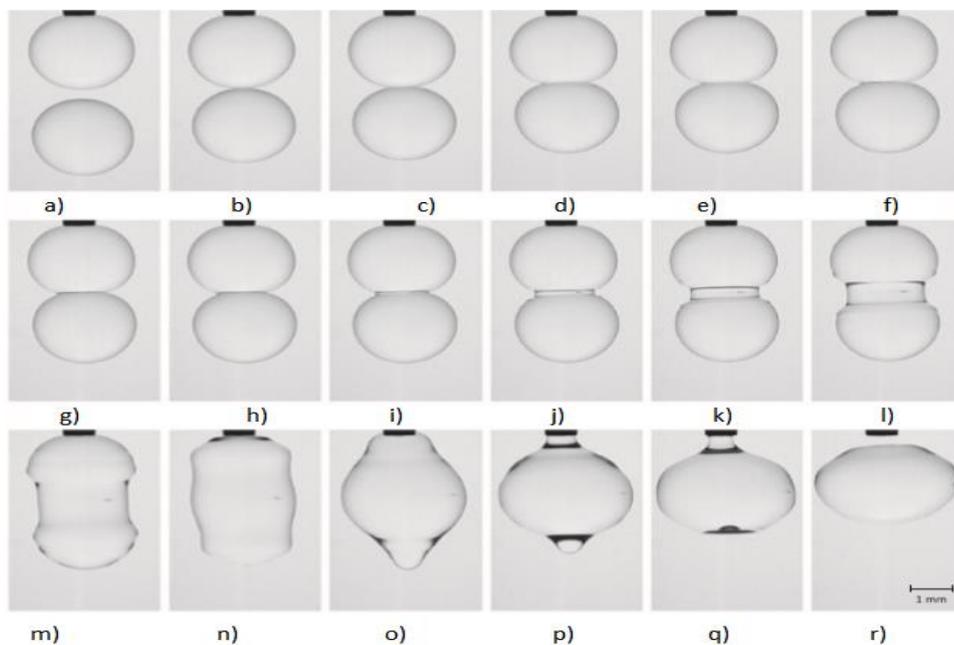
4.7 Mecanismos de coalescência

De acordo com a literatura, são três os principais mecanismos de coalescência e podem ser distinguidos por: coalescência das gotículas na interface líquido-líquido, coalescência das gotículas adjacentes e coalescência das gotículas no leito poroso (SOKOLOVIĆ *et al.*, 2016).

4.7.1 Coalescência entre gotículas adjacentes

Segundo Sokolović *et al.*, (2016) a coalescência entre gotículas adjacentes compreende as seguintes etapas: colisão das gotículas de óleo, formação do filme de fase contínua entre as gotículas, ruptura do filme, drenagem do filme, agregação das gotículas e formação de gotas ampliadas. A Figura 3 apresenta uma fotografia sequenciada da aproximação de duas gotículas de tolueno em água ocorrendo coalescência.

Figura 3 - Coalescência entre gotículas adjacentes: duas gotas de tolueno em água.



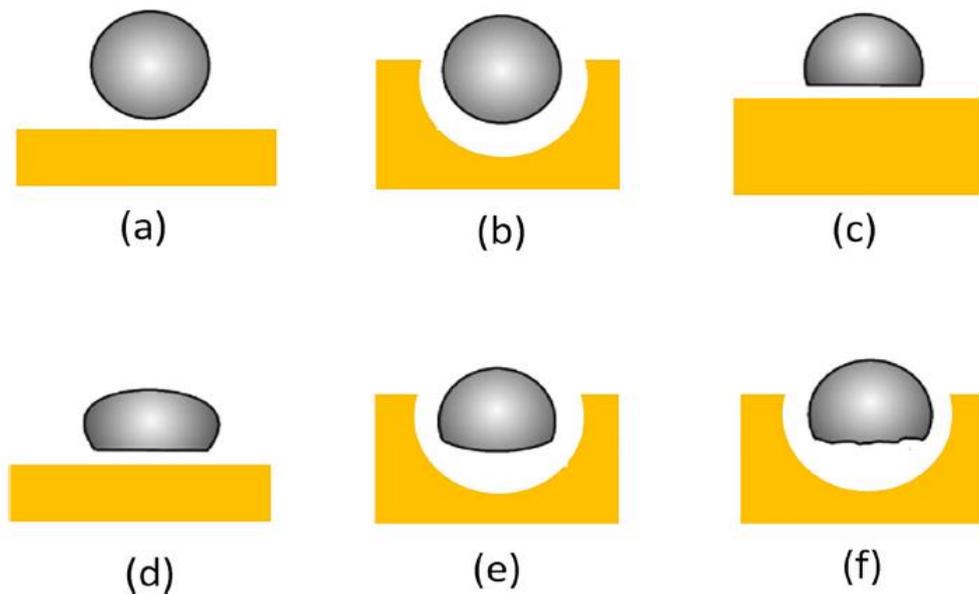
Fonte: Kamp (2017).

Na Figura 3, observa-se a aproximação entre duas gotículas de tolueno, em a) até ocorrer a colisão entre as gotículas em b) e c). Logo após a colisão, as gotículas sofrem deformação seguida da drenagem do filme, como mostrado de d) até i). De j) a m) observa-se as pontes de coalescência que resultarão na confluência das gotas, finalizando assim o processo de coalescência que ocorrerá até que forças hidrodinâmicas promovam a separação dessas gotículas.

4.7.2 Coalescência de gotículas na interface líquido-líquido

Os mecanismos de coalescência de gotículas na interface líquido-líquido consistem no transporte de gotículas na interface do fluido, na formação de película de fase contínua entre as gotículas e o fluido, ruptura, quebra do filme, drenagem e coalescência de gotículas na superfície da fase contínua. A Figura 4 representa os modelos de coalescência na interface líquido-líquido (SOKOLOVIĆ, 2016).

Figura 4 - Esquema representativo dos mecanismos de coalescência de gotículas na interface líquido-líquido.



Fonte: Almeida (2019).

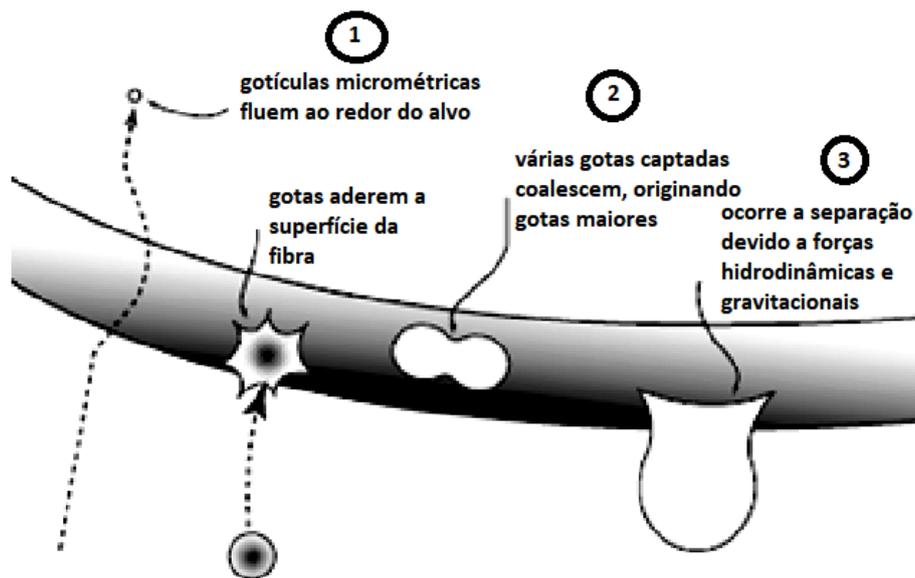
A coalescência é apresentada na Figura 4, onde uma gota se aproxima de uma interface rígida em (a). Pode ocorrer os seguintes casos: a deformação ocorre apenas na interface líquida, mas a gotícula permanece rígida (b), ou pode ocorrer a deformação de gotas deixando a interface líquido-

líquido inalterada (c). Ainda, a gota pode se deformar devido ao seu peso (d); pode ocorrer ambos os casos de deformação, na gota e na superfície de contato (e), formando uma película de formato radial, ou uma superfície corrugada de gotículas (f) (SOKOLOVIĆ *et al.*, 2016).

4.7.3 Coalescência de gotículas em leitos de fibras

O processo de coalescência em leitos fibrosos aumenta o diâmetro das gotículas a jusante do leito fazendo com que o tempo de residência diminua em relação a coalescência natural. O comportamento da coalescência em leitos fibrosos pode ser dividido em três etapas, como apresenta a Figura 5 (JAYA, 2012):

Figura 5 – Principais etapas da coalescência em um leito de fibras.



Fonte: JAYA (2012).

Na primeira etapa ocorre a captura e adesão de gotas dispersas à superfície da fibra. Segundo Jaya (2012) e ACS Industries (2006) os mecanismos de transporte que descreve essa etapa são: interceptação direta, interceptação indireta, impacto inercial, sedimentação e difusão. Logo em seguida, acontece a coalescência dessas gotas na superfície do leito.

Os mecanismos de transporte fazem com que as gotas se choquem e se fundam em gotas maiores. Neste caso, a velocidade do fluxo, bem como o tempo de residência devem ser suficientes para que não ocorra o arraste das gotas que ainda não coalesceram. Por fim, ao final da coalescência as gotas são liberadas a jusante do leito, onde ocorre a separação por forças hidrodinâmicas e gravitacionais (JAYA, 2012; ACS INDUSTRIES, 2006).

4.8 Fatores que influenciam na eficiência do processo de coalescência

Vários fatores são considerados importantes no processo de coalescência, a saber, o efeito da velocidade do fluido, propriedades do leito, propriedades das fibras, propriedades de ambos os líquidos (óleo e água produzida) e os mecanismos de coalescência. Acaba sendo difícil discuti-los separadamente, pois vários aspectos físicos são alterados simultaneamente quando uma propriedade é alterada (ALMEIDA, 2019).

Em geral, a coalescência é inerentemente determinada por propriedades interfaciais, logo pequenas quantidades de impurezas na superfície do leito coalescente podem alterar drasticamente a probabilidade de coalescência, mas podem ter apenas uma influência pequena ou não quantificável na tensão interfacial (KAMP *et al.*, 2017).

Como a coalescência é um fenômeno interfacial, ela é fortemente influenciada pelas propriedades das fases dispersa e contínua, isto é, as fases correspondentes da emulsão O/A, e dos efeitos que ocorrem na interface entre essas fases. Pode-se entender por fase dispersa como as gotículas de óleo distribuídas em água (fase contínua). Além disso, as condições ambientais podem ter um impacto sobre a coalescência. Assim, os fatores que influenciam são classificados de acordo com as propriedades das fases contínua e dispersa, bem como os efeitos na interface entre essas fases (KAMP *et al.*, 2017).

Os principais fatores que influenciam no processo de coalescência estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 4 – Fatores que influenciam no processo de coalescência.

| Fase Contínua | Interface | Fase dispersa |
|---|--|----------------------------------|
| Viscosidade | Tensão interfacial | Viscosidade |
| Densidade | Potencial de superfície | Densidade |
| Entrada de energia/fluxo de velocidade | Componentes ativos de superfície: surfactantes, partículas, íons | Diâmetro da gota |
| Força iônica, pH (se for aquosa) | Transferência de massa | Força iônica, pH (se for aquosa) |
| Condições ambientais do sistema | | |
| Temperatura, pressão, geometria, molhabilidade, campo eletrostático, micro-ondas, ultrassom | | |

Fonte: KAMP *et al.*, (2017).

Como comentado anteriormente, a coalescência é um fenômeno fortemente influenciado pelas propriedades e efeitos das fases contínua e dispersa, e especialmente pela interface correspondente entre elas. Na fase contínua, propriedades como viscosidade e densidade influenciam na drenagem do filme, ocasionando assim, influências no processo de coalescência. A coalescência é um fenômeno interfacial, pois é conduzido pela minimização da área/energia interfacial. Em geral, uma menor área de drenagem do filme aumenta a probabilidade de ocorrer esse fenômeno. Em relação às propriedades da fase dispersa, o diâmetro da gota é o parâmetro mais importante, pois em determinados regimes a coalescência diminui ou aumenta em relação a esse diâmetro (KAMP *et al.*, 2017).

4.8.1 Orientação do fluxo em um coalescedor

A eficiência do processo de coalescência é pode ser influenciada pela direção do fluxo. Essa orientação um coalescedor pode estar disposta na horizontal, vertical para baixo e vertical para cima (ŠEĆEROV *et al.*, 2006).

Šećerov Sokolović (2006) determinou experimentalmente que a eficiência de separação de um coalescedor de leito em estado estacionário é altamente influenciada pelo modo do fluxo a ser tratado. O fluxo e a eficiência da coalescência são condicionados pelos equilíbrios das forças que atuam no leito. Este equilíbrio é determinado, principalmente, pela densidade da fase dispersa e pelo modo de fluxo do fluido.

Šećerov *et al.*, (2006) estudaram três diferentes orientações de fluxo (horizontal [H], vertical ascendente [VA] e vertical descendente [VD]) em coalescedores com leito composto por poliuretano liso, em uma ampla gama de propriedades do leito como: comprimento do leito, permeabilidade e porosidade. Foram analisadas as velocidades de trabalho (16 – 50 m/h), em três comprimentos de leito (3, 5 e 10 cm). A emulsão estudada era composta de óleo de base naftênica em água com concentração de 500 mg/L.

Os autores concluíram que em altas velocidades, o fluxo horizontal se mostrou mais eficiente que os verticais, enquanto que em baixas velocidades não houve diferença significativa. Além disso, em altas velocidades do fluido, a operação de fluxo vertical ascendente [VA] foi a menos eficiente para todos os comprimentos de leito investigado.

Outro aspecto importante na orientação do fluxo são as forças hidrodinâmicas, gravitacionais e flutuantes. As forças gravitacionais e flutuantes atuam sempre no plano vertical, independente da orientação horizontal ou vertical, já a força hidrodinâmica é determinada pela orientação do fluxo.

No sentido horizontal, as forças hidrodinâmicas atuam na mesma direção do fluxo, e as forças gravitacionais e flutuantes atuam no plano vertical favorecendo a separação das fases. Essas forças atuam antes mesmo do efluente passar através do leito, devido a isso uma parte da fase dispersa desprende-se antes da passagem pelo leito.

No sentido vertical, as forças atuam no mesmo sentido, logo não há separação antes do leito. Quando o fluxo é ascendente, as forças hidrodinâmicas agem favorecendo a separação do óleo da água, devido a densidade desse ser menor. No fluxo descendente, as forças hidrodinâmicas favorecem as gotas a permanecer no leito, pois à medida que ocorre a coalescência, e devido a densidade do óleo

ser menor, elas tendem a subir mantendo-se assim no leito, o que aumenta a coalescência e a eficiência de separação (ŠEĆEROV *et al.*, 2006).

De acordo com Almeida (2019), o coalescedor vertical é usado para separar a água dos hidrocarbonetos quando a tensão interfacial é superior a 3 dyn/cm. Na configuração horizontal, uma zona de sedimentação é capaz de realizar a separação por gravidade. O coalescedor horizontal é utilizado quando a tensão interfacial é menor que 3 dyn /cm ou para a separação do óleo da fase aquosa, ou apenas para separar os hidrocarbonetos.

4.8.2 Velocidade do Fluido

A velocidade é um dos fatores mais importantes em dinâmica dos fluidos. Como o processo de coalescência líquido-líquido é um fenômeno onde ocorre movimentação de gotículas, é de se esperar que a velocidade tenha influência na eficiência desse processo. Sokolović *et al.*, (2007) relataram que a velocidade de um fluido (v) desempenha um papel importante no fluxo de uma emulsão por um meio poroso, uma vez que os mecanismos de captura, probabilidade de captura entre as gotículas, distribuição da fase dispersa e a separação das gotículas coalescidas são controlados por ela.

Segundo Motta (2014) a velocidade é um dos parâmetros essenciais em todos os mecanismos de aproximação das gotículas, podendo influenciar diretamente, como ocorre com o fluxo do efluente quando este se aproxima do leito ou de forma indireta, quando há alteração do número de Reynolds e impacta nas condições de turbulência do fluxo. Portanto, esse parâmetro se torna fundamental na eficiência de remoção de óleo em coalescedores.

De acordo com Jaya e Kometz (2012), os coalescedores têm maiores eficiências em fluxo laminar por vários motivos, dentre os quais destacam-se:

1. As gotículas permanecerão nas linhas de transmissão em torno de um fio ou alvo de fibra.
2. Velocidades altas do fluido superam as forças de tensão superficial e 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 leitos coalescentes e, portanto, mais tempo para impacto gota-leito, colisões gota a gota e sedimentação de Stokes no meio.

Um fato interessante a respeito da velocidade dos fluidos em leitos coalescentes é a chamada velocidade crítica defendida por alguns autores (SAREEN *et al.*, 1966) como a velocidade máxima de trabalho para alcançar determinada concentração final do efluente tratado. Quando a velocidade está abaixo do valor crítico, ocorre coalescência e as gotas grandes são separadas após passarem pelo leito. Se a velocidade for maior que a crítica, ocorre a redispersão e a separação da gota não é realizada.

Sokolović, Sokolović e Doković (1997) estudaram a importância da velocidade crítica no processo de coalescência. Os autores utilizaram um coalescedor horizontal de 1 m de comprimento e diâmetro 0,05 m. Eles trabalharam com leitos de fibras de poliuretano e concentrações do efluente de 500, 800 e 2000 *mg/L*, com diâmetro médio de gotas do óleo (Ø_g) de 20 μm , velocidade entre 10 e 45 m/h e altura do leito com valores entre 3 e 15 cm. Os autores concluíram que o efeito da concentração praticamente independe do valor da velocidade quando essa está abaixo da velocidade crítica. Quando a velocidade do fluido excede seu valor crítico a influência da concentração é relevante, ou seja: o aumento na concentração do efluente de entrada provoca um aumento na concentração do efluente de saída, tanto maior quanto maior a velocidade do fluido.

4.8.3 Materiais do leito poroso

Segundo Govedarica (2013) as duas propriedades principais dos materiais do leito poroso são: a porosidade do leito e o seu comprimento. Diferentes tipos de materiais possuem diferentes porosidades, por isso é tão importante analisar o material a ser utilizado no leito a fim de que o mesmo mantenha uma boa eficiência no processo de separação no efluente.

Recentemente, muitos materiais artificiais de leitos coalescentes, incluindo polipropileno, PVC, estireno-butadieno, borracha, fibra, nylon mc modificado, aço carbono, aço inoxidável e fibra de vidro têm sido utilizados para remoção de óleo. As propriedades de alguns desses materiais estão listadas na Tabela 4 (ZHAO; LI, 2011).

Tabela 4 - Propriedades de alguns materiais utilizados na confecção de leitos coalescentes.

| Materiais | Forma | Densidade (Kg/m³) | Tensão crítica superficial (N/m) |
|------------------|---------------|-------------------------------------|---|
| Polipropileno | Placa | 0,91 | 0,031 |
| PVC | Borda Regular | 1,21 | 0,039 |
| Cerâmica | Granular | 1,50 | 0,123 |
| Aço Inoxidável | Borda Regular | 7,80 | 0,108 |
| Fibra de Vidro | Borda Regular | 1,8-2,0 | 0,025 |

Fonte: Zhao e Li (2011).

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.*, 2013).

De acordo com Zhao e Li (2011) as propriedades da superfície do material têm um efeito significativo no processo de coalescência. Os materiais ideais devem ter grande capacidade de absorção de óleo.

Šečerov *et al.*, (2014) estudaram quatro tipos de materiais utilizados no leito coalescedor (poliuretano – PU, dois tipos de polietileno tereftalato (denominados BA1 e PE) e polipropileno) para separar quatro emulsões com óleos minerais de propriedades diferentes. Todos os materiais escolhidos para o leito são materiais residuais. As fibras de poliuretano foram obtidas por cortes de blocos de resíduos da indústria de móveis, 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 experimentos foram realizados em um coalescedor de leito horizontal em escala laboratorial. A concentração de óleo na entrada do coalescedor foi de 500 mg/L, a temperatura de trabalho 20°C e o comprimento do leito de 5 cm. Além disso, os estudos foram realizados na faixa de velocidade de fluido (19-80 m/h). Eles concluíram que os materiais PU e BA1 possuem grandes áreas com altos valores de velocidade crítica, excedendo 50 m/h na zona de maior permeabilidade do leito. Além disso o material PU não é sensível à diminuição da permeabilidade do leito devido ao entupimento dos poros, enquanto o material BA1 é sensível. Portanto, o poliuretano apresentou mais vantagens em relação aos outros materiais para a separação de óleos de diferentes naturezas.

Dacal (2017) estudou o comportamento de um coalescedor de leite no processo de separação de óleo em um efluente sintético de água produzida de petróleo. A autora utilizou dois tipos de leitos: fibra de coco seco e fibra sintética com material abrasivo. Os experimentos foram realizados em um coalescedor com fluxo na direção horizontal, em estado estacionário, com velocidade de fluxo (8,7 – 25,9 m/h) e comprimentos de leite de 5, 10 e 15 cm. A concentração do efluente sintético na entrada do coalescedor foi de 400 mg/L. Os resultados experimentais apresentaram eficiências entre 40,3 a 96,7% para fibra de coco e 69,2 a 96,8% para fibra sintética, tornando-se assim, materiais alternativos para o tratamento de emulsões O/A.

4.8.4 Comprimento do leite

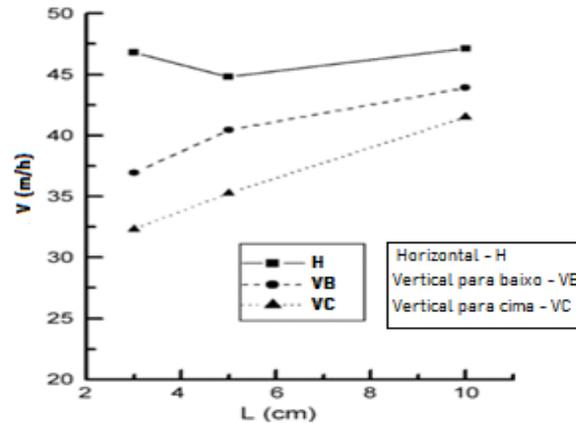
O comprimento do leite é uma das variáveis mais importantes no processo de coalescência. Sherony e Kintner (1971) afirmaram que em leitos fibrosos com diâmetros menores e leitos mais longos resultam uma maior eficiência no processo de coalescência.

Sareen *et al.*, (1996) também afirmaram que o aumento do leite resulta num aumento no grau de coalescência, pois um comprimento maior implica num maior tempo de residência no leite favorecendo assim, a coalescência das gotas.

Sokolović *et al.*, (2007) estudaram o efeito do comprimento de um leite coalescente de fibra de poliuretano liso (PU), em estado estacionário, em uma emulsão óleo em água, ao longo de três modo de fluxo: horizontal – H , vertical para baixo – VB e vertical para cima - VC. Os autores investigaram uma ampla gama de propriedades do leite, tais como: o comprimento (1-15 cm), a permeabilidade, a porosidade, a superfície sólida e a proporção de tamanho do poro/gota.

Os resultados obtidos em relação ao comprimento foram o aumento da velocidade crítica com o aumento do comprimento num intervalo de 3 a 10 cm, independente da orientação do fluxo, conforme apresentado na Figura 6. Os autores afirmaram que o comprimento crítico do leite depende de várias propriedades do sistema, como o modo de fluxo do fluido, a permeabilidade e o TOG do óleo na entrada do processo. Além disso, os autores encontraram um comprimento ótimo para o experimento em questão de 5 cm.

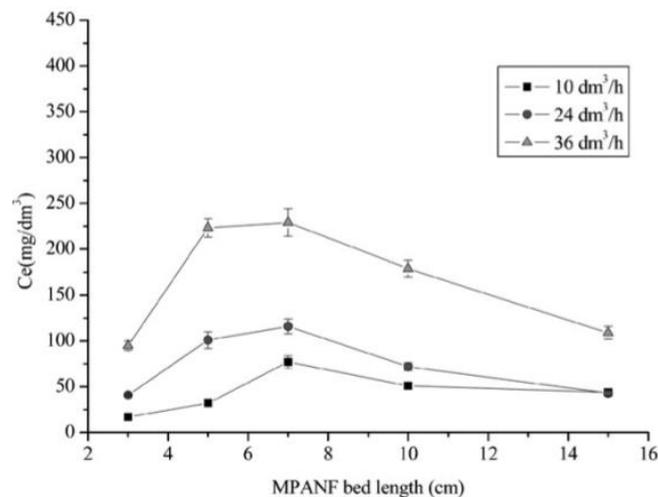
Figura 6 - Dependência da velocidade crítica no comprimento do leito para concentração de entrada de 500 mg/L para todos os três modos de fluxo aplicados.



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

Ji *et al.*, (2009) estudaram a separação de uma emulsão de diesel em água, a uma concentração constante de 630 mg/dm³ utilizando fibra de poliacrilonitrila (PANF) e fibra de poliacrilonitrila modificada (MPANF). As velocidades estudadas foram (10, 24 e 36 dm³/h) e os comprimentos estudados foram (3, 5, 7, 10 e 15 cm). Os experimentos foram realizados em estado estacionário. Os autores analisaram o efeito do comprimento do leito no processo de coalescência, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Influência do comprimento do leito de fibra de poliacrilonitrila modificada (MPANF) sobre a concentração do efluente (concentração do afluente = 630 mg/dm³).

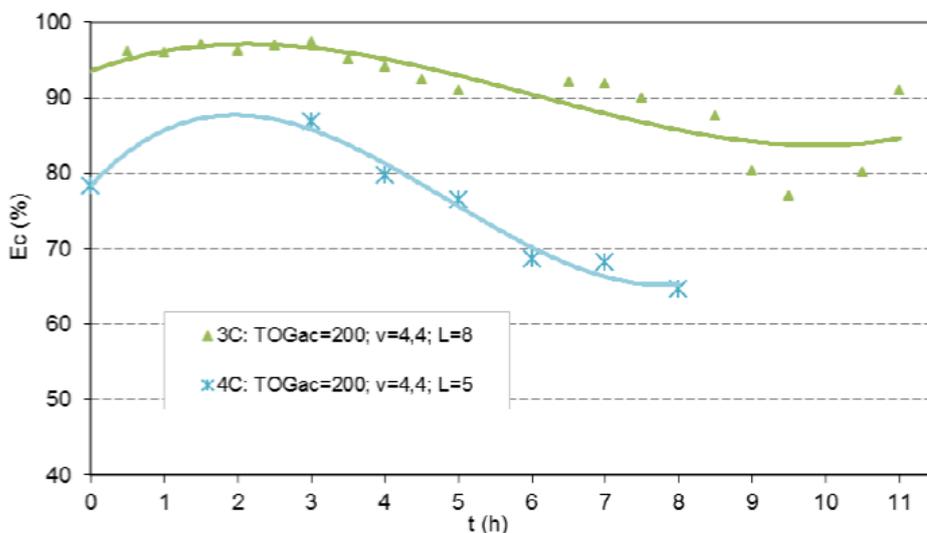


Fonte: Ji *et al.*, (2009).

De acordo com a Figura 7, uma concentração máxima de efluente foi obtida para o leito de comprimento 7 cm, e o valor mínimo foi obtido para os leitos de comprimentos 3 cm e 15 cm, por questões de economia de material o leito selecionado como ideal foi o de comprimento 3 cm. Esse fato sugere que as gotas de óleo coalescidas inicialmente, nas camadas mais rasas do leito, são redispersas, nas camadas intermediárias e as gotas de óleo redispersas podem coalescer novamente durante a passagem através das partes restante do leito. Além disso, os autores comprovaram existir um valor ótimo para o comprimento do leito a fim de que o leito forneça maior eficiência de remoção de óleo, também chamado de comprimento ótimo ou crítico.

Motta (2014) estudou a influência da altura do leito em um coalescedor composto por resinas poliméricas de troca catiônicas, em condição de fluxo ascendente na separação de água produzida de petróleo. Foram testadas duas concentrações na alimentação, com TOG em valores de 200 e 400 mg/L . O autor avaliou dois comprimentos de leitos: 5 e 8 cm, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Evolução da eficiência do coalescedor para valor de TOG de 200 mg/L.



Fonte: MOTTA (2014).

De acordo com a Figura 8, os resultados obtidos atingiram valores de eficiências média de 86% para o leito maior e 65% para o menor. Verifica-se uma maior eficiência para o leito de 8 cm, em todo o período de tempo dos ensaios. De acordo com Motta (2014), é possível que a probabilidade de captura das gotas pelos grãos que formam o leito, ocorra de forma mais intensa para o leito de 8 cm do que o menor leito.

5 METODOLOGIA

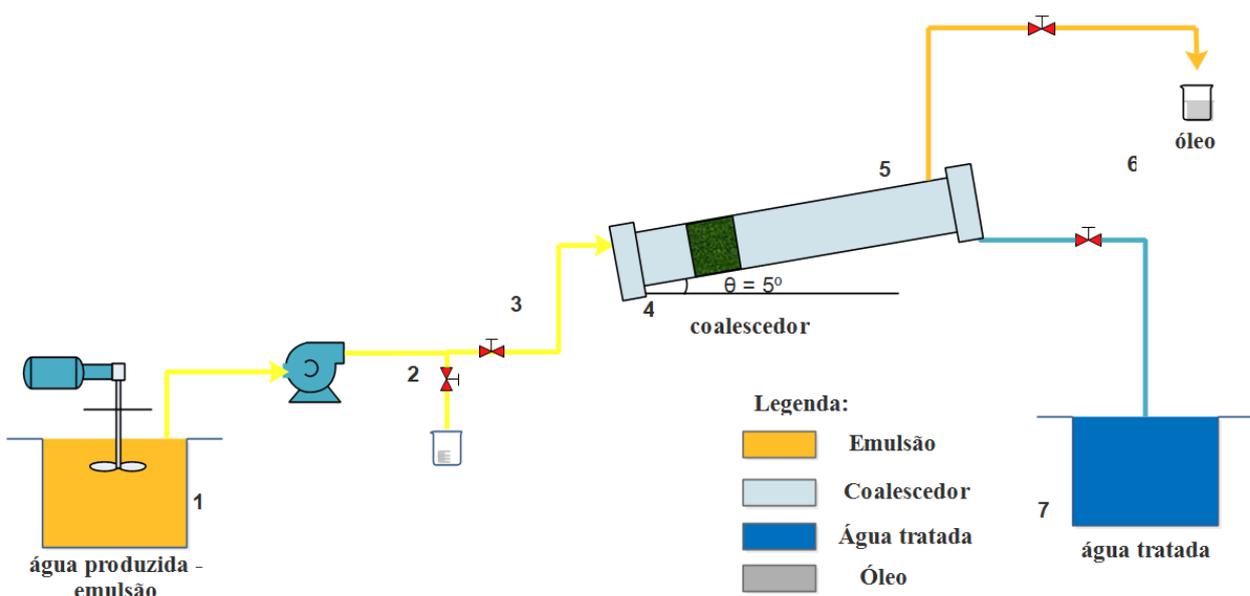
Nesta seção são apresentadas as metodologias detalhadas dos procedimentos experimentais realizados neste trabalho. Esta seção está dividida em quatro partes: unidade experimental, o coalescedor em leito, as condições experimentais e análise do teor de óleos e graxas.

5.1 Unidade experimental

A unidade experimental utilizada neste estudo foi montada no Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), Campus A. C. Simões, Universidade Federal de Alagoas (UFAL). O objetivo do processo empregado na unidade experimental foi a remoção de óleo da água sintética de produção de petróleo.

Os estudos foram realizados em um equipamento de coalescência, com leito horizontal inclinado, utilizando a fibra do coco seco para o recheio do leito. A unidade experimental projetada é constituída por um equipamento coalescedor em leito, uma bomba peristáltica e dois tanques. A Figura 9 apresenta a unidade piloto de forma detalhada.

Figura 9 - Unidade experimental esquematizada.



Fonte: Autor (2020).

O efluente sintético de água produzida foi acondicionado em um tanque de aproximadamente 150 L (1), onde um agitador mecânico promoveu a dispersão do efluente, homogeneizando a emulsão continuamente. Uma bomba peristáltica (Masterflex, modelo 7591-55) foi utilizada para transferir o efluente sintético para o coalescedor. A válvula (2) após a bomba peristáltica foi utilizada para fazer a amostragem da alimentação; em todos os experimentos a amostragem nesse ponto foi realizada em triplicata. A válvula (3) é a da alimentação e deve permanecer sempre aberta, sendo fechada apenas no momento da coleta das amostras.

O coalescedor horizontal (5) foi construído com material acrílico transparente. Ele possui inclinação de aproximadamente 5°, o que facilita o acúmulo de óleo durante o percurso. O leito coalescedor foi composto por fibras de coco umedecidas em petróleo. Chicanas foram construídas com o mesmo material do coalescedor e dispostas após o leito coalescedor, na zona de sedimentação do equipamento.

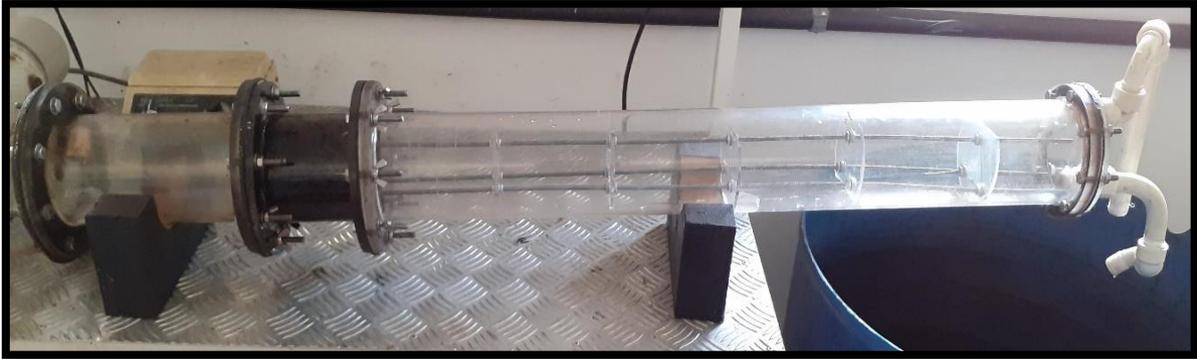
A emulsão passa pelo leito coalescedor e este promove a coalescência das gotículas de óleo presentes na água produzida. Após esse processo, as gotículas de óleo são coalescidas, formando gotas maiores, se acumulando na parte superior do equipamento, devido a densidade ser menor em relação a água. Logo em seguida esse óleo é armazenado em um béquer (6) conforme apresentado na Figura 9.

A água tratada foi adicionada em um tanque (7), com capacidade de aproximadamente 100L, onde foram coletadas amostras para analisar a concentração de óleo presente. Neste ponto, todas as amostras foram coletadas em triplicata.

5.1.1 Coalescedor

O coalescedor é composto por 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. O leito é acoplado entre a entrada e a zona de sedimentação do equipamento. A Figura 10 apresenta o equipamento coalescedor.

Figura 10 – Unidade experimental: coalescedor com chicanas.

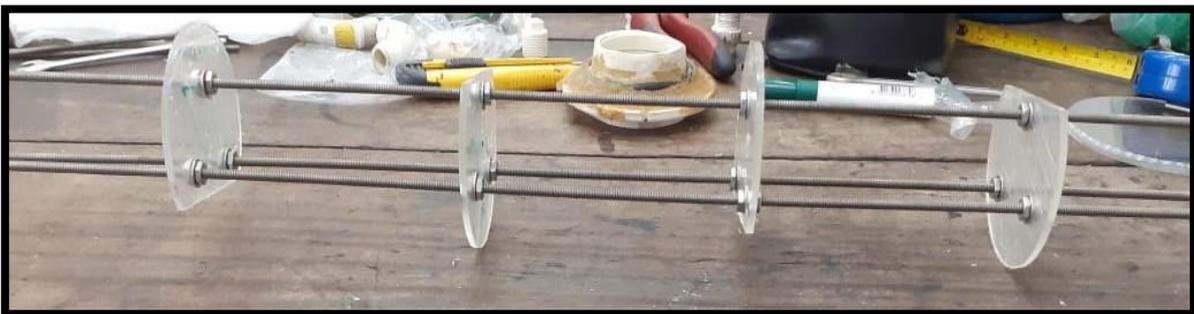


Fonte: Autor (2020).

5.1.2 Construção das chicanas

As chicanas foram construídas a partir de placas de acrílico com diâmetro próximo do diâmetro interno do coalescedor, com cortes nas partes superior e inferior, como apresentado na Figura 11.

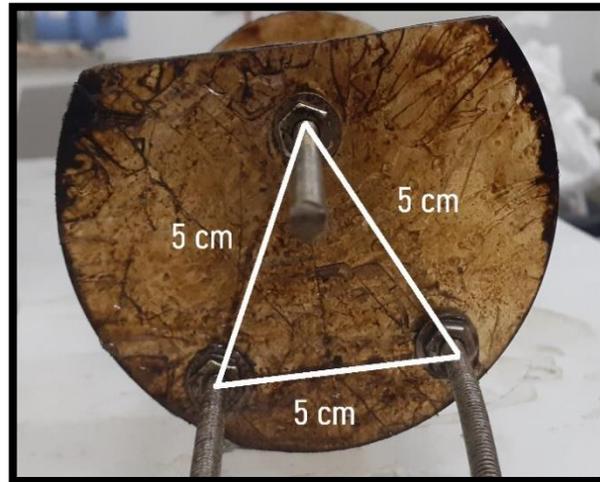
Figura 11 - Modelo das chicanas construídas.



Fonte: Autor (2020).

Foram acopladas 5 chicanas em hastes de parafusos, separadas umas das outras na distância de 13 cm. Essa distância foi escolhida de modo a manter as chicanas equidistantes umas das outras. A Figura 12 apresenta o modelo das chicanas utilizadas neste estudo.

Figura 12 - Distância entre as hastes na chicana.



Fonte: Autor (2020).

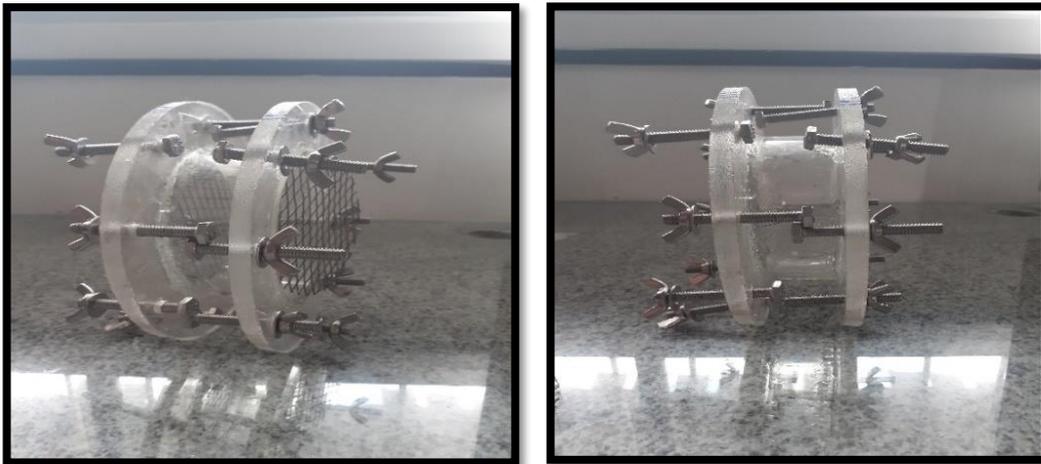
A utilização das chicanas tem como objetivo aumentar o tempo de residência do efluente no equipamento. Sendo assim, as forças hidrodinâmicas e gravitacionais irão atuar de forma a melhorar o processo de separação do óleo da água.

5.1.3 Leito coalescedor

O leito foi construído de material acrílico, o mesmo material utilizado na construção do equipamento e das chicanas. Foram construídos dois leitos de comprimento 5 e 10 cm, com diâmetro interno de 9,4 cm e externo de 10,0 cm, nas mesmas dimensões do coalescedor. Eles foram construídos de modo a minimizar a perda de carga do fluido pelo leito, evitando também caminhos preferenciais, além de facilitar a sua troca.

A Figura 13 apresenta o modelo do leito construído, onde as fibras foram compactadas e a Figura 14 apresenta o material do recheio utilizado no experimento.

Figura 13 - Leito de acrílico, 5 cm.



Fonte: Autor (2020).

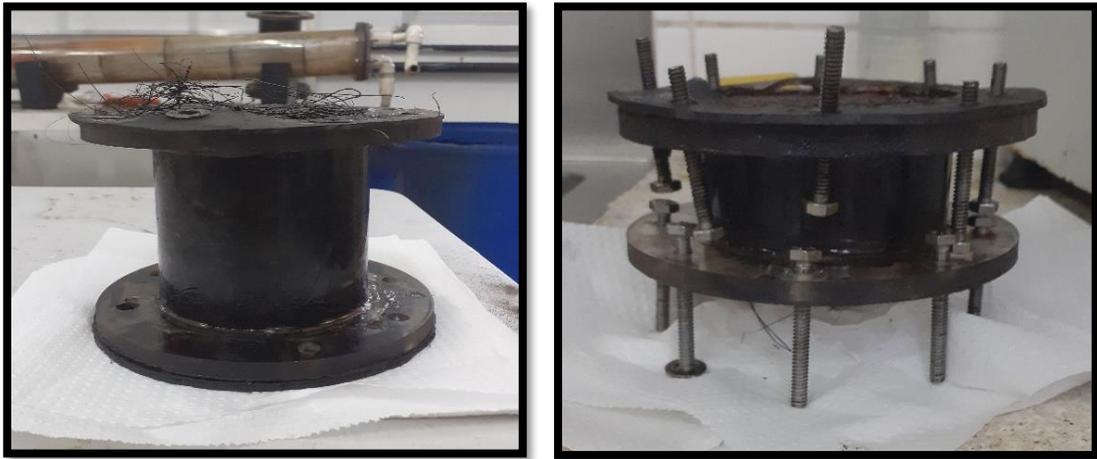
Figura 14 - Fibras de coco.



Fonte: Autor (2020).

As fibras de coco seco foram compactadas no leito de material acrílico e umedecidas em petróleo por alguns minutos com o intuito de melhorar o grau de molhabilidade das mesmas, além de possibilitar o estado estacionário nos ensaios. A Figura 15 apresenta os leitos umedecidos em petróleo.

Figura 15 - Cesto metálico de 10 e 5 cm com fibras de coco umedecidas em petróleo e empacotadas no leito de acrílico.



Fonte: Autor (2020).

O leito de 15 cm foi composto pelos leitos de 10 cm e 5 cm, em série. A Figura 16 apresenta os leitos montados na disposição de 15 cm de leito.

Figura 16 - Leito na disposição de 15 cm.



Fonte: Autor (2020).

5.1.4 Caracterização da biomassa utilizada

As fibras utilizadas nesse trabalho são típicas do Brasil e fáceis de serem encontradas na região Nordeste. As cascas de coco seco foram submetidas a secagem ao ar livre e após a secagem as amostras foram cortadas e trituradas usando um moinho de facas tipo willye da marca SPLabor modelo SP-31. O recheio do leito foi composto por essas fibras. Elas foram pesadas e a suas massas estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Massa das fibras do leito.

| Comprimento do Leito (cm) | Massas das fibras (g) |
|---------------------------|-----------------------|
| 5 | 45,53 |
| 10 | 91,07 |
| 15 | 136,60 |

Fonte: Autor (2020).

As fibras foram compactadas no leito de modo a preencher todo o volume. Em todos os ensaios, as massas foram mantidas constantes. Foram utilizadas a mesma proporção de massa para os leitos estudados. Como está apresentado na Tabela 6, a massa do leito 10 cm equivale a duas vezes a massa do leito 5 cm. Para o leito de 15 cm, a massa total equivale a soma das massas dos leitos menores.

As fibras de coco seco foram caracterizadas pela análise termogravimétrica (TGA, do inglês *Thermal Gravimetric Analysis*) para observar as temperaturas em que ocorre a perda de massa do material. Essas análises foram realizadas em uma termobalança (Shimadzu mod. TGA-60H, Japão) utilizando o método de Almeida *et al.*, (2013), onde 1,0 g da amostra foi aquecida entre 26 e 1000 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em forno com atmosfera de nitrogênio (vazão média = 50 mL/min), para determinar o perfil de decomposição térmica da amostra, utilizando-se cadinhos de platina para análise no equipamento (BISPO, 2014).

5.2 Realização experimental

Foram realizados estudos no coalescedor com e sem as chicanas com a finalidade de comparar qual disposição do coalescedor é mais eficiente. Os parâmetros escolhidos para este estudo foram baseados no levantamento bibliográfico, presente na sessão 3.9. O leito foi estudado em três comprimentos distintos: 5, 10 e 15 cm. O estudo foi realizado no estado estacionário com o leito saturado em petróleo. As vazões de alimentação foram reguladas por uma bomba peristáltica nos valores de 40, 70, e 108 L/h, que correspondem as velocidades superficiais em relação ao diâmetro do equipamento de 5,7; 10,1 e 15,6 m/h.

As condições operacionais (vazão, comprimento do leito e disposição do equipamento com ou sem as chicanas) foram mantidas constantes por cerca de 45 minutos e foram coletadas amostras do afluente e efluente de 15 em 15 minutos para análise do TOG, de acordo com a metodologia utilizada no trabalho de Dacal (2017). Os estudos foram realizados de acordo com o planejamento apresentado no Quadro 4.

Quadro 5 - Planejamento dos experimentos.

| SEM CHICANAS – S/CHICANAS | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| Material Leito | Comprimento do Leito (cm) | Vazão (L/h) |
| Fibra de Coco | 5 | 40 |
| | | 70 |
| | | 108 |
| | 10 | 40 |
| | | 70 |
| | | 108 |
| | 15 | 40 |
| | | 70 |
| | | 108 |

(Continua)

Quadro 6 - Planejamento dos experimentos.**(Conclusão)**

| COM CHICANAS – C/CHICANAS | | |
|----------------------------------|----|-----|
| Fibra de Coco | 5 | 40 |
| | | 70 |
| | | 108 |
| | 10 | 40 |
| | | 70 |
| | | 108 |
| | 15 | 40 |
| | | 70 |
| | | 108 |

Fonte: Autor (2020).

Para a realização dos experimentos, foi produzida uma emulsão sintética de água produzida de petróleo baseado nos trabalhos de Maiti *et al.*, (2011) e Dacal (2017). Neste trabalho, a emulsão preparada foi constituída de petróleo, água, 1,2 g de emulsificante lauril sulfato de sódio 27% e cerca de 40 g de NaCl. O objetivo foi produzir uma emulsão sintética de aproximadamente 400 mg/L, onde a fase dispersa é o óleo. Foi utilizado um tanque de aproximadamente 150 L para acondicionar a emulsão. O tanque foi agitado continuamente pela recirculação da emulsão através de uma bomba centrífuga e, também, por um agitador mecânico.

5.3 Análise do teor de óleos e graxas

A análise do teor de óleos e graxas é utilizada para quantificar quão eficiente é o equipamento de leito coalescente nas condições avaliadas. Desta forma, o TOG foi analisado por espectrofotometria de absorção molecular, com auxílio do espectrofotômetro visível PHOX (SP - V3210, 325–1000 nm.) na faixa de comprimento de onda de 340 nm. Este comprimento foi encontrado através de uma varredura realizada no equipamento, onde nesse comprimento o equipamento demonstrou maior sensibilidade na leitura das amostras analisadas.

Para a análise da concentração de óleo das amostras, o óleo do efluente foi extraído utilizando o hexano como solvente extrator. Adicionou-se 12 mL de hexano a uma amostra aquosa de 20 mL de

água produzida que contém o óleo disperso. A amostra foi agitada e deixada em repouso em um funil de decantação a fim de promover a separação das fases aquosa e orgânica. A fase mais densa é composta basicamente por água e a fase menos densa, de solvente e óleo. A água foi drenada e a fase orgânica (óleo + solvente) foi recolhida em tubos de ensaios para posterior análise.

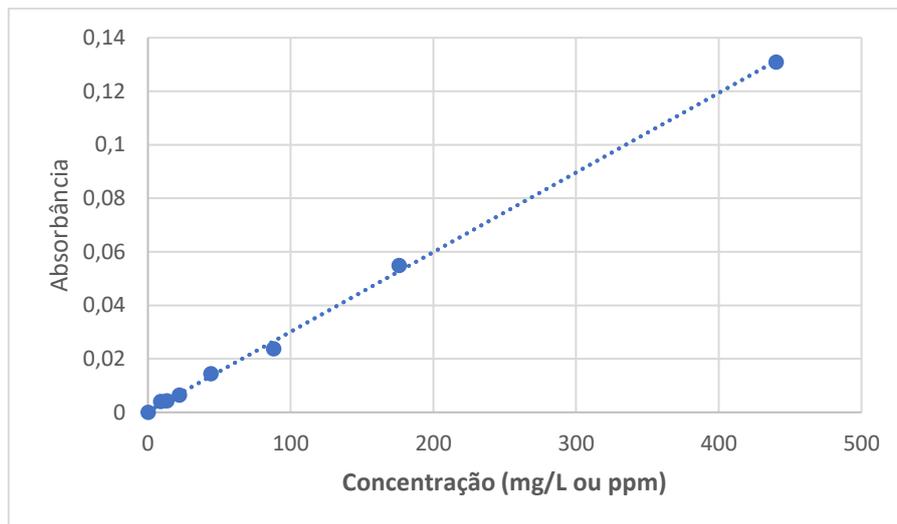
Para utilização desse método foi construído uma curva de calibração para extração de óleo com hexano.

5.3.1 Construção da curva padrão para determinação do teor de óleos e graxas

Inicialmente foi preparada uma solução padrão de petróleo em hexano com concentração próxima de 450 mg/L . A partir dessa concentração padrão foram feitas diluições próximas de 5, 10, 20, 25, 50, 100 e 200 mg/L . A leitura do *baseline* (branco) foi realizada com hexano puro. A leitura das concentrações obtidas estão apresentadas no apêndice C.

Com os valores das concentrações foi construída a curva de calibração, representada pela Figura 17.

Figura 17 - Curva de calibração para o solvente hexano + petróleo em $\lambda = 340 \text{ nm}$.



Fonte: Autor (2020).

A Figura 17 apresenta os pontos plotados, bem como, a curva de tendência e a equação da reta, $y = 0,0003x + 0,0004$. Além disso, o coeficiente de correlação de dados, $R^2 = 0,9989$,

encontrado por regressão linear, foi alto e próximo de 1, o que indica um ótimo ajuste da curva em relação aos dados. Portanto, a equação $y = 0,0003x + 0,0004$, onde y é a absorvância e x é a concentração de óleos e graxas – TOG, pode ser utilizada para calcular o TOG em função do valor da absorvância indicada no espectrofotômetro. Logo, o TOG pode ser calculado de acordo com a Equação 1.

$$TOG = \frac{\text{Absorvância} - 0,0004}{0,0003} \quad (1)$$

Os resultados foram analisados em relação a eficiência de separação através da Equação 2, onde ($C_{afluente}$) é a concentração do efluente na alimentação do coalescedor e ($C_{efluente}$) é a concentração do efluente na saída do coalescedor.

$$\text{Eficiência} = \frac{C_{afluente} - C_{efluente}}{C_{afluente}} \cdot 100\% \quad (2)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização dos experimentos, para o estudo das condições de processo, foram validados os dados através de testes de partida e pré-operação a fim de descartar erros devido a vazamentos, e caminhos preferenciais. Logo após não constar vazamentos, os experimentos foram realizados.

Os resultados dos valores de concentração dos experimentos estão expostos nas tabelas do apêndice A e B.

6.1 Caracterização dos fluidos

A caracterização dos fluidos é um aspecto importante para compreensão do seu comportamento durante os processos de escoamento. A Tabela 6 apresenta algumas características físicas dos fluidos utilizados no preparo da emulsão sintética utilizada neste trabalho.

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

| Fluido | Características | Método | Resultado |
|---------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| Petróleo | Massa específica à 25°C | Picnometria | 0,883 g/ cm ³ |
| Água | Massa específica à 25°C | Picnometria | 0,998 g/ cm ³ |
| Emulsão | TOG | Espectrofotometria | 350-900 mg/L |

Fonte: Autor (2020).

As propriedades das fases dispersa e contínua influenciam na eficiência do processo. Um dos parâmetros mais importante é a densidade, que pode ser obtida através da massa específica. Forças gravitacionais e hidrodinâmicas atuam no processo de separação, fazendo com que as gotas se dispersem na zona de sedimentação do equipamento, provocando assim, a separação das gotículas de óleo da água por meio da diferença de densidade existente. A massa específica do óleo utilizado neste trabalho é próxima da que Li e Gu (2005) utilizou em seu trabalho. Os autores utilizaram uma emulsão de óleo mineral de massa específica 0,850 g/cm³ na separação de hidrocarbonetos.

6.2 Caracterização das fibras

Os mecanismos de coalescência estão intimamente ligados ao tamanho das partículas. Portanto, as características espaciais das amostras são importantes durante esse fenômeno. A Tabela 7 apresenta algumas características das fibras.

Tabela 7 - Características das fibras de coco.

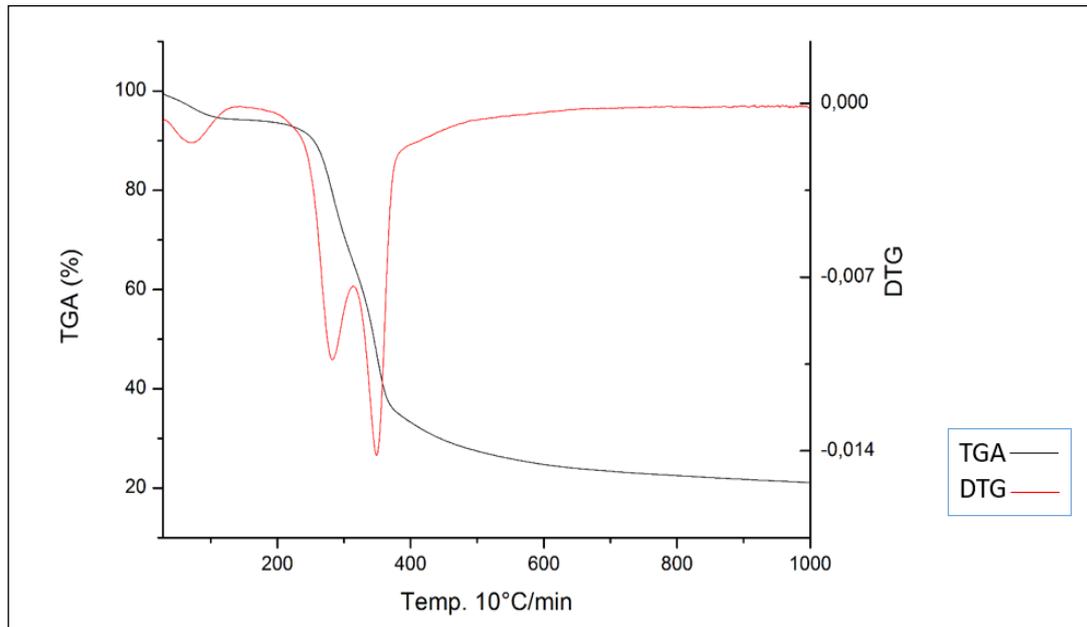
| Características | Fibra de Coco | Método |
|---|----------------------|-------------------------|
| Diâmetro (μm) | 180 – 340 | Micrômetro |
| Massa específica (g/cm^3) | 0,835 | Princípio de Arquimedes |
| Ponto de Fusão ($^{\circ}\text{C}$) | 240 – 550 | Termogravimetria |

Fonte: Autor (2020)

As amostras das fibras de coco seco foram caracterizadas quanto a densidade, diâmetro e propriedades térmicas. Em relação ao diâmetro, esse parâmetro possui influência nos mecanismos de interceptação entre as gotículas e o leite. Para diâmetros de fibras menores, esses mecanismos são significativamente mais eficientes (HAZLETT, 1969). Alguns autores como como Sokolovic *et al.*, (2007) utilizaram fibras de poliuretano liso com massa específica $1,2 \text{ g}/\text{cm}^3$. Li e Gu (2005) utilizou fibras de polipropileno de diâmetro 250-500 μm . As características apresentadas na Tabela 7 estão entre os valores apresentados por esses autores. Ambos os trabalhos apresentaram resultados satisfatório na eficiência de remoção de hidrocarbonetos.

As análises termogravimétricas (TGA) e termogravimétrica derivada (DTG) foram realizadas para quantificar a perda de massa referente à remoção dos compostos orgânicos. As amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ desde a temperatura ambiente até $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Curvas de TG e DTG da fibra de coco seco.



Fonte: Autor (2020).

Através da Figura 18, foi observado o comportamento da massa da amostra em função da taxa de temperatura. A curva acima exibe uma etapa de perda de massa em torno de 25 – 130 °C relativa à quantidade de água absorvida pela amostra. A degradação térmica dos componentes da fibra do coco ocorre em uma faixa de temperatura 240 a 550 °C.

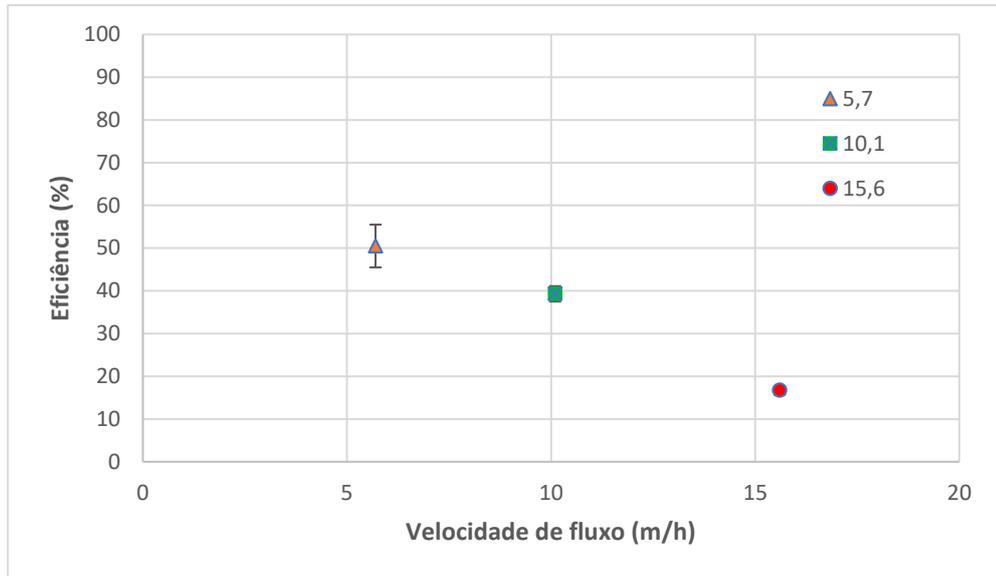
Observa-se pelo gráfico da DTG que em torno de 280 °C, a curva apresenta uma variação devido à degradação da hemicelulose, e também apresenta um pico bem definido em torno de 350 °C, devido principalmente à degradação térmica da celulose (CORRADINI *et al.*, 2009).

6.3 Influência da velocidade do fluido na eficiência do coalescedor

A velocidade do fluido (v) desempenha um papel fundamental no fluxo de uma emulsão, pois controla os mecanismos de captura de gotículas, distribuição da fase dispersa e separação do óleo retido (Sokolovic *et al.*, 1997).

A Figura 19 apresenta o comportamento da eficiência de remoção de óleo para o leito de comprimento 5 cm nas velocidades 5,7; 10,1 e 15,6 m/h.

Figura 19 - Influência da velocidade do fluido (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 5 cm.



Fonte: Autor (2020).

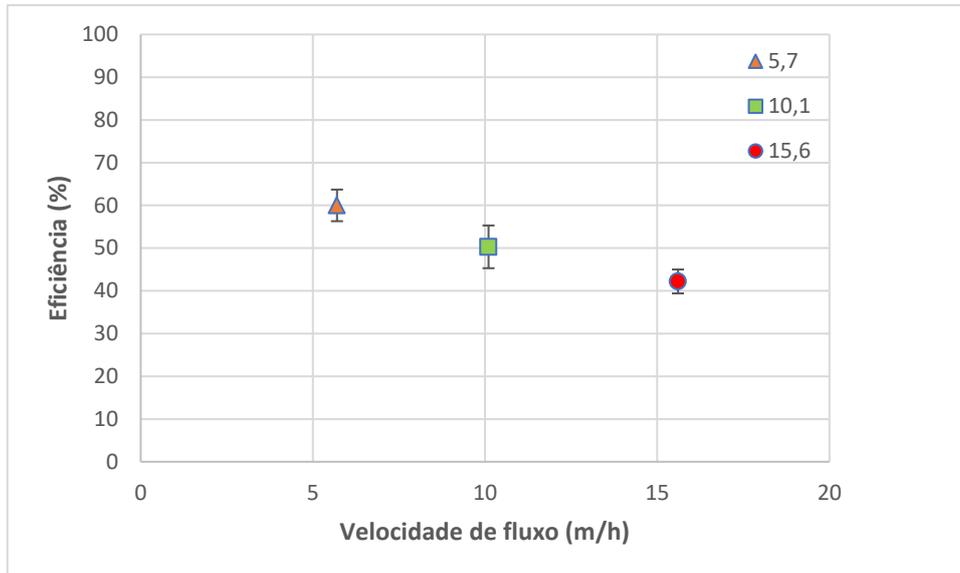
Através da Figura 19, observa-se que a eficiência na remoção de óleo tende a diminuir com o aumento da velocidade do fluxo. Para o comprimento de leito 5 cm, as eficiências obtidas foram 50,3%, 39,3% e 17% para as velocidades de 5,7; 10,1 e 15,6 m/h, respectivamente.

A velocidade impacta diretamente nos mecanismos de captura das gotículas em uma emulsão. Kolmetz (2012) afirmou que os coalescedores apresentam um melhor desempenho em fluxo laminar. De acordo com o autor, velocidades mais lentas resultam em maior tempo de permanência no meio coalescente, ocasionando maiores probabilidade das gotículas serem capturadas pelo leito e assim, ocorrer a coalescência. A maior eficiência foi observada na menor velocidade do fluxo (5,7 m/h), enquanto que a menor eficiência foi obtida para o maior valor da velocidade (15,6 m/h).

Para valores maiores de velocidade, há um aumento na quantidade de gotículas que passam pelo leito, porém o leito não consegue reter essas gotículas. Logo, o tempo de residência do fluido no meio coalescente é insuficiente para que ocorra a coalescência no interior do leito. Portanto, a eficiência diminui com o aumento da velocidade (MOTTA, 2014).

A Figura 20 apresenta o comportamento da eficiência do processo para o leito de 10 cm nas velocidades 5,7; 10,1 e 15,6 m/h.

Figura 20 - Influência da velocidade do fluido (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 10 cm.



Fonte: Autor (2020).

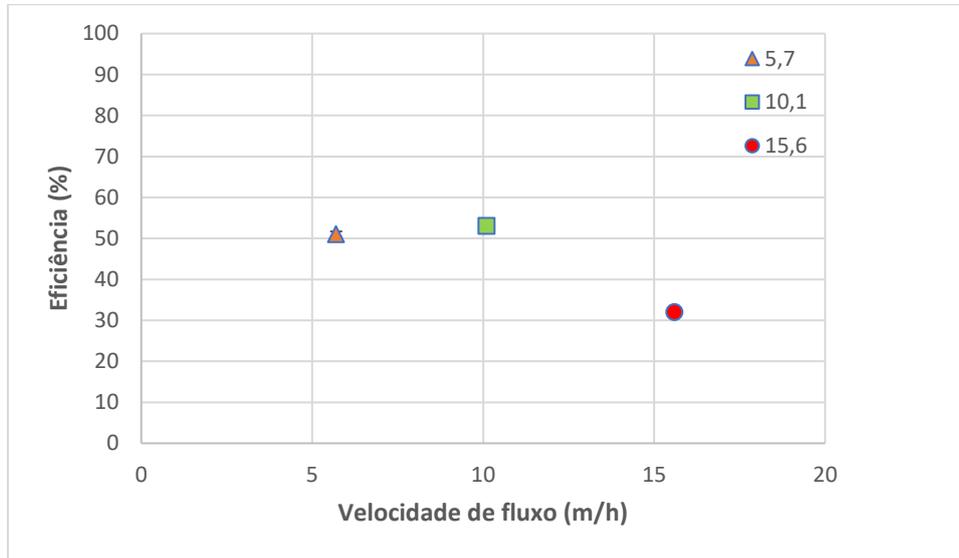
Pode-se observar na Figura 20 que a eficiência, assim como no leito de 5 cm, decresce à medida que a velocidade do fluido aumenta. Para o comprimento de leito 10 cm, as eficiências obtidas foram 60%, 50,3% e 42,2% para as velocidades de 5,7; 10,1 e 15,6 m/h, respectivamente. Observa-se que o maior valor de eficiência foi obtido para o menor valor de velocidade (5,7 m/h), enquanto que a menor eficiência foi obtida para o maior valor de v (15,6 m/h).

Com o aumento da velocidade, pode-se observar que a diferença entre as eficiências foi menor para o leito de 10 cm em relação ao de 5 cm. Para a maior velocidade estudada (15,6 m/h), o leito de comprimento 5 cm, apresentou eficiência de 17%. Para o leito de comprimento 10 cm, na mesma velocidade, a eficiência foi de 42,2%, apresentando um aumento de aproximadamente 25% em relação ao leito menor. Portanto, em velocidades mais altas, o leito de 10 cm obteve uma maior eficiência.

Além disso, pode-se observar que a diferença dos valores de eficiência nas velocidades 5,7 e 15,6 m/h, para o leito de 10 cm, foi aproximadamente 18%. Comparando-se com o leito de 5 cm que apresentou uma diferença de 33%, para as mesmas velocidades de fluxo, o leito de 10 cm apresentou menor sensibilidade quando houve aumento da velocidade.

A Figura 21 apresenta o comportamento da eficiência do processo para o leito de 15 cm, nas velocidades 5,7; 10,1 e 15,6 m/h.

Figura 21 - Influência da velocidade do fluido (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 15 cm.



Fonte: Autor (2020).

Para o leito de maior comprimento estudado neste trabalho, 15 cm, pode-se observar que a eficiência de remoção se comportou um pouco diferente em relação aos leitos menores. A maior eficiência foi observada na velocidade intermediária (10,1 m/h), diferentemente dos outros leitos que obtiveram eficiências maiores na menor velocidade estudada (5,7 m/h).

As eficiências obtidas foram 51%, 53% e 32%. Segundo Sokolovic *et al.*, (1997), a velocidade controla os mecanismos de captura das gotas. Em geral, maiores velocidades resultam em uma menor probabilidade das gotas serem capturadas pelo leito. Porém, para o leito em questão, a velocidade foi pouco significativa em relação a eficiência de remoção. Além disso, o aumento da velocidade de 5,7 m/h para 10,1 m/h provocou um aumento na eficiência.

De acordo com Sokolović *et al.*, (2007), a velocidade crítica, definida como a velocidade máxima para se alcançar determinada concentração, está relacionada com o aumento do comprimento do leito. Isso significa que a velocidade do fluido está relacionada com o comprimento do leito. Portanto, para velocidades maiores, o comprimento ótimo, aquele que se obtém uma maior eficiência, aumenta.

A maior eficiência foi obtida para a velocidade intermediária (10,1 m/h). Alguns autores como Dacal (2017), Li e Gu (2005) obtiveram maiores eficiências em velocidades intermediárias, confirmando assim, os resultados obtidos para o leito de 15 cm.

6.4 Influência do comprimento do leito

O comprimento do leito é um dos parâmetros mais importantes no estudo dos coalescedores. A eficiência de remoção está diretamente ligada ao tamanho do leito, pois a área superficial e o volume do leito estão intrinsecamente relacionados a esse tamanho. Neste trabalho, avaliou-se três comprimentos de leito: 5, 10 e 15 cm. O objetivo principal desta análise foi descobrir o comprimento ótimo, ou seja, aquele que fornece a maior eficiência de remoção de óleo no coalescedor.

De acordo com as Figuras 19, 20 e 21, verifica-se uma tendência no aumento da eficiência quando ocorre o aumento do comprimento do leito, em cada velocidade de fluxo estudada. Para o leito de menor comprimento, 5 cm, observou-se eficiências entre 17% - 50,3%. Para o leito de comprimento intermediário, 10 cm, observam-se as maiores eficiências, na faixa de 42,2% - 60%. O leito de maior comprimento utilizado neste trabalho, 15 cm, apresentou menores eficiências de remoção em relação ao leito de 10 cm e maiores em relação ao leito de 5 cm. A faixa de remoção de óleo ficou em torno de 32 – 53% para o maior leito utilizado neste estudo.

De acordo com a literatura, era de se esperar que um maior comprimento de leito fornecesse uma maior eficiência de remoção, pois quanto maior o comprimento do leito, maiores são a área e superfície de contato, aumentando assim a probabilidade de colisão entre as gotículas, e consequentemente, maior se torna a eficiência de remoção do óleo.

Alguns pesquisadores como Sarren *et al.*, (1966), Li *et al.*, (2005), Sokolović *et al.*, (2007), afirmam existir um comprimento mínimo do leito, também chamado de comprimento crítico ou ótimo, no qual acima desse comprimento não há aumento significativo na eficiência da coalescência. Logo, há um limite para o comprimento do leito onde não há variação significativa na eficiência de remoção no processo de coalescência.

Os resultados obtidos mostraram que para a menor e a maior velocidade estudada 5,7 e 15,6 m/h, o melhor comprimento de leito foi o de 10 cm. Para a velocidade 10,1 m/h, o leito 15 cm apresentou o melhor resultado entre os leitos estudados. Como dito anteriormente, o aumento do

comprimento do leito provoca um aumento na coalescência. No entanto, há uma limitação para esse aumento.

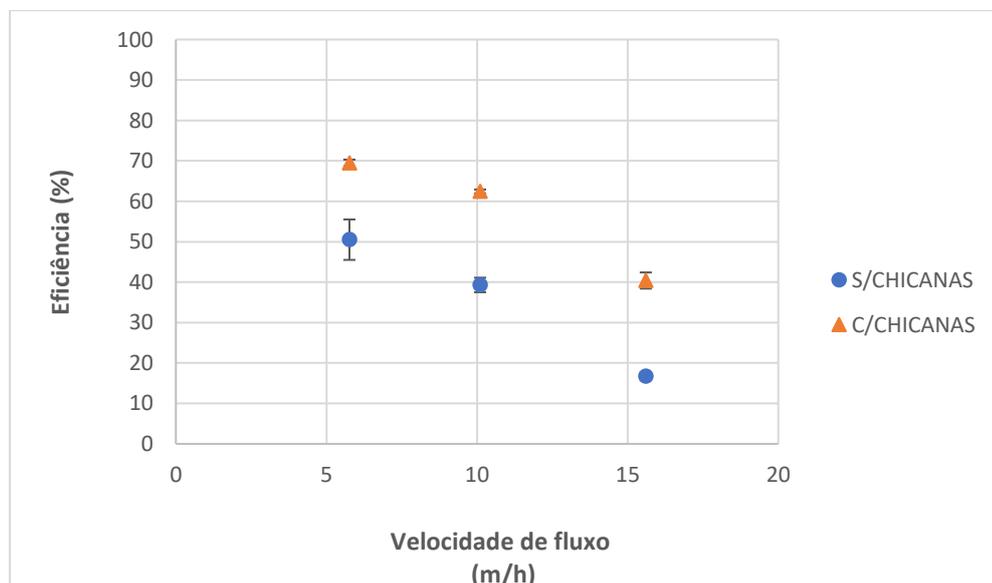
É fato que um maior tempo de residência no leito provoca um aumento no grau de coalescência, e também uma elevada queda de pressão. Devido a essa alta queda de pressão, as gotas coalescidas são redispersas, diminuindo assim, o grau de coalescência (SARREN *et al.*, 1966).

Autores como Ji *et al.*, (2009) e Dacal (2017) encontraram o comprimento ótimo em 7 e 10 cm, respectivamente em seus trabalhos. Para as condições estudadas neste trabalho, o comprimento ótimo, aquele que resulta numa maior eficiência foi obtido em 10 cm.

6.5 Efeito das chicanas no coalescedor

A utilização das chicanas, após o leito coalescedor, tem como principal objetivo o aumento do tempo de residência do efluente no equipamento. Devido ao aumento desse tempo, forças hidrodinâmicas e gravitacionais tiveram um papel crucial para o aumento da eficiência de separação do óleo. A própria disposição das chicanas, Figura 11 contribuiu para forças gravitacionais agirem, melhorando assim, o grau de separação do óleo da água. Os resultados obtidos com a utilização das chicanas foram comparadas sem as mesmas. A Figura 22 apresenta a comparação da eficiência para o leito de 5 cm, em todas as velocidades estudadas.

Figura 22 - Influência das chicanas (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 5 cm.



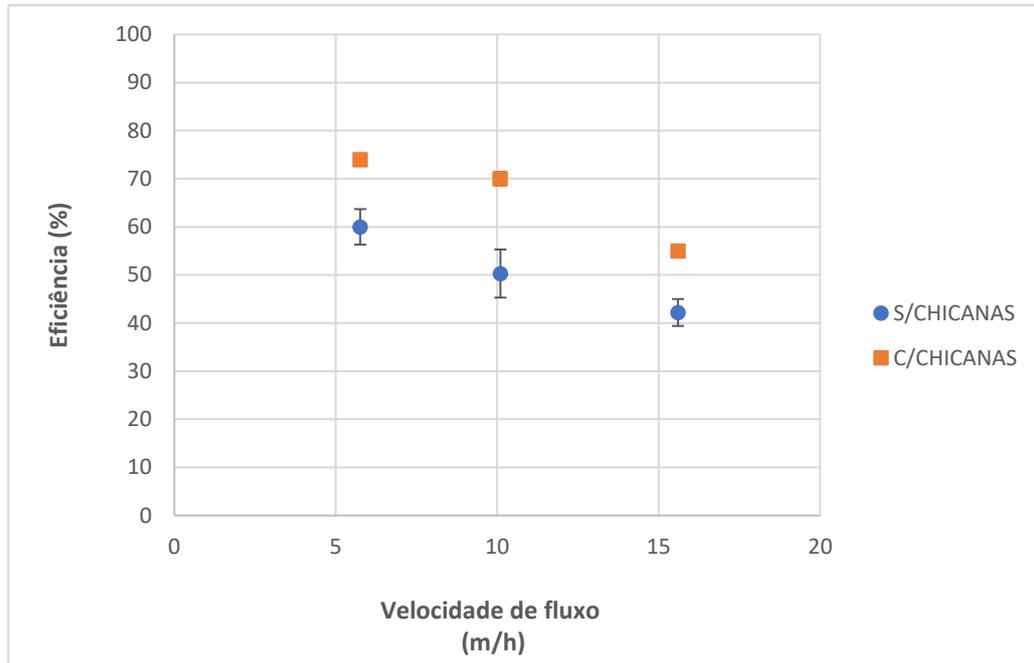
Fonte: Autor (2020).

Comparando os efeitos das chicanas, observa-se através da Figura 22 que o efeito foi bem significativo. Em todas as velocidades estudadas, a eficiência do processo aumentou com o acoplamento das chicanas no equipamento. As eficiências obtidas foram de 69,5%, 62,4% e 40,4% para as velocidades 5,7; 10,1 e 15,6 m/h. As diferenças entre as eficiências foram de 19% para velocidade mais baixa, 23,1% para a velocidade intermediária e 23,7% para a velocidade mais alta. Ambas as curvas apresentaram o mesmo comportamento, quanto maior a velocidade, menor foi a eficiência observada. Além disso, as diferenças observadas foram próximas umas das outras.

É importante observar que as chicanas estão dispostas após a saída do leito, conforme a Figura 10, na zona de sedimentação do equipamento, logo não há interferência na coalescência provocada pelo leito. Devido as forças hidrodinâmicas e gravitacionais, que agem durante a passagem do efluente pelas chicanas, elas aceleram o processo de separação provocando aumento do tempo de residência do efluente no equipamento. Observou-se também um pequeno acúmulo de óleo nas bases das chicanas, o que contribuiu para a diminuição na concentração do óleo no efluente final.

O estudo das chicanas foi realizado com todos os comprimentos de leito, com a finalidade de encontrar uma disposição ótima para o coalescedor deste estudo. A Figura 23 apresenta a comparação das eficiências para o comprimento de leito 10 cm.

Figura 23 - Influência das chicanas (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 10 cm.



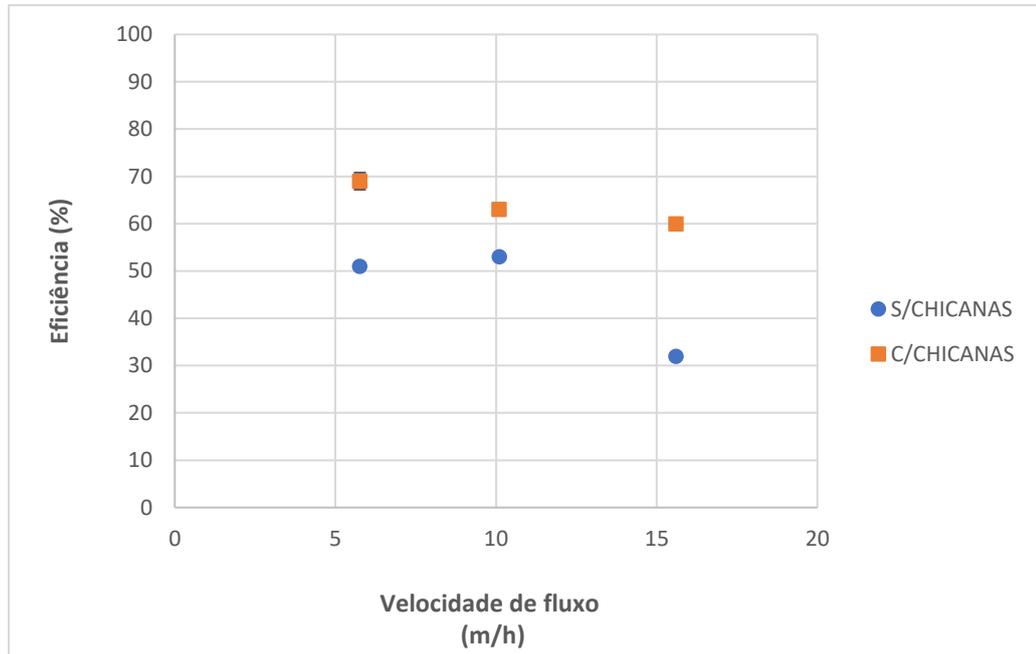
Fonte: Autor (2020).

De acordo com a Figura 23, pode-se observar um comportamento semelhante ao leito de 5 cm. Com a presença das chicanas, as eficiências aumentaram em todas as velocidades. Os resultados obtidos com as chicanas mostraram eficiências de 74%, 70% e 55% em relação a 60%, 50% e 42%, sem as chicanas. Observam-se diferenças de 14%, 20% e 13%. Além disso, a melhor eficiência obtida foi de 74%, na menor velocidade estudada.

De acordo com Jaya e Kolmetz (2012), o desempenho da coalescência é maior em regime laminar, uma vez que quanto menor a velocidade do fluido, maior é o tempo de residência do efluente no equipamento. A presença das chicanas aumenta o tempo de residência do fluido, otimizando assim, a separação do óleo da água.

A Figura 24 apresenta a comparação das eficiências para o comprimento de leito 15 cm.

Figura 24 - Influência das chicanas (5,7; 10,1; 15,6 m/h) na eficiência do processo para o leito de comprimento 15 cm.



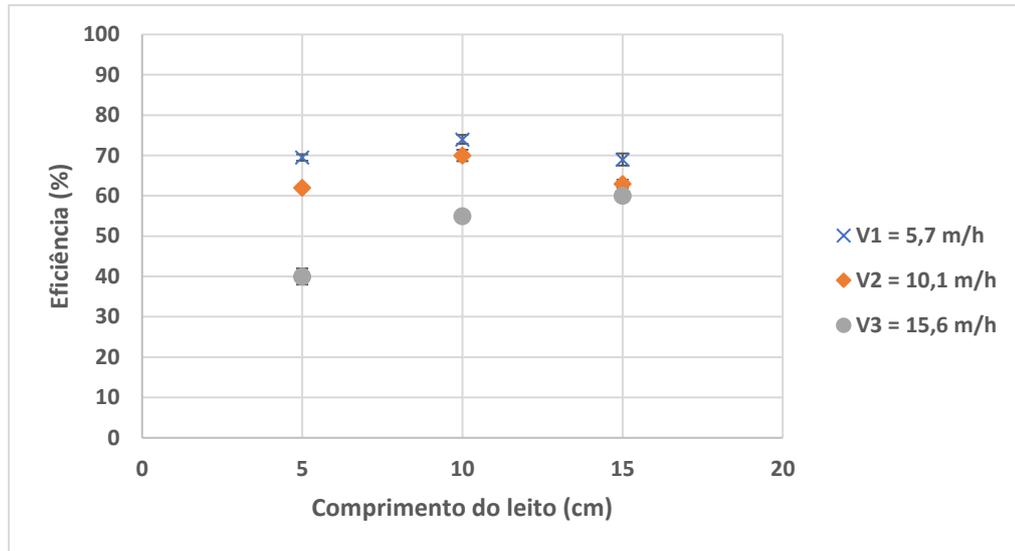
Fonte: Autor (2020).

Conforme pode-se observar na Figura 24, o comportamento da eficiência foi semelhante aos outros leitos. As chicanas provocaram um aumento na eficiência, principalmente na maior velocidade estudada, 15,6 m/h. Os resultados obtidos com as chicanas para o leito de 15 cm foram 69%, 63% e 60% para as velocidades de 5,7; 10,1 e 15,6 m/h, respectivamente. Analisando-se a comparação entre as disposições (S/Chicanas e C/Chicanas), observam-se diferenças de 18%, 10% e 28%. A melhor eficiência observada foi obtida na velocidade mais baixa, 5,7 m/h.

Comparando todas as disposições estudadas, observa-se que a maior eficiência foi obtida para o leito de comprimento 10 cm, na velocidade mais baixa, 5,7 m/h. Logo em seguida, os leitos de 5 e 15 cm, na velocidade mais baixa, apresentaram um resultado muito próximo, ficando em torno de 69%.

A Figura 25 apresenta a comparação do efeito das chicanas em relação ao comprimento do leito.

Figura 25 - Influência do comprimento de leito (5, 10 e 15 cm) na eficiência do processo na presença das chicanas.



Fonte: Autor (2020).

De acordo com a Figura 25, para cada comprimento de leito, as maiores eficiências foram obtidas nas velocidades mais baixas e as menores, nas velocidades mais altas.

Um aspecto interessante a se observar é que à medida que o comprimento do leito aumenta, as diferenças entre as eficiências diminuem com o aumento da velocidade. Observando-se no leito de comprimento 5 cm, a diferença foi bastante significativa. No leito de maior comprimento, a diferença foi menos significativa. Esse resultado mostra um limite operacional para o aumento da eficiência pela presença das chicanas em relação ao comprimento do leito.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O sistema de tratamento utilizado neste trabalho apresentou resultados satisfatórios em relação à remoção de óleo. O sistema foi constituído por um equipamento coalescedor que foi construído especialmente para a realização dos experimentos. O equipamento foi dividido em três partes: a primeira (zona de alimentação do efluente), a segunda (leito coalescente) e a terceira (zona de sedimentação). Nesta última, foram acopladas chicanas para analisar a eficiência das mesmas no processo de tratamento.

Os resultados apresentaram eficiências de 17 a 74% em relação a separação de óleo da água. Para a disposição sem as chicanas, a menor eficiência observada foi de 17% para o leito de 5 cm na maior velocidade estudada (15,6 m/h). A maior eficiência observada foi de 60% para o leito de 10 cm, na velocidade mais baixa (5,7 m/h).

Na disposição com as chicanas, foram acopladas 5 chicanas após a saída do leito, na zona de sedimentação do equipamento. Nesta disposição, todos os ensaios apresentaram resultados de eficiências maiores do que a disposição. A maior eficiência observada foi de 74% para o leito de 10 cm, na velocidade mais baixa (5,7 m/h). A menor eficiência foi de 40,40% para o leito de 5 cm, porém na maior velocidade estudada (15,6 m/h).

O comprimento do leito representa um parâmetro essencial no estudo dos leitos coalescentes. Neste trabalho, verificou-se um comprimento ótimo de 10 cm. Além disso, a melhor disposição observada foi para o mesmo leito com o acoplamento de chicanas. O estudo realizado constatou uma melhor eficiência nos ensaios realizados com o acoplamento de chicanas no equipamento, para todas as velocidades e comprimentos estudados.

Em relação a qualidade do efluente, não foram observadas concentrações abaixo dos padrões fixados pela legislação brasileira para descarte tanto em terra (≤ 20 mg/L), quanto no mar (29 mg/L). Porém, as reduções nas concentrações variaram na faixa de 16 a 74%, podendo ser indicado no pré-tratamento da água produzida.

Portanto, diante do que foi estudado, a utilização dos leitos coalescentes com o acoplamento de chicanas apresentou resultados satisfatórios em relação a remoção de óleo da água produzida. Além do mais, os leitos coalescentes podem ser combinados com outros processos com o objetivo de reduzir ainda mais as concentrações, demonstrando-se assim uma ótima alternativa no processo de tratamento de água produzida de petróleo.

Com base nos resultados obtidos e apresentados neste estudo, pode sugerir para trabalhos futuros:

- Testar materiais sintéticos para o leite, como poliuretano, polipropileno etc.;
- Avaliar a eficiência do processo com uma combinação de fibras sintéticas e vegetais;
- Realizar ensaios partindo do leite não saturado;
- Avaliar o acoplamento das chicanas na orientação de fluxo vertical;
- Avaliar o processo de coalescência integrado a outro processo, como: flotação, adsorção, processos oxidativos avançados, filtração etc.

REFERÊNCIAS

- ACS INDUSTRIES. **Liquid-liquid coalescer design manual**. Houston, Texas, 2006. p. 20.
- Al-Ghouti, M. A. *et al.* *Produced water characteristics, treatment and reuse: A review*. **Journal of Water Process Engineering**, 28, 222–239, 2019.
- ALMEIDA, F.B.P.S., Esquerre, K.P.S.O.R., Soletti, J.I. *et al.* Coalescence process to treat produced water: an updated overview and environmental outlook. ***Environmental Science and Pollution Research***, v. 26, p. 28668–28688, 2019
- ALMEIDA, T. M.; Bispo, M. D.; Cardoso, A. R. T.; Migliorini, M. V.; Schena, T.; Campos, M. C. V.; Machado, M. E.; Lopez, J. A.; Krause, C.; Caramão, E. B. (2013) Preliminary Studies of Bio-Oil from Fast Pyrolysis of Coconut Fibers. *J. Agric. Food Chem.*, 61, 6812–6821.
- ARTHUR, J. D.; LANGHUS, B. D.; PATEL, C. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. **Tech. Rep. National Energy Technology Laboratory**, [S.l.], v. 307, no. 1-2, p. 299-308, 2005.
- BISPO, M. D. (2014) Produção de Bio-Óleo de Coco Verde, Palha de Cana-de-açúcar, Borra de Café Via Pirólise. Dissertação de Mestrado, Pós Graduação em Biotecnologia Industrial, UNIT, Aracaju, SE, 96 pp.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 396 de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 7 abr. 2008. Seção 1, p. 64-68.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de mar. 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. p. 58-63.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 393 de 8 de agosto 2007. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 9 ago. 2007.
- CARVALHO, P.C.A.P. **Tratamento combinado da água produzida de petróleo**: Filtração, adsorção e foto-Fenton. 2016. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2016.
- COELHO, A., Castro, A. V., Dezotti, M., & Sant'Anna, G. L. Treatment of petroleum refinery sourwater by advanced oxidation processes. **Journal of Hazardous Materials**, 137(1), 178–184, 2006.
- CORRADINI, Elisângela *et al.* Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 837-846, set. 2009.

CUNHA, G, M, A. *et al.* O. Uso do processo foto-fenton no tratamento de águas produzidas em campos de petróleo: *um estudo de caso*, In: **Congresso brasileiro de p&d em petróleo e gás**. 4, 2007, Campinas. Trabalhos Técnicos, São Paulo, 2007.

CURBELO, F.D.S. **Estudo da Remoção de Óleo em Águas Produzidas na Indústria de Petróleo, por Adsorção em Coluna Utilizando a Vermiculita Expandida e Hidrofobizada**. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

DACAL, R. G. V. **Remoção de óleo da água produzida de petróleo utilizando leitos coalescedores de fibra de coco e de fibra sintética**. 2019. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

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**. 2007. 261 f. Tese (Doutorado em Físico-Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

GHIMIRE, N.; Wang, S. Biological treatment of petrochemical wastewater. **In Petroleum Chemicals—Recent Insight**; Zoveidavianpoor, M., Ed.; IntechOpen: London, UK, 2018.

GOVEDARICA, D. D. *et al.* A novel approach for the estimation of the efficiency of steady-state fiber bed coalescence. **Separation and Purification Technology**, [S.l.], v. 104, p. 268275, 2013.

HAZLETT, R. N. Fibrous bed coalescence of water: steps in the coalescence process. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, [S.l.], v. 8, no. 4, p. 625-632, 1969.

JAYA, A.; KOLMETZ, K. Coalescer (engineering design guideline). **Practical engineering guidelines for processing plant solutions**. KLM technology group, 2012. v. 1.

JI, F.; LI, C.; DONG, X.; LI, Y.; WANG, D. Separation of oil from oily wastewater by sorption and coalescence technique using ethanol grafted polyacrylonitrile. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, n. 2-3, p. 1346-1351, 2009.

KAMP, J.; VILLWOCK, J.; KRAUME, M. Drop coalescence in technical liquid/liquid applications: a review on experimental techniques and modeling approaches. **Reviews in Chemical Engineering**, 2017. v. 33, p. 3-8.

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.

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.

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.

NEFF, J.; LEE, K.; DEBLOIS, E.M. 2011-a. *Produced water: Overview of composition, fates and effects*. **Cap. 1 In: Produced water, environmental risks and advances in mitigation technologies**. Lee, K. & Neff, J. (ends.). Springer Science.

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

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.; 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.

SHERONY, D. F.; KINTNER, R. C. Coalescence of an emulsion in a fibrous bed: part 1: theory. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, [S.l.], v. 49, p. 314-320, 1971.

SOKOLOVIĆ, S, R. M.; SOKOLOVIĆ, D. S.; GOVEDARICA, D. D. Liquid-liquid separation using steady-state bed coalescer. **Hemijaska Industrija**, v. 70, n. 4, p. 367-381, 2016.

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

STEWART, M.; ARNOLD, K. Produced water treating systems: part 1. In: _____. **Produced water treatment field manual**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1-134.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2 ed. Rio de Janeiro: intercência: PETROBRAS, 2004.

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.

VIEIRA, V.M. **Modelo de avaliação do gerenciamento da água produzida em operações de produção de petróleo e gás natural em bacias terrestres brasileiras**. 2016. 155 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

ZHAO, H.; LI, G. Application of fibrous coalescer in the treatment of oily wastewater. **Procedia Environmental Sciences**, [S.l.], v. 10, p. 158-162, 2011.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS A

| FIBRA DE COCO SECO – S/CHICANAS | | | | | | |
|--|--------------------|--|---|---|------------------------------|--------------------------------------|
| Comprimento do leito | Vazão (L/h) | Velocidade superficial de fluxo (m/h) | <i>TOG médio</i>_{entrada} | <i>TOG médio</i>_{saída} | Média das eficiências | Desvio padrão das eficiências |
| 5 cm | 40 | 5,7 | 488,83 | 243,00 | 50,30 | 5 |
| | 70 | 10,1 | 490,13 | 297,94 | 39,30 | 1,8 |
| | 108 | 15,6 | 423,55 | 355,25 | 16,70 | 1,0 |
| 10 cm | 40 | 5,7 | 364,23 | 145,69 | 60,00 | 3,7 |
| | 70 | 10,1 | 670,61 | 333,50 | 50,30 | 5,0 |
| | 108 | 15,6 | 725,33 | 419,78 | 42,20 | 2,8 |
| 15 cm | 40 | 5,7 | 945,33 | 463,21 | 51,00 | 0,7 |
| | 70 | 10,1 | 537,56 | 255,31 | 53,00 | 0,6 |
| | 108 | 15,6 | 406,16 | 276,19 | 32,00 | 0,7 |

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS B

| FIBRA DE COCO SECO - C/CHICANAS | | | | | | |
|--|--------------------|--|---|---|------------------------------|--------------------------------------|
| Comprimento do leito | Vazão (L/h) | Velocidade superficial de fluxo (m/h) | <i>TOG médio</i>_{entrada} | <i>TOG médio</i>_{saída} | Média das eficiências | Desvio padrão das eficiências |
| 5 cm | 40 | 5,7 | 785,33 | 239,67 | 69,50 | 0,8 |
| | 70 | 10,1 | 590,5 | 221,93 | 62,42 | 0,5 |
| | 108 | 15,6 | 592,08 | 353,17 | 40,40 | 2,0 |
| 10 cm | 40 | 5,7 | 823,11 | 214,55 | 74,00 | 1,1 |
| | 70 | 10,1 | 724,22 | 217,33 | 70,00 | 1,4 |
| | 108 | 15,6 | 988,44 | 444,79 | 55,00 | 1,1 |
| 15 cm | 40 | 5,7 | 619,50 | 194,50 | 69,00 | 1,8 |
| | 70 | 10,1 | 362,84 | 135,34 | 63,00 | 1,0 |
| | 108 | 15,6 | 576,17 | 232,55 | 60,00 | 0,7 |

**APÊNDICE C - LEITURA DAS ABSORBÂNCIAS DAS SOLUÇÕES PADRÕES
PREPARADAS COM HEXANO E PETRÓLEO.**

| Concentração (mg/L) | Absorbância |
|--------------------------------|--------------------|
| 0 | 0 |
| 8,8 | 0,004 |
| 13,2 | 0,0043 |
| 22 | 0,0064 |
| 44 | 0,0144 |
| 88 | 0,0237 |
| 176 | 0,0549 |
| 440 | 0,1309 |