

## PROTÓTIPO DE BANCADA DE DECANTADOR CONTÍNUO COM CAMADA LÍQUIDA COALESCENTE

A.C. Barbosa<sup>1</sup>, E. F. Ramos<sup>1</sup>, L. P. Pedrosa Júnior<sup>2,3</sup>, L. B. Santos<sup>3,4</sup>, S. C. Paiva<sup>1</sup>, V. A. Santos<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Escola UNICAP-ICAM TECH Recife-PE, Brasil (valdemir.santos@unicap.br)

<sup>2</sup>Rede Nordeste de Biotecnologia/Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Recife-PE, Brasil

<sup>3</sup>Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação - IATI, Recife-PE, Brasil

Os decantadores contínuos líquido-líquido, horizontais, não comportam o uso de placas coalescentes para melhorar a eficiência de um processo de separação. Este trabalho teve como objetivo testar a estratégia de utilizar a própria fase oleosa de um escoamento água-óleo como uma camada coalescente, no interior de um protótipo de decantador contínuo em escala de bancada, operando com diferentes números de Reynolds de turbulência. Para números de Reynolds de turbulência de até 5000 a camada coalescente fluida reteve 92,5% do óleo em suspensão na água. Acima de um Reynolds de 5000 os resultados mostraram possíveis problemas de operação à medida em que este parâmetro aumentava. A boa performance do protótipo de bancada com camada coalescente abaixo de 5000 incentiva a implantação de futuras estratégias de controle para manutenção de estabilidade da camada coalescente de óleo, contribuindo para a adoção de mais um tipo de equipamento em sistemas comerciais de separação água-óleo.

*Palavras-chave:* Decantador contínuo; Separação água-óleo; Camada coalescente; Reynolds de turbulência; Parâmetro de dispersão

### INTRODUÇÃO

No Brasil, o grande marco da inserção das questões ambientais ocorreu em 1981 com a entrada em vigor da Lei 6.938, que instituiu a política nacional de meio ambiente. Segundo a SECRON (2006), no escopo dessa lei, foi criado o SISNAMA (Sistema Nacional de Meio Ambiente), que estabeleceu a hierarquia e a função dos órgãos ambientais no País. Dentre esses órgãos, destacam-se, por exemplo, o CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) e o IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente). Visando a redução dos danos ao meio ambiente foram criadas normas e parâmetros nos quais os efluentes precisam ser enquadrados para serem descartados ou até mesmo reaproveitados de forma correta. No caso do óleo, de acordo com o 1º artigo da Resolução 362/2005, do CONAMA (2005), todo óleo lubrificante usado ou contaminado deverá ser recolhido, coletado e ter destinação final, de modo que não afete negativamente o meio ambiente e propicie a máxima recuperação dos constituintes nele contidos.

Na década de 90, o American Petroleum Institute (API) apresentou uma revisão importante em seu estudo sobre construção e operação de decantadores, uma solução simples e de baixo custo para separação parcial de óleo em água. O conceito do modelo de decantador do API é baseado na diferença de densidade entre os fluidos líquidos, com base na Lei

de Stokes (HUANG et al. 2011). As gotas coalescidas, ou seja, de maior tamanho são mais propensas a separação gravitacional após deixar o leito, reduzindo consideravelmente o tempo de residência. A partir disso, a coalescência de um fluido pode ser definida como um processo no qual elementos dispersos deste mesmo fluido se unem formando um todo maior (JAYA; KOLMETZ, 2012). Placas coalescentes geralmente são confeccionadas de materiais poliméricos, como PVC. Embora apresentem vantagens de aumentar a eficiência de coleta de óleo livre, este constituinte dos decantadores separadores óleo-água apresentam a inconveniência de necessidade de manutenção constante, por muito curtos períodos, a depender do teor de óleo.

### MATERIAL E MÉTODOS

#### Número de Reynolds de Turbulência

O conceito de decantador líquido-líquido envolve o balanceamento de alturas de líquidos (Figura 1) devido às diferenças na densidade das duas fases. Dessa forma, a velocidade da fase mais pesada cai através da fase mais leve, ou o mais leve ascendendo através da mais pesada (LUDWIG, 1999). A velocidade de sedimentação das gotas de um óleo é fruto da diferença de densidade entre as fases, e pode ser calculada conforme a Equação (1).

$$V_d = gd^2 \frac{(\rho_d - \rho_c)}{18\mu_c} \quad (1)$$

Em que:

$V_d$  - Velocidade terminal de sedimentação de uma gota, m/s

$g$  - Aceleração da gravidade, 9,80066 m/s<sup>2</sup>

$d$  - Diâmetro da gota, m

$\rho_d$  - massa específica do fluido da gota, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_c$  - Massa específica do fluido contínuo, kg/m<sup>3</sup>

$\mu_c$  - Viscosidade da fase fluida contínua, kg/m/s

A fase contínua move-se através do vaso decantador em um fluxo uniforme, igual à taxa de transbordamento. Para identificar qual é a fase contínua pode-se utilizar o seguinte critério (LUDWIG, 1999):

$$\theta = \frac{Q_L}{Q_H} \times \left( \frac{\rho_L \mu_H}{\rho_H \mu_L} \right)^{0.3} \quad (2)$$

Em que:

$Q_L$ : Vazão volumétrica Fase leve (m<sup>3</sup>/s)

$Q_H$ : Vazão volumétrica Fase pesada (m<sup>3</sup>/s)

$\rho_L$ : Densidade do fluido de fase leve (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_H$ : Densidade do fluido de fase pesada (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu_L$ : Viscosidade da fase leve (Pa·s)

$\mu_H$ : Viscosidade da fase pesada (Pa·s)

Através do Quadro 1 é possível identificar a condição das fases através do valor de  $\theta$  e, assim, se torna possível a identificação de qual fase é ou provavelmente está dispersa.

**Quadro 1.** Valores típicos para o parâmetro de dispersão.

Parâmetro de dispersão	Condição das fases
$\theta_{L/H} < 0,3$	Fase sempre leve e dispersa
$0,3 \leq \theta_{L/H} < 0,5$	Fase leve provavelmente dispersa
$0,5 \leq \theta_{L/H} < 2,0$	Provável inversão de fase
$2,0 \leq \theta_{L/H} < 3,3$	Fase pesada provavelmente dispersa
$\theta_{L/H} \geq 3,3$	Fase pesada sempre dispersa

Vasos cilíndricos horizontais são geralmente mais adequados para diâmetros de até 2,5 m de comprimento do que outras formas, ou vertical, devido em parte ao aumento da área interfacial para a

formação da interface (Figura 1). Para um vaso horizontal.

Para ilustração da Figura 1, as Equações a seguir auxiliam na quantificação dos parâmetros geométricos:

$$I = 2(r^2 - h^2)^{1/2}$$

$$A_T = I L$$

$$A_L = \frac{1}{2} \pi r^2 - h (r^2 - h^2)^{1/2} - r^2 \arcsin(h/r)$$

$$A_H = \pi r^2 - A_L$$

$$D_L = 4 A_L / (I + P)$$

$$D_H = 4 A_H / (I + 2 \pi r - P)$$

$$P = 2r \arccos(h/r)$$

Em que:

$A_I$ : Área da interface (assumindo interface plana), m<sup>2</sup>

$A_L$ : Área da seção transversal atribuída à fase leve, m<sup>2</sup>

$A_H$ : Área da seção transversal atribuída à fase pesada, m<sup>2</sup>

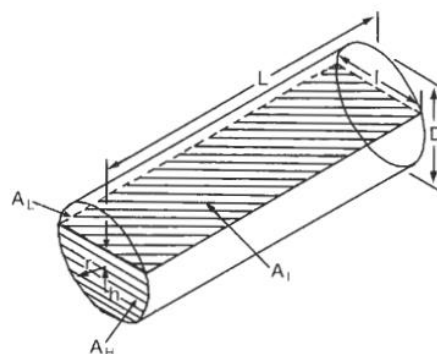
$h$ : Distância do centro à corda do vaso, m

$I$ : Largura da interface, m

$D$ : Diâmetro do decantador, m

$L$ : Comprimento do decantador, m

$r$ : Rádiano do vaso, m



**Figura 1.** Diagrama esquemático com parâmetros geométricos para vasos cilíndricos horizontais

O grau de turbulência de um decantador contínuo horizontal para separação água-óleo ou óleo-água é recomendado em função do número adimensional de Reynolds de turbulência (Equação 4):

$$N_{Re_t} = \frac{V_C D_H \rho_C}{\mu_C} \quad (4)$$

Em que:

$V_C$ : Velocidade da fase contínua, m/s

$D_H$ : Diâmetro hidráulico, m

$V_C$ : Velocidade ao longo do canal de fluxo

Através do número de Reynolds de Turbulência é possível identificar a eficiência de separações, sendo possível estimar a qualidade e/ou até mesmo sua

viabilidade para determinados projetos. O Quadro 2 apresenta categoricamente os parâmetros predefinidos para determinados números de Reynolds de turbulência.

**Quadro 2.** Critérios de eficiência de decantadores com base na faixa de valor do número de Reynolds de turbulência

$N_{Re_t}$	Resultado
<5000	Poucos problemas
5000 – 20.000	Alguns obstáculos
20.000 – 50.000	Chance de maiores problemas
>50.000	Expectativa de separação ineficiente

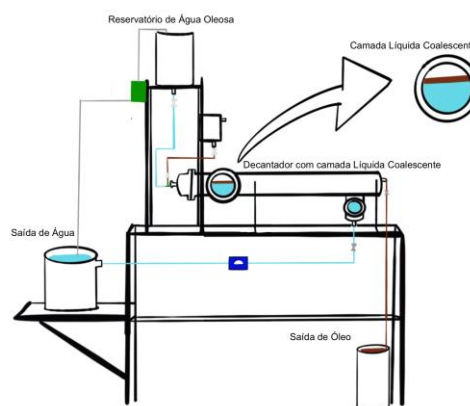
As velocidades de ambas as fases devem ser próximas através do decantador. Ao ajustar os internos mecânicos (Escala industrial), uma proporção menor que 2:1 é sugerida. As velocidades de entrada e saída do decantador devem ser baixas, na faixa de 0,15 m/s a 0,5 m/s. A alimentação deve ser “estabilizada” no vaso, com auxílio de uma estratégia para “acalmar” o fluxo e evitar choques no corpo principal do líquido, mantendo uma turbulência menor possível. Defletores devem ser colocado na metade frontal da unidade para fornecer fluxo lento dos fluidos através do decantador, para cima e para baixo, pressionados por uma câmara antes da saída do fluido (Figura 2).

### Arranjo experimental

Um protótipo de decantador contínuo, em escala de laboratório, foi construído em aço inoxidável - AISI 314 (Figura 2) no laboratório de Instrumentação da Engenharia Química da UNICAP. Uma estrutura de sustentação em perfil de aço carbono 1/2”, revestida com tinta à óleo de cor cinza, também foi construída para sustentação do decantador e periféricos como tanques de alimentação, de descarga e de recirculação, juntamente com respectivas bombas. Os tanques também foram construídos em aço inoxidável (AISI 314) em número de 4, sendo 01 para alimentação de efluente, 01 para armazenamento do óleo de formação da camada coalescente, 01 para coleta do óleo recuperado na saída superior do decantador e 01 último tanque para coleta da água tratada na saída inferior do decantador.

A fotografia mostrada pela Figura 3 ilustra o protótipo de bancada construído, munido ainda de circuito elétrico de alimentação das bombas e comandos de acionamento das mesmas, para recirculação dos fluidos coletados pelos respectivos tanques. Nesta fase do desenvolvimento do protótipo para estudos da

coalescência por camada líquida o controle de abertura das válvulas foi mantido em caráter manual.



**Figura 2.** Diagrama esquemático dos componentes do protótipo de bancada contendo o decantador contínuo com camada líquida coalescente



**Figura 3.** Fotografia do protótipo de bancada contendo o decantador contínuo com camada líquida coalescente instalado na Unicap-ICAM TECH

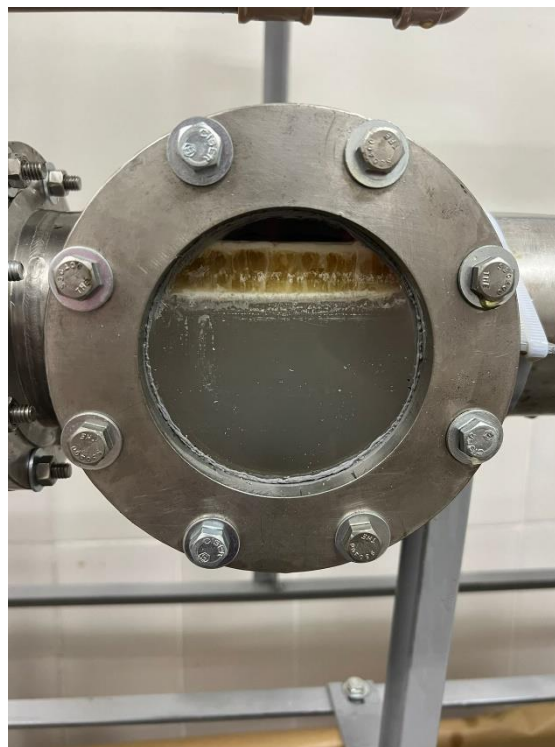
Para análise de desempenho do decantador contínuo correlacionou-se o teor de óleos na água saída do decantador, em condições experimentais de diferentes valores do número de Reynolds de turbulência. Na obtenção de um efluente sintético água-óleo utilizou-se óleo lubrificante da Shell, o Helix HX6 FLEX 15W-40. Operou-se o sistema circulando inicialmente a água oleosa. Posteriormente, com o efluente sintético distribuído ao logo do decantador, a mistura de água oleosa até a obtenção de uma certa homogeneidade. Após várias recirculações pelo

protótipo a água oleosa estabilizou-se com um teor de 18,7% de óleo em água. Outra parte do óleo contida no tanque acima do decantador (Figura 5) foi manobrada para dentro do equipamento até a formação de uma camada de espessura de aproximadamente 15 mm (Figura 6).



**Figura 5.** Reservatório de óleo acima do decantador de camada líquida coalescente

A superfície superior da camada de óleo estabelecida ao longo do comprimento do decantador para auxiliar na coalescência do óleo disperso na água oleosa. Dessa forma, ao recircular o efluente sintético pelo decantador o excesso de óleo acumulado na camada em função da coalescência gerava um fluxo de saída pela parte superior do decantador. A água com óleo residual era liberada pela parte inferior do decantador. Com isso esperava-se demonstrar que, com variações do número de Reynolds de turbulência a eficiência de separação do equipamento passaria também por variações proporcionais.



**Figura 5.** Camada coalescente de óleo identificada através do visor de nível existente no corpo do decantador

### Análises do Teor de Óleo em Água

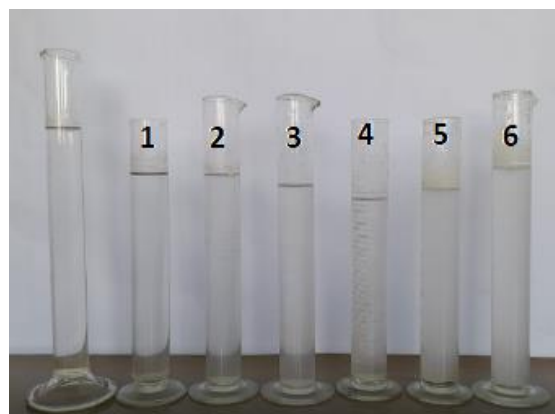
As amostras de água oleosa e óleo recuperado pela camada líquida coalescente foram coletadas em seus respectivos pontos de amostragem localizados no protótipo de bancada. As amostras foram marcadas, com suas respectivas numerações referentes às vazões de operação.

O método de partição gravimétrica foi utilizado (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2012). Uma mistura padrão de hexadecano/ácido esteárico a 1:1 em massa, na concentração de 2 mg/mL para cada substância em acetona, usada como solvente de extração. Conforme o procedimento descrito nesse método, primeiramente, marcou-se, no frasco de armazenagem da amostra o nível do menisco inferior da interface líquido/ar para posterior determinação do seu volume. Em seguida, colocou-se a amostra em um funil de separação e adicionou-se 30 mL da mistura padrão. Misturou-se por 2 minutos e esperou-se até que as fases se separem. Após a separação das fases, drenou-se a fase aquosa para o frasco original de armazenagem da amostra, e a fase contendo a mistura padrão, ou seja, o solvente de extração juntamente com o óleo foi extraído, para um balão de fundo chato, passando-a por meio de um funil adaptado com papel filtro e 10 g de sulfato de sódio. Repetiu-se por mais duas vezes o procedimento de

extração do óleo da amostra, adicionando 30 mL da mistura padrão ao funil de separação contendo a amostra, misturando por 2 minutos, aguardando a separação e posterior drenagem das fases. Ao final, adicionou-se mais 10 mL de solvente de extração ao balão de fundo chato por meio do funil contendo o papel filtro. O volume total do solvente de extração que foi adicionado ao balão de fundo chato deveria ser de, aproximadamente, 100 mL. Após esse procedimento, realizou-se a destilação do solvente de extração contido no balão de fundo chato por meio da utilização de uma aparelhagem para destilação e recuperação de solventes e auxílio de câmara de vácuo. Concluída a destilação de todo o solvente, restava no balão de fundo chato o óleo contido na amostra e os resíduos conhecidos do solvente de extração. Por meio da diferença de massa entre o balão de fundo chato vazio no início do ensaio e após a destilação do solvente, pode-se calcular a massa de óleo contido na amostra. Para se determinar o volume inicial da amostra, encheu-se o frasco de armazenamento da amostra com água até a posição do menisco inferior da interface líquido/ar, anotada no início do ensaio, e com auxílio de uma proveta graduada, determina-se o seu volume. A concentração de óleo foi determinada por meio da relação entre a massa de óleo existente na amostra, em mg, e o volume, calculado em L.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas amostras coletadas no protótipo de bancada do decantador de camada coalescente líquida foi possível identificar todos os fatores necessários para o cálculo do número de Reynolds de turbulência. Foram coletadas 6 amostras com diferentes vazões. Na Figura 6 observa-se o aspecto de transparência dessas amostras, mostrando numa escala visual crescente a turbidez devido ao aumento do teor de óleo, em função dos escoamentos com os respectivos números de Reynolds de turbulência mais elevados.



**Figura 6.** Amostras de água sem óleo (não numerada) e coletadas na saída do protótipo de bancada operando com diferentes números de Reynolds de Turbulência.

As planilhas eletrônicas apresentadas a seguir utilizam valores de parâmetros operacionais para cálculos de condições de operacionais correspondentes às amostras numeradas (1, 2, ..., 6) apresentadas pelas (Figura 7 a 12)

### - Planilha correspondente à Amostra 1

Esta amostra foi coletada sob condições de um número de Reynolds de turbulência de 134. A avaliação das condições de composição da alimentação (q) confirmou alto índice de indicação da fase oleosa como a fase dispersa ( $\theta < 0,3$ ), condição necessária para manutenção da camada líquida coalescente de óleo. Portanto, o aspecto visual da amostra 1, isenta de óleo livre, confirma valores numéricos obtidos para o número de Reynolds de turbulência calculado.

CRITÉRIO TETA ( $\theta$ ): A/O ou Q/A		CRITÉRIO DE REYNOLDS DE TURBULÊNCIA			
Valor	Unidade	Valor	Unidade		
Q(a)	0,0000089	m <sup>3</sup> /s	D	0,1	m
$\rho$ (a)	1000	kg/m <sup>3</sup>	L	0,56	m
$\mu$ (a)	0,000891	Pa.s	h	0,025	m
Q(a)	1,05E-06	m <sup>3</sup> /s	r	0,05	m
$\rho$ (a)	0,876	kg/m <sup>3</sup>	I	0,087	m
$\mu$ (a)	0,01752	Pa.s	At	0,647	m <sup>2</sup>
		At	0,002	m <sup>2</sup>	
		Ah	0,006	m <sup>2</sup>	
		P	0,105	m	
		DH	0,085	m	
		Va	0,001409	m/s	

$\theta$	5,82E-03	NRe(turb)	134,96396
< 0,3	FL - Sempre dispersa	< 5000	Pequenos problemas
0,3 - 0,5	FL - Prov. Dispersa	5000 - 20000	Problemas médios
0,5 - 2,0	FL/FP - Prov. Inversa	20000 - 50000	Problemas maiores
2,0 - 3,3	FP - Prov. dispersa	> 50000	Separação muito pobre
> 3,3	FP - Sempre dispersa		

**Figura 7.** Planilha correspondente a Amostra 1

### - Planilha correspondente à amostra 2

Para obtenção da amostra 2, Figura 8, aumentou-se a abertura na saída de água separada pelo protótipo, duplicando-se a vazão (aproximadamente 115%). Contudo, o número de Reynolds de turbulência alcançou um valor de 288, ficando ainda bem abaixo do valor limite (5000) para um funcionamento adequado do protótipo de bancada. A fase dispersa continuou sendo o óleo ( $q < 0,3$ ).

CRITÉRIO TETA (θ): A/O ou O/A			CRITÉRIO DE REYNOLDS DE TURBULÊNCIA		
Valor	Unidade		Valor	Unidade	
Q(a)	0,000019	m <sup>3</sup> /s	D	0,1	m
p(a)	1000	kg/m <sup>3</sup>	L	0,56	m
μ(a)	0,000891	Pa.s	h	0,025	m
Q(o)	2,26E-06	m <sup>3</sup> /s	r	0,05	m
p(o)	0,876	kg/m <sup>3</sup>	l	0,087	m
μ(o)	0,01752	Pa.s	Ai	0,647	m <sup>2</sup>
			AL	0,002	m <sup>2</sup>
			AH	0,006	m <sup>2</sup>
			P	0,105	m
			DH	0,085	m
			Va	0,003007029	m/s

θ	0,005879525
< 0,3	FL - Sempre dispersa
0,3 - 0,5	FL - Prov. Dispersa
0,5 - 2,0	FL/FP - Prov. Inversão
2,0 - 3,3	FP - Prov. dispersa
> 3,3	FP - Sempre dispersa

NRe(turb)	288,1253078
< 5000	Pequenos problemas
5000 - 20000	Problemas médios
20000 - 50000	Problemas maiores
> 50000	Separação muito pobre

Figura 8. Planilha correspondente à Amostra 2

CRITÉRIO TETA (θ): A/O ou O/A			CRITÉRIO DE REYNOLDS DE TURBULÊNCIA		
Valor	Unidade		Valor	Unidade	
Q(a)	0,00029	m <sup>3</sup> /s	D	0,1	m
p(a)	1000	kg/m <sup>3</sup>	L	0,56	m
μ(a)	0,000891	Pa.s	h	0,025	m
Q(o)	3,40E-05	m <sup>3</sup> /s	r	0,05	m
p(o)	0,876	kg/m <sup>3</sup>	l	0,087	m
μ(o)	0,01752	Pa.s	Ai	0,647	m <sup>2</sup>
			AL	0,002	m <sup>2</sup>
			AH	0,006	m <sup>2</sup>
			P	0,105	m
			DH	0,085	m
			Va	0,045896761	m/s

θ	0,005804105
< 0,3	FL - Sempre dispersa
0,3 - 0,5	FL - Prov. Dispersa
0,5 - 2,0	FL/FP - Prov. Inversão
2,0 - 3,3	FP - Prov. dispersa
> 3,3	FP - Sempre dispersa

NRe(turb)	4397,702067
< 5000	Pequenos problemas
5000 - 20000	Problemas médios
20000 - 50000	Problemas maiores
> 50000	Separação muito pobre

Figura 10. Planilha correspondente à amostra 4

### - Planilha correspondente à amostra 3

Na Amostra 3, Figura 9, mesmo com maior abertura da saída de água com relação à amostra 2, o Reynolds de turbulência atingiu um valor de aproximadamente 576. Este valor ainda apresentou um baixo número de Reynolds, sendo confirmado por uma turbidez incipiente, mas ainda de baixa visibilidade na amostra (Figura 12). A fase oleosa foi mantida como fase dispersa ( $q < 0,3$ ).

CRITÉRIO TETA (θ): A/O ou O/A			CRITÉRIO DE REYNOLDS DE TURBULÊNCIA		
Valor	Unidade		Valor	Unidade	
Q(a)	0,000038	m <sup>3</sup> /s	D	0,1	m
p(a)	1000	kg/m <sup>3</sup>	L	0,56	m
μ(a)	0,000891	Pa.s	h	0,025	m
Q(o)	4,30E-06	m <sup>3</sup> /s	r	0,05	m
p(o)	0,876	kg/m <sup>3</sup>	l	0,087	m
μ(o)	0,01752	Pa.s	Ai	0,647	m <sup>2</sup>
			AL	0,002	m <sup>2</sup>
			AH	0,006	m <sup>2</sup>
			P	0,105	m
			DH	0,085	m
			Va	0,006014058	m/s

θ	0,005601949
< 0,3	FL - Sempre dispersa
0,3 - 0,5	FL - Prov. Dispersa
0,5 - 2,0	FL/FP - Prov. Inversão
2,0 - 3,3	FP - Prov. dispersa
> 3,3	FP - Sempre dispersa

NRe(turb)	576,2506156
< 5000	Pequenos problemas
5000 - 20000	Problemas médios
20000 - 50000	Problemas maiores
> 50000	Separação muito pobre

Figura 9. Planilha correspondente à amostra 3

### - Planilha correspondente à amostra 4

As condições operacionais do protótipo de bancada da amostra 4 (Figura 10) foram: número de Reynolds de turbulência de, aproximadamente, 4397 e  $q < 0,3$ . Uma considerável turbidez foi observada na amostra (Figura 6). Praticamente, o número de Reynolds apresenta-se no limite e passível de apresentar pequenos problemas na eficiência de separação.

### i. Planilha correspondente à amostra 5

Nesta condição operacional em que o número de Reynolds de turbulência, de 8492, entra na faixa de problemas médios de separação água-óleo (5000 – 20000). A Figura 7 mostra uma acentuada turbidez com a retenção de gotículas de óleo na parte superior da proveta usada para coleta. A fase dispersa continuou a ser a fase oleosa ( $q < 0,3$ ).

CRITÉRIO TETA (θ): A/O ou O/A			CRITÉRIO DE REYNOLDS DE TURBULÊNCIA		
Valor	Unidade		Valor	Unidade	
Q(a)	0,00056	m <sup>3</sup> /s	D	0,1	m
p(a)	1000	kg/m <sup>3</sup>	L	0,56	m
μ(a)	0,000891	Pa.s	h	0,025	m
Q(o)	7,00E-05	m <sup>3</sup> /s	r	0,05	m
p(o)	0,876	kg/m <sup>3</sup>	l	0,087	m
μ(o)	0,01752	Pa.s	Ai	0,647	m <sup>2</sup>
			AL	0,002	m <sup>2</sup>
			AH	0,006	m <sup>2</sup>
			P	0,105	m
			DH	0,085	m
			Va	0,08628228	m/s

θ	0,0051802
< 0,3	FL - Sempre dispersa
0,3 - 0,5	FL - Prov. Dispersa
0,5 - 2,0	FL/FP - Prov. Inversão
2,0 - 3,3	FP - Prov. dispersa
> 3,3	FP - Sempre dispersa

NRe(turb)	8492,114336
< 5000	Pequenos problemas
5000 - 20000	Problemas médios
20000 - 50000	Problemas maiores
> 50000	Separação muito pobre

Figura 11. Planilha correspondente à amostra 5

### ii. Planilha correspondente à amostra 6

Nesta amostra o aumento da vazão de alimentação do protótipo de bancada de decantação contínua foi produzido para confirmar uma maior menor retenção de óleo pela camada coalescente de óleo. Neste caso, para um Reynolds de turbulência de aproximadamente 13648, a retenção de gotículas de óleo na parte superior da proveta aumentou visualmente. Ainda nestas condições, obedecendo condições de manutenção de condições operacionais para formação da placa coalescente de óleo foi mantida, ou seja,  $q < 0,3$ .

CRITÉRIO TETA (θ): A/O ou O/A			CRITÉRIO DE REYNOLDS DE TURBULÊNCIA		
Valor	Unidade		Valor	Unidade	
Q(a)	0,0009	m <sup>3</sup> /s	D	0,1	m
p(a)	1000	kg/m <sup>3</sup>	L	0,56	m
μ(a)	0,000891	Pa.s	h	0,025	m
Q(o)	1,30E-04	m <sup>3</sup> /s	r	0,05	m
p(o)	0,876	kg/m <sup>3</sup>	l	0,087	m
μ(o)	0,01752	Pa.s	Ai	0,647	m <sup>2</sup>
			AL	0,002	m <sup>2</sup>
			AH	0,006	m <sup>2</sup>
			P	0,105	m
			DH	0,085	m
			Va	0,142438223	m/s

θ	0,007150809
< 0,3	FL - Sempre dispersa
0,3 - 0,5	FL - Prov. Dispersa
0,5 - 2,0	FL/FP - Prov. Inversão
2,0 - 3,3	FP - Prov. dispersa
> 3,3	FP - Sempre dispersa

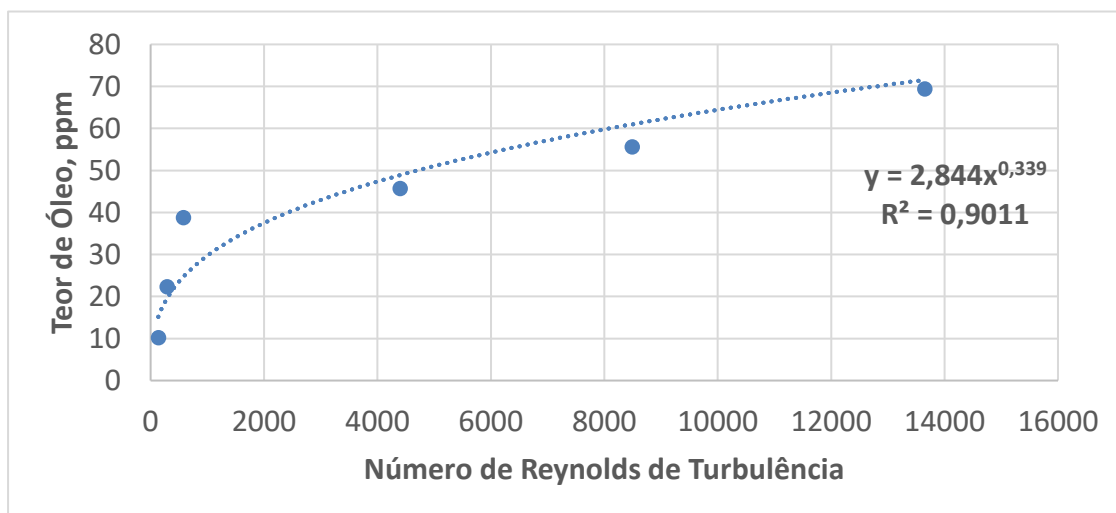
  

NRe(turb)	13648,0409
< 5000	Pequenos problemas
5000 - 20000	Problemas médios
20000 - 50000	Problemas maiores
> 50000	Separação muito pobre

Figura 12. Planilha correspondente à amostra 6

Com auxílio dos dados experimentais e, após a análise individual de cada amostra, foi possível a obtenção de uma correlação entre o número de Reynolds e o teor de óleo em partes por milhão (ppm). Os dados são mostrados na Tabela 1 e ilustrado com auxílio do gráfico da Figura 13. O gráfico gerado (Figura 14)

mostrou a existência de correlação entre os parâmetros de seus eixos [ordenadas: teor de óleo (y) versus número de Reynolds de turbulência (x)], com um coeficiente de determinação acima de 90% e um ajuste de 0,9492.



**Figura 13.** Gráfico teor de óleo (ppm) em função do número de Reynolds de Turbulência.

**Tabela 1.** Valores de teores de óleo nas amostras de água coletada na saída de água do protótipo de bancada do decantador de placa coalescente líquida.

Reynolds de Turbulência	Teor de Óleo (ppm)		
135	10,2	±	0,3
288	22,3	±	0,2
576	38,3	±	0,3
4.397	45,7	±	0,4
8.492	55,6	±	0,5
13.648	69,4	±	0,5

### CONCLUSÃO

A formação de uma camada oleosa estável, dentro de um decantador contínuo, facilita a ocorrência de coalescência das gotículas de óleo disperso no efluente, sem os inconvenientes da introdução de placas de material sólido no interior do equipamento, dificultando a retirada dessas placas para limpeza periódica para manutenção.

A análise dos resultados mostrou que a qualidade da água recuperada do decantador com camada líquida

pode ser elevada à medida em que o número de Reynolds de turbulência seja mantido o mais abaixo possível do valor de 5000.

Como sugestão para futuros trabalhos recomenda-se a elaboração de estratégias de controle para manutenção das vazões dos líquidos através do protótipo, assegurando a manutenção de condições estáveis de operação – estabilidade para a camada líquida coalescente.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Escola UNICAP-ICAM TECH e ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), Brasil.

### REFERÊNCIAS

- 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. 28668-28668, 2019.  
 AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER

ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (2012) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22. ed. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF.

HUANG, HSIN-HUI; BOUFFARD, SEBASTIEN; SU, YUE. Oil-Water Separation System for Industrial Wastewater. , [s. 1.], 2011.

HYDROTECH. Manual de instalação SAO – Separador de água e óleo. Betim, 2020.

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

LUDWIG, Ernest E. APPLIED PROCESS DESIGN: For Chemical and Petrochemical Plants. 3. ed. [S. 1.: s. n.], 1999. v. 1.

SECRON, Marcelo. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS SEPARADORES ÁGUA E ÓLEO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVAGEM, ABASTECIMENTO E MANUTENÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. Dissertação, [S. 1.], p. 80, fev. 2006.