

**MECANISMOS DE TRANSPORTE DE UM HIDROCICLONE:
MODELAGEM MATEMÁTICA**

**MECHANISMS OF TRANSPORTATION OF A HYDROCYCLONE:
MATHEMATICAL MODELING**

ÁLVARO MATEUS FRANÇA DA SILVA

CAMILA LÚCIO DOS SANTOS

FRANCISCO SALVIANO DA SILVA JÚNIOR

IASMIM CRISTINA DA SILVA FREITAS

PEDRO HENRIQUE AIRES DE SOUSA

Artigo científico apresentado à escola de engenharia de petróleo, com o objetivo de obter nota para aprovação na matéria de Processamento Primário do Petróleo, tendo como orientador o Professor Dr. Carlos Enrique de Medeiros Jerônimo.

NATAL – RN

2014

RESUMO

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, o estudo caracteriza-se como pesquisa bibliográfica, por sua elaboração a partir do levantamento e análise de material já publicado, artigos científicos, livros, relatórios técnicos, etc. Com a finalidade de discutir o mecanismo de transporte de um hidrociclone aplicado a indústria petrolífera, que visa acelerar a separação óleo- água através da força gravitacional no processamento primário do petróleo. O estudo apresenta quais as variáveis relevantes para o desempenho do equipamento, através de uma simulação numérica na qual, relaciona seu mecanismo de transporte, com a modelagem matemática baseada nos modelos das leis de conservação da massa, conservação do movimento e conservação da energia. Bem como, a descrição do seu funcionamento, vantagens e desvantagem na aplicação da indústria em questão.

Palavras-chave: Hidrociclones. Simulação. Transporte.

ABSTRACT

From the standpoint of technical procedures, the study characterizes as literature, for its elaboration from survey and analysis of material already published, scientific articles, books, technical reports, etc. In order, to discuss the mechanism of a hydrocyclone applied to the oil industry, which aims to accelerate the oil-water separation by gravitational force in the primary oil processing. The study shows which variables are relevant to the performance of the equipment through a numerical simulation in which, relates its transport mechanism, with models based on mathematical modeling of the laws of conservation of mass, conservation of motion and energy conservation. As well as, the description of their operation, advantages and disadvantages in the application of the industry in question.

Keywords: Hydrocyclone. Simulation. Transportation.

INTRODUÇÃO

Ciclones são equipamentos usados há mais de cem anos pela indústria de processos, patenteados e conhecidos desde o final do século XIX, quando eram apenas empregados na remoção de areia, de água, assim, como também na indústria de mineração. Eles têm sido bastante utilizados em diferentes processos industriais, tais como separação no processo físico e reações químicas. Porém, só a partir da década de 60 houve um aumento na sua aplicabilidade em vários campos da tecnologia, sendo, por isso, considerado um equipamento de grande importância e amplamente usado. O hidrociclone consiste basicamente de uma seção cônica ligada a um corpo cilíndrico, a qual possui um duto de alimentação ajustado para se ter uma entrada tangencial da mistura, também apresentam uma elevada capacidade de processamento, pouco espaço físico necessário para suas instalações, facilidade de operação, e por não requererem praticamente nenhuma manutenção e principalmente são economicamente viáveis no que se diz respeito a relação custo/benefício (LEAHY-DIOS e MEDRONHO, 2003; OLIVEIRA e MEDRONHO, 2004).

Atualmente o hidrociclone é empregado em diversos campos da indústria sempre que há a necessidade de um processo de separação de partículas dispersas em um líquido. Pois, eles são equipamentos de separação que apresentam elevadas capacidades, sendo indicados no tratamento do efluente envolvendo mistura líquido-líquido.

O OBJETIVO DO TRABALHO

Analisar a velocidade de separação de gotas de óleo dispersas em água (fase contínua). Avaliando petróleo com diferentes graus API, através de uma simulação numérica, por abordagem Lagrangeana.

UTILIZAÇÃO DE HIDROCICLONES NO PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DO PETRÓLEO

Hidrociclones são utilizados por diversas indústrias para a separação de dois componentes de densidades diferentes com o auxílio da força centrífuga criada pelo fluxo rotacional. A separação de dois líquidos imiscíveis por hidrociclone é incomum, exceto na indústria de óleos, onde é utilizado para remover óleo de águas residuais. (DELFOS *et al.*, 2004).

É uma prática comum na indústria de petróleo a aplicação de equipamentos ciclônicos na separação de correntes de líquidos/gás, sólido/gás e sólido/líquido. A existência de fornecedores de equipamentos comerciais comprova a solidez dessa tecnologia. Já, o uso dos hidrociclones para a separação líquido/líquido, embora seja objeto de pesquisa há anos, apenas nas últimas décadas tem sua aplicação industrial consolidada (Moraes, 2006).

HIDROCICLONES PARA SEPARAÇÃO LÍQUIDO-LÍQUIDO

Tipicamente, a água proveniente dos separadores e tratadores de óleo é enviada a um vaso desgaseificador, seguindo daí para um separador água/óleo e finalmente para um tubo de despejo (no caso de plataformas marítimas). Todo óleo recuperado nas várias etapas é recolhido em um tanque recuperador de óleo, retornando ao processo.

Os hidrociclones e a flotação são os processos de separação água/óleo atualmente mais usados pela indústria do petróleo. A flotação procura recuperar o resíduo de óleo através da separação gravitacional, enquanto os hidrociclones procuram acelerar esse processo.

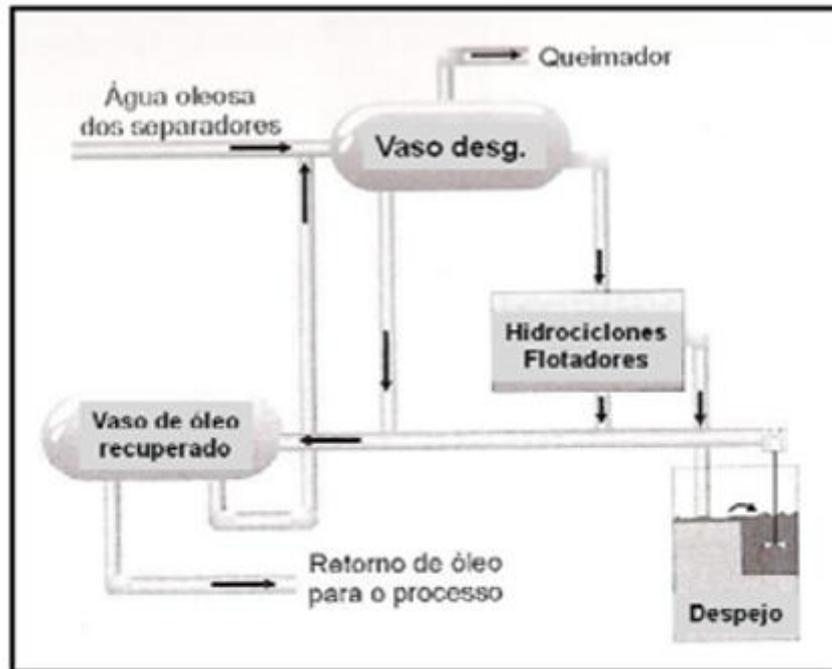


Figura 1: apresenta um sistema de tratamento de água.

A água oleosa é introduzida sob pressão, tangencialmente ao trecho de maior diâmetro do hidrociclone sendo direcionada internamente em fluxo espiral ao trecho de maior diâmetro. Este fluxo é acelerado pelo contínuo decréscimo de diâmetro criando uma força centrífuga que força os componentes mais pesados (água e sólidos) contra a parede. Devido ao formato cônico do hidrociclone ao diferencial de pressão existente entre a parede e o centro, ocorre na parte central do equipamento, um fluxo axial reverso. Esta fase líquida central contendo óleo com maior proporção é denominada de rejeito. E a água produzida é descartada.

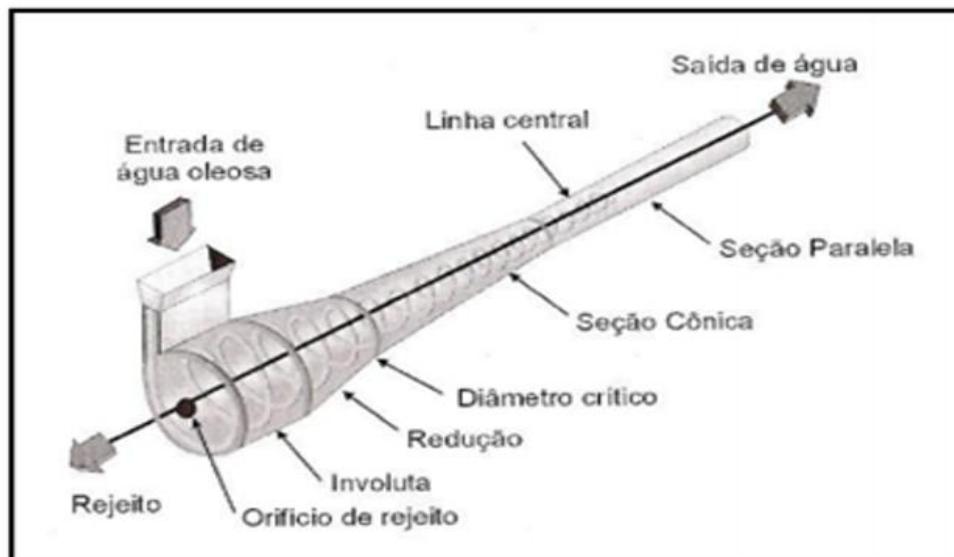


Figura 2: representa a descrição do hidrociclone.

Ao entrar no hidrociclone, os fluidos seguem em direção a uma parede cônica que auxilia o movimento rotacional ao longo do corpo do equipamento, seguindo uma trajetória espiral descendente até a saída inferior. O equipamento conta com duas saídas que permitem a separação dos fluidos, uma próxima a região de entrada do fluido (mundialmente conhecida como “overflow”) e outra, em posição oposta, localizada na parte cônica (mundialmente conhecida como “underflow”).

DIMENSIONAMENTO DOS HIDROCICLONES

A lei de Stokes é regida por uma equação que faz previsão do comportamento teórico de um procedimento de separação líquido-líquido. Por exemplo, para o uso de ciclones na separação da mistura água-óleo (SCHUBERT, 1983):

$$v = \frac{g(\rho_w - \rho_o).d_o^2}{18\mu} \quad (1)$$

Onde:

v - velocidade de ascensão da gota de óleo

g - aceleração gravitacional

d_o diâmetro da gota de óleo

$\rho_w - \rho_0$ – diferença entre as massas específicas da água (subscrito w) e do óleo (subscrito)

μ - viscosidade absoluta da fase contínua (água)

Onde g é uma constante, e as massas específicas dos líquidos são variáveis que não podem ser manuseadas. O diâmetro da gota de óleo e a viscosidade da fase contínua (água) têm potencial para serem manipuladas vantajosamente. A eficiência de separação é proporcional ao tamanho da gota de óleo. Uma gota de 40 μm pode ser dividida em gotas de 20 ou 10 μm em um regime de fluxo turbulento. A lei de Stokes indica ainda que se leva quatro vezes mais tempo para se separar uma gota de 20 μm e 16 vezes uma de 10 μm em relação a uma gota de 40 μm . Mostra, além disso, que a eficiência de separação é inversamente proporcional à viscosidade da fase contínua, e que esta última pode ser reduzida com o aumento da temperatura do processo.

O processo de separação líquido-líquido em hidrociclone é mais difícil que o de sólido-líquido, devido a:

- ✓ Diferença de massa específica entre dois líquidos imiscíveis é geralmente muito pequena, sendo menor ainda que aquela calculada teoricamente em função da formação de emulsões;
- ✓ As gotas da fase dispersa tendem a variar de tamanho durante o processo, com aumento (coalescência), ou redução (choques);
- ✓ O fluido disperso também pode sofrer a influência do reservatório natural ou do reservatório do campo de petróleo.

MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem é feita a partir de modelos teóricos ou experimentais, e tem como fundamental importância fazer um estudo de determinado fenômeno físico. A modelagem matemática serve para determinar as grandezas físicas que atuam sobre o sistema e como elas interferem.

O procedimento começa com a elaboração de um modelo a partir da aplicação de princípios físicos, descritos por leis de conservação adequadas ao fenômeno, tais como conservação da massa, energia e momento. Os modelos resultantes são expressos por equações que relacionam as grandezas relevantes entre si para um determinado espaço e

tempo. Eles podem ser utilizados tanto para explicar como para prever o comportamento do sistema em diferentes situações (FORTUNA, 2000).

De acordo com os métodos das formulas de Navier-Stokes da equação de continuidade ou conservação já citados nas obras de MEDRONHO e SVAROVISKY, chegamos a modelagem da fase fluida discreta na forma (Lagrangeana). É dada pela equação abaixo:

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} |u_i - v_i| (u_i - v_i) + \frac{F_i}{m_p} \quad (2)$$

Onde, m_p é a massa da gota, v_i é a velocidade da fase fluida discreta (Lagrangeana), F_i é a soma das forças na direção i (além das forças de arraste), C_D é o coeficiente de arrasto, ρ_p é a densidade da fase fluida discreta, d_p é o diâmetro da gota e Re é o número de Reynolds relativo entre as fases continua e dispersa, dado por:

$$Re = \frac{\rho d_p |v_i - v_i|}{\mu} \quad (3)$$

A solução do movimento da fase fluida discreta é obtida calculando-se a velocidade local de um parcel na posição atual usando a equação (1) e, usando a velocidade calculada e um passo de referência, definir sua nova posição. Para o coeficiente de arraste, existe um grande número de correlações disponíveis, como, a de PUTNAM, (1961). Na equação (4) e (5):

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.667}) \quad Re_p < 1000 \quad (4)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (0.0183 Re_p) \quad 1000 \leq Re_p < 2.E05 \quad (5)$$

MATERIAIS E MÉTODOS

❖ Geometria do hidrociclone

O hidrociclone que será utilizado, será o mesmo utilizado por Zhou *et al.* (2010), sendo o mesmo do trabalho de Young *et al.* (1994). Como é possível constar na tabela (1), este hidrociclone não possui *vortex finder*, possui apenas uma única entrada circular na região cilíndrica.

Tabela 1: proporções do hidrociclone empregado por Zhou *et al.* (2010).

Variável	Dimensões (mm)
Diâmetro do cilindro (D_c)	50,0
Diâmetro do duto de alimentação (D_i)	13,0
Diâmetro do concentrado (D_o)	8,0
Diâmetro do diluído (D_u)	19,0
Comprimento da seção cilíndrica (L_1)	50,0
Comprimento do <i>vortex finder</i> (L_2)	0,0
Espessura da parede (L_3)	0,0
Comprimento da seção cônica (L_4)	322,0
Comprimento do tubo de concentrado (L_5)	100,01
Comprimento do tubo de diluído (L_6)	100,02
Comprimento do tubo de entrada (L_7)	100,01
Ângulo da seção cônica (θ) em ($^\circ$)	5,5

A figura abaixo mostra o hidrociclone com sua geometria básica e suas respectivas variáveis geométricas.

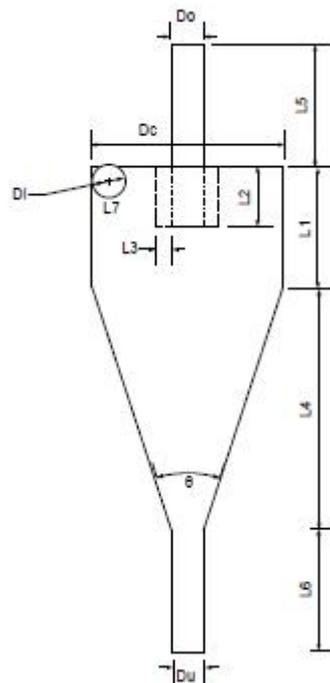


Figura 3: Vista esquemática de um hidrociclone clássico e suas variáveis geométricas.

❖ Simulador

As simulações foram feitas no EXCEL 2013 e aplicou-se o método matemático da soma de Riemann, que é um método para aproximação da área total inferior à curva em um gráfico, de outro modo conhecida como uma integral. A partir, do qual foi feito a operação da integração da modelagem da fase discreta no modelo Lagrangeano, aplicando na fórmula abaixo:

$$v_i = v_i + \frac{\partial v_i}{\partial t} \Delta t \quad (6)$$

❖ Grau API

Utilizando a formula do grau API, apresentada abaixo, foi possível encontrar a densidade para cada fluido.

$$\rho = \frac{141.5}{\text{oAPI} + 131.5} \quad (7)$$

❖ Viscosidade

Em seguida, avaliamos os valores de A e B para substâncias, através dos parâmetros da equação de Andrade (equação esta que, foi adotada para o cálculo da viscosidade absoluta em função da temperatura), obtivendo assim, as correlações para o cálculo de propriedades dos componentes bases, como número de átomos de carbono- (#C), função do número de átomos de carbono -f(#C).

Tabela 2: apresenta os parâmetros A e B para o cálculo da viscosidade do óleo.

Propriedade	Modelo f(#C)	Família	C1	C2	C3	C4
Parâmetro A	$=C1(\#C)^3+C2(\#C)^2+C3(\#C)+C4$	Parafínico	$-4,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,35	2,68
		Naftênico	$-8,6 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,42	1,38
		Aromático	$-5,7 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	0,78	0,31
Parâmetro B	$=C1(\#C)^3+C2(\#C)^2+C3(\#C)+C4$	Parafínico	0,134	-8,63	22,4	196,3
		Naftênico	$-3,8 \cdot 10^{-4}$	-3,77	14,5	341,1
		Aromático	0,195	-13,83	61,0	1088

Os valores da viscosidade podem ser encontrados com base nos parâmetros A, B e a temperatura absoluta, aplicados na fórmula abaixo:

$$\ln \eta = A + \frac{B}{T} \quad (8)$$

Para se conhecer os valores de A e B, é necessário classificar a família a qual o fluido pertence, tais como: parafínicos, naftênicos e aromáticos. Definida a partir do grau API.

Enquanto que a temperatura deve ser aplicada Kelvin, calculada da seguinte maneira:
Celsius + 273 = nova temperatura em Kelvin.

Tabela 3: apresenta a relação do número de carbono para cada tipo de óleo.

Família	Átomos de Carbono	Grau API	Tipos de óleo
Parafínico	1-42	Menor que 22	Petróleo Pesado
Naftênico	5-6	Maior que 30	Petróleo Leve
Aromático	6	Entre 22 e 30	Petróleo Médio

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Nas condições de contorno, analisou-se o comportamento de cada grau API referente ao seu Campos/Bacia.

Tabela 4: indica os parâmetros do óleo com relação ao campo e a cada bacia.

Campo	Bacia	Grau API	Densidade (kg/m³)	Viscosidade (kg/m.s)	Massa da partícula (µg)
Piranema	Sergipe/Alagoas	41,9	816	0,337	92240,64
Espadarte	Campos	22,1	921	0,175	104109,84
Camarupim	Santos	51,5	773	0,441	82858,32
Papa-terra	Campos	14,2	971	11,08	109761,84

De acordo com cada Bacia escolhida em seus respectivos Campos, como os de (Piranema, Espadarte, Camarupim e Papa-Terra), pode-se encontrar os valores apresentados.

Tabela 5: representa os parâmetros utilizados na confecção do cenário.

Parâmetros	Informações
Fase aquosa	Contínua
Fração molar inicial da água	0,99
Densidade da água	1000 kg/m ³
Viscosidade da água	0,001 kg/m.s
Fase oleosa	Dispersa
Fração molar de óleo na entrada	0,01
Diâmetro da gota	6µm
Velocidade de entrada	5m/s
Temperatura	27°C
Modelo matemático	Lagrangeano
Regime	Pseudo-transiente
Coeficiente de arraste	2,04
Geometria da gota	Esférica

RESULTADOS E DISCURSÕES

Analisando, as velocidades das partículas dispersas das determinadas amostras de óleo, fazendo a simulação numérica de água produzida com concentração de 0,01 para óleo e 0,99 para água. Através do grau API do óleo, determinando sua densidade e sua massa de partícula, obtivemos os resultados apresentados nos gráficos abaixo:

O gráfico (1), mostra que as velocidades da partícula do óleo com densidade 773kg/m^3 correspondente ao campo de Camarupim na Bacia de Santos, se sobressai sobre as demais velocidades apresentadas, devido ao seu óleo de baixa densidade em relação as demais amostras que, ajuda aumentar a velocidade de separação, pois, sua variação de densidade é maior do que, a das outras amostras. Neste caso, facilitando a separação através da força centrífuga.

Com relação às curvas representadas no gráfico (1), pode-se analisar que, a pouca variação entre as densidades utilizadas para cada tipo de óleo, mostrando que suas curvas são extremamente próximas.

A curva implica no momento em que, a gota de óleo dispersa está partindo em direção ao centro do hidrociclone. A parte do gráfico pós-curva, apresenta uma variação muito baixa da velocidade em relação ao tempo, já que, a mesma tende a se estabilizar. Visto que, a gota de óleo atingiu o centro do hidrociclone onde a velocidade se mantém constante.

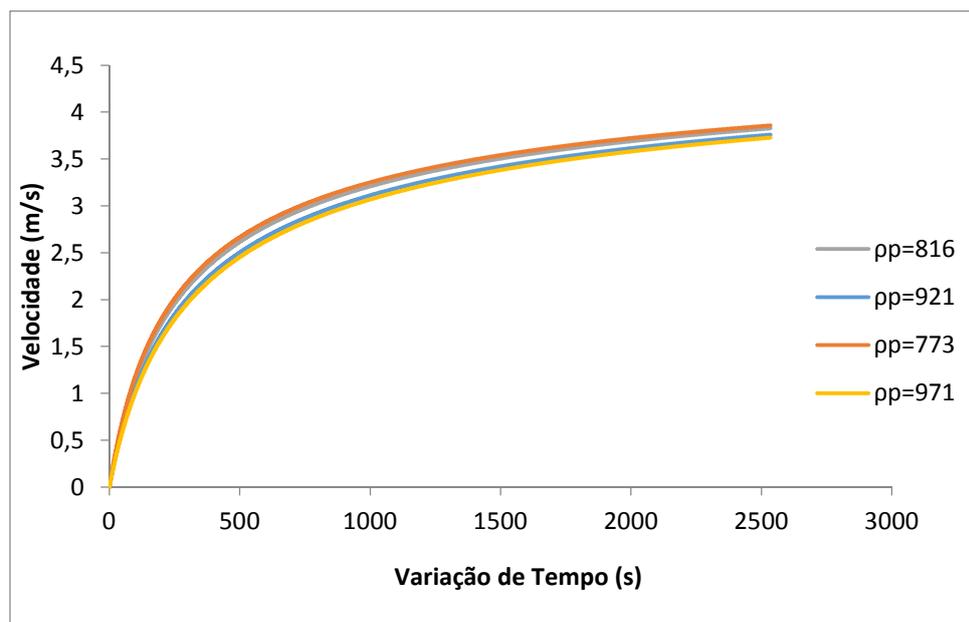


Gráfico 1: Apresenta o gráfico de comparação das velocidades das partículas em função do tempo para as densidades.

No gráfico (2), foram feitas simulações com três tipos diferentes de coeficiente de arraste, tais como: (3, 3,5 e 4), usando como referência o cenário da fase dispersa do óleo do Campo de Espadarte na Bacia de Campos.

Entretanto, a simulação foi realizada com apenas um tipo de óleo, já que, os parâmetros de velocidade e tempo seriam proporcionais aos demais tipos de óleo utilizados nesse trabalho.

O gráfico (2), demonstra que, quanto maior for o coeficiente de arraste, maior são as velocidades atingidas em relação ao tempo. Embora isso, só se aplique na fase de curva do gráfico (etapa que representa a gota da fase dispersa em direção ao centro do hidrociclone em meio a fase contínua). Pois, essa variação acontecerá somente na fase curva do gráfico, já que, depois da curva, as velocidades tendem a se estabilizar e, convergirem ao um ponto comum. Sendo este, no centro do hidrociclone onde as velocidades permanecem constantes e não sofrendo influência pela variação de tempo.

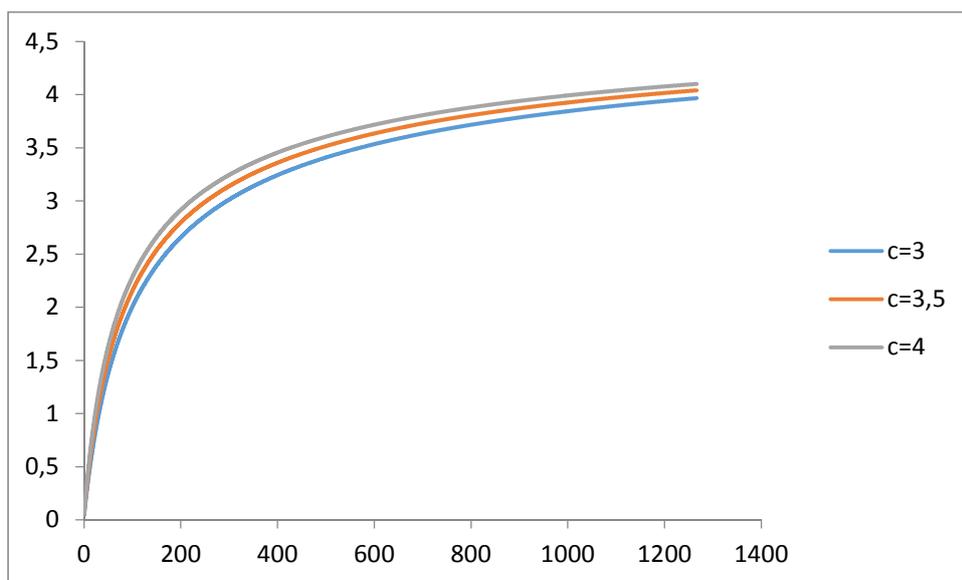


Gráfico 2: mostra as diferenças de velocidades para cada linha de coeficiente de arraste, para o óleo do campo espadarte da bacia de campos.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram afetados pela diferença de densidade. A comparação entre os quatro tipos de óleo utilizado mostrou que ao longo do tempo o petróleo da bacia Camarupim apresentou uma maior velocidade de separação, ou seja, quanto maior o grau API

maior será a velocidade de separação, logo, quanto maior o grau °API menor será a densidade. Visto que, ambas são inversamente proporcionais.

Uma vez que, uma menor densidade ocasiona um maior diferencial de densidade entre, a fase contínua e fase dispersa, sendo esse, um dos principais parâmetros utilizados para se obter uma maior velocidade de separação.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. C., JUNIOR, J. A. A. O., MEDRONHO, R. A. **Simulação Numérica da Separação Água/Óleo em Hidrociclone para baixas frações de óleo.** 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

ALVES, J. V. B. **Hidrociclone para a Separação do óleo Residual de água em Refinarias.** Dissertação de obtenção de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

DESPACHO DA DIRETORA-GERAL Nº 376/2013 - DOU 18.4.2013 – ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) 29 de agosto de 2000 Portaria ANP nº206, de 17/04/ 2013. Disponível em:

<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/despachos/2013/abril/desp%20376%20-%202013.xml> Acesso em 03/11/2014.

FREITAS, A. G. B. **Modelagem e Simulação do tratamento de Água Oleosa usando Hidrociclones.** Dissertação de obtenção de Título de Mestre. São Cristóvão(SE): Universidade Federal de Sergipe, 2009.

MELO, F. R. G. **Fluidodinâmica de Esferas Leves e Bolhas em Líquidos.** Dissertação de obtenção de Título de Doutor. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

OLIVEIRA, D. S. T. de. Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural. **Simulação Numérica de um Hidrociclone para Separação de Esferas Ocas de Lama de Perfuração.** Dissertação de obtenção de Grau em Engenharia Química. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

QUEIROZ, F. V de. **Simulação Numérica de Hidrociclones para a Separação de Misturas de Alto Teor de Água em Óleo como Fase Contínua.** Dissertação de obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

REGO, F. C de A. **Estudo do Hidrociclone Cilíndrico de uma Unidade de Flotação Centrífuga com Auxílio de Fluidodinâmica Computacional.** Dissertação de obtenção de título de Mestre em Engenharia Química. Rio de Janeiro: Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, G. R da. **Estudo de Numérico de Movimentação de Partículas em Escoamentos.** Dissertação de obtenção de título de Mestre em Engenharia. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

THOMAS, G. B. Jr. Finney, Ross L. (1996), **Calculus and Analytic Geometry** (9th ed.), Addison Wesley.