

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Comportamento fluidodinâmico da água de produção utilizando técnicas de CFD e dados experimentais

AUTORES:

Raniel Deivisson de Alcantara Albuquerque, José Luis Gomes Marinho, Leonardo Mendonça Tenório de Magalhães Oliveira

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Alagoas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

COMPORTAMENTO FLUIDODIÂMICO DA ÁGUA DE PRODUÇÃO UTILIZANDO TÉCNICAS DE CFD E DADOS EXPERIMENTAIS

Abstract

Environmental laws among the world are becoming tougher in the last decades, directly affecting the oil industry, mainly in offshore operations, which generate a large amount of produced water. Hence, the rate of oil allowed in discharged water is decreasing constantly, which makes companies research new methods to treat the produced water. And, among the methods and equipments used in oil / water separation, bed coalescer studies remains a challenge. So, a study was conducted to analyze the fluids behavior in a bed coalescer, through a computational fluid dynamics model constructed with the CFX 13.0. The oil concentration in the equipment with time, pressure drop and velocity profiles were studied, describing successfully the coalescence phenomena.

Introdução

Atualmente, as normas ambientais vêm se tornando cada vez mais duras, de forma que a indústria petrolífera é uma das mais monitoradas, principalmente no ambiente offshore. A água de produção de petróleo é um dos subprodutos que merecem grande atenção, pois é um efluente com alta concentração de sólidos, sais e óleo (Iggunu et al., 2012). A concentração de óleo aceitável na água à ser descartada diariamente no Brasil vem diminuindo gradativamente. Como exemplo, têm-se que, em 2007 a concentração máxima de óleo permitida era de 29 mg/L (CONAMA, 2007). Já na Resolução nº 430 do CONAMA, resolução mais recente, o lançamento permitido foi reduzido à 20 mg/L (CONAMA, 2011).

Desta forma, com esse aumento na restrição, a indústria petrolífera tem buscado formas mais eficientes para realizar a separação do óleo em emulsão na água. Visto que tratamentos mais simples, como os gravitacionais, apenas são efetivos para separar gotículas de óleo com diâmetro acima de 100 μm (Speth et al., 2002). Portanto, outros métodos são utilizados para casos com presença de gotículas com diâmetro menor, sendo um destes os coalescedores em leito.

Os coalescedores em leito, mesmo após décadas de análise, são um desafio para os estudiosos na área, pois, devido à grande quantidade de variáveis envolvidas no processo, não se pôde formular um modelo matemático genérico que descreva o funcionamento deste equipamento, fazendo com que ainda haja muito a que se estudar em torno do fenômeno de coalescência de partículas e variáveis operacionais (Sokolović et al., 2007). Nota-se que, a maior parte das análises são experimentais, havendo uma séria carência de estudos através da modelagem computacional, motivando a realização desta pesquisa (Sokolović et al., 2014).

Dentre as formas de se estudar um coalescedor em leito, a modelagem computacional tem algumas vantagens, como o baixo custo operacional, a rápida solução de problemas e a capacidade de alterar facilmente parâmetros para analisar impactos de interesse (Hilgenstock et al., 1996), e nesse cenário a fluidodinâmica computacional aparece como ferramenta de desenvolvimento de modelos envolvendo fluidos e suas interações com os diferentes meios.

Então, neste trabalho busca-se analisar o comportamento fluidodinâmico da água de produção no interior de um coalescedor em leito, através do aplicativo Ansys CFX® 13.0, analisando propriedades como queda de pressão, zonas de concentração de óleo no equipamento e perfis de velocidade, a fim de construir um modelo que represente satisfatoriamente o fenômeno de coalescência, realizando a validação dos resultados obtidos através da comparação com estudos experimentais.

Metodologia

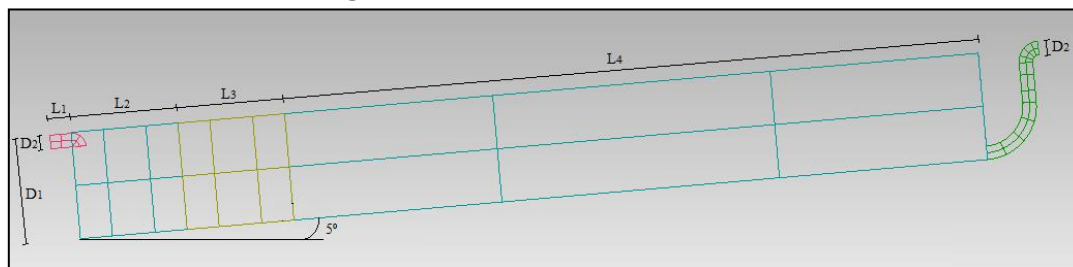
A realização do presente estudo foi dividida em quatro etapas, com o auxílio do aplicativo Ansys CFX 13.0: Construção da geometria e da malha numérica através do Icem CFD; inserção das

características físicas dos componentes do sistema e das equações que regem o modelo através do CFX-Pre; resolução das equações através do CFX-Solver; análise dos resultados através do CFX-Post.

Geração da malha numérica

A geometria do coalescedor está representada na Figura 1 e as dimensões apresentadas nela estão dispostas na Tabela 1. Onde D_1 é o diâmetro externo do coalescedor e D_2 é o diâmetro da entrada e da saída.

Figura 1 - Geometria do coalescedor em leito.



Fonte: elaborada pelo autor

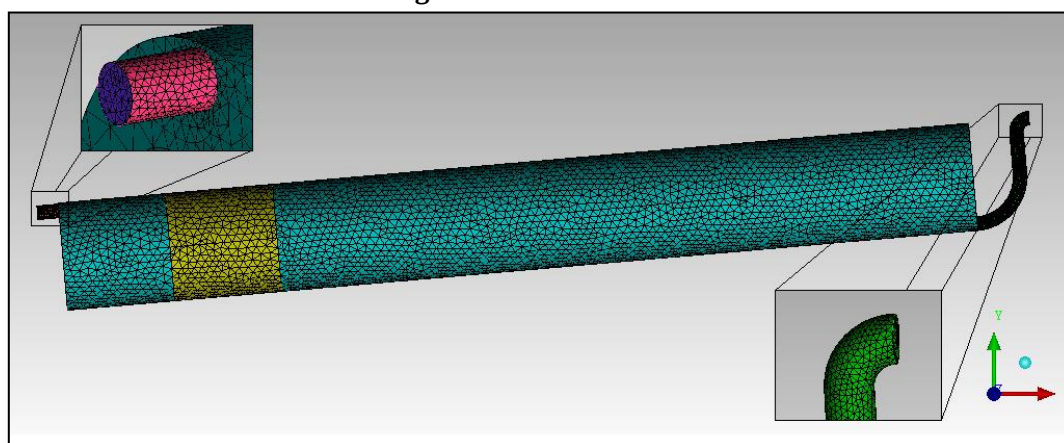
Tabela 1 – Comprimentos do aparato

D_1	D_2	L_1	L_2	L_3	L_4
10 cm	1,27 cm	2 cm	10 cm	10 cm	65 cm

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base na geometria da Figura 1, foi gerada uma malha numérica com 150826 elementos e 27 mil nós, podendo ser observada na Figura 2. As partes que necessitam de menos detalhes, como o leito (região amarela) e a tubulação (região azul) possuem uma menor quantidade de elementos por área, já as que necessitam de uma maior atenção, como a entrada (região cor rosa) e a saída (região verde) possuem uma maior densidade de elementos. O modelo é constituído por dois domínios: um poroso (parte de cor amarela) e o domínio fluido (todo a geometria excluindo-se a parte do leito coalescedor).

Figura 2 – Malha numérica.



Fonte: Elaborada pelo autor

Caracterização física do problema

A mistura óleo-água consiste numa fase contínua, a água, e uma dispersa, o óleo. De forma que para modelar a fase dispersa foram utilizados 5 diâmetros médios de partículas, variando de 18-23 μ m.

Para a caracterização física da água foi utilizado o modelo presente na biblioteca do CFX® 13.0, com densidade de 997kg/m³ à 25°C. Já características do óleo e do leito estão dispostas na Tabela 1 e na Tabela 2, respectivamente.

Tabela 1 – Características do óleo.

Densidade	844,73 kg/m ³
Massa molecular média	349g/mol
Viscosidade	21,73 mPa.s
Tensão interfacial	18,04 mN/m

Fonte: Sokolovic et al., 2003

Tabela 2 – Características do leito.

Porosidade	96%
Permeabilidade	0,0055 mm ²

Fonte: Sokolovic et al., 2003

As simulações foram realizadas no regime transiente com uma vazão de entrada constante de 60 L/h, sendo efetuadas três simulações com 500, 1000 e 1500 ppm de óleo em água. Demais dados do estudo dos casos estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Estudo de caso.

Caso	Concentração de óleo	Tempo total de simulação	Passos de tempo	Tolerância RMS
1	500 ppm	1 h	10s	10 ⁻⁶
2	1000 ppm	1 h	10s	10 ⁻⁶
3	1500 ppm	1 h	10s	10 ⁻⁶

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a realização da modelagem numérica utilizou-se uma abordagem euleriana-euleriana, com um escoamento multifásico heterogêneo, assumindo-se que o problema é isotérmico, sem transferência de massa entre os fluidos, sem a ocorrência de reações químicas e que as características dos fluidos são constantes. Porém, outros fatores que podem exercer uma grande influência nos resultados como o tipo de fluxo, sendo este incompressível, ação de forças de arrasto e efeitos gravitacionais foram considerados.

Para a modelagem, foram utilizadas as equações de conservação de massa e momento, já a equação de conservação de energia foi desprezada por se tratar de uma análise isotérmica. Devido a presença de dois domínios no sistema, um fluido e outro poroso, foram discretizadas equações para cada cenário.

Equacionamento do domínio fluido

A equação da conservação de massa para o domínio fluido é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

Onde $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ é a variação de massa e $\nabla \cdot (\rho \mathbf{U})$ representa os fluxos de entrada e saída no volume de controle, onde ρ é a densidade do fluido e $\mathbf{U}$ é o vetor velocidade do escoamento. Já para a conservação de quantidade de movimento utilizou-se a equação (2). (ANSYS, 2010)

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

De forma que ' S_M ' representa a transferência de momento entre as fases, ' p ' é a pressão numa das fases e ' τ ' está associado as taxas de tensões no sistema, sendo sua forma completa expressa na seguinte equação:

$$\tau = \mu[(\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U}] \quad (3)$$

Equacionamento do domínio poroso

Para a discretização do domínio poroso é necessário realizar outra abordagem, na qual é feita uma relação entre as equações de Navier-Stokes e a lei de Darcy, resultando nas equações de conservação de massa, momento e energia, na qual a equação (4) representa a conservação de massa.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}) = 0 \quad (4)$$

Onde γ e K são respectivamente, a porosidade no volume e a permeabilidade do meio poroso, se fazendo necessário salientar que a permeabilidade é considerada como isotrópica. (ANSYS, 2010)

Para a conservação de momento, a equação é dada por:

$$\frac{\partial(\gamma \rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{K} \cdot \mathbf{U}) \otimes \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_e \mathbf{K}(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U})) = -\gamma \nabla p + \gamma S_M \quad (5)$$

Em que, μ_e é a viscosidade efetiva e S_M é a fonte de momento, que sintetiza algumas forças que foram consideradas no problema, como o empuxo, que é mensurado através da diferença de densidade, e o coeficiente de arrasto, equação (6), a qual foi modelada através do modelo de Ishii-Zuber (ANSYS, 2010), onde N_{Re_m} é o número de Reynolds para uma única partícula.

$$C_D = \frac{24}{N_{Re_m}} (1 + 0.15 N_{Re_m}^{0.687}) \quad (6)$$

O modelo de turbulência k- ϵ foi utilizado no problema, este modelo é bastante utilizado em modelagens computacionais, pois oferece um bom resultado numérico com um baixo custo computacional. Este consiste na junção de duas equações, de forma que uma equação representa a energia cinética turbulenta (k), tendo por objetivo descrever a mudança nas variações de velocidade, e a outra representa a turbulência na dissipação das variações de velocidade (ϵ). (ANSYS, 2010)

Por fim, para representar o fenômeno de coalescência, foi utilizado o modelo de Prince e Blanch, que assume que a coalescência ocorre através do seguinte processo: As bolhas colidem, ficando uma pequena porção de líquido entre elas, esta camada então começa a se reduzir até haver um pequeno filme separando as bolhas, então, esse filme se rompe, havendo a junção das bolhas. Desta forma, a modelagem numérica deste fenômeno é realizada através da análise da taxa de coalescência, Q , entre duas bolhas, definida pela equação (8).

$$Q(m_i; m_j) = (\theta_{ij}^T + \theta_{ij}^B + \theta_{ij}^S) e^{-t_{ij}/\tau_{ij}} \quad (8)$$

De modo que m_i e m_j são as bolhas em análise, θ_{ij}^T , θ_{ij}^B e θ_{ij}^S representam as frequências que influenciam no choque entre as bolhas, sendo essas, respectivamente, frequência de interações gerada

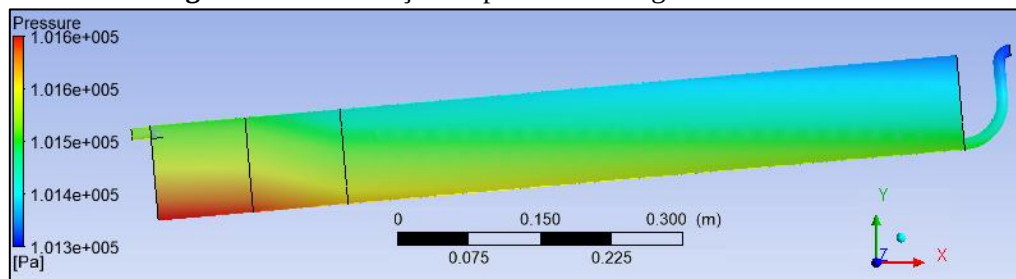
pela flutuação da velocidade turbulenta, frequência gerada pelo empuxo e frequência de colisões transversais entre as bolhas (Prince et al., 1990). Já t_{ij} e τ_{ij} são o tempo necessário para ocorrer a coalescência e o tempo real de contato entre as bolhas (ANSYS, 2010).

Resultados e Discussão

Foram realizadas três simulações com diferentes concentrações de óleo. Nas quais deseja-se observar se o fenômeno da coalescência é descrito pela modelagem, sem a preocupação de realizar a retirada do óleo, o que é evidenciado pela geometria do equipamento, sem um local à parte para a saída do óleo. Ao analisar os resultados observou-se que o comportamento fluidodinâmico para os três casos foi igual: O fluido é inserido pela entrada do equipamento, fluindo em direção ao leito coalescedor, ao se chocarem nas fibras do leito, as gotículas dispersas de óleo se agrupam, aumentam seu diâmetro e se acumulam no topo do equipamento. Dessa forma, os resultados aqui apresentados refletem as configurações nos três casos.

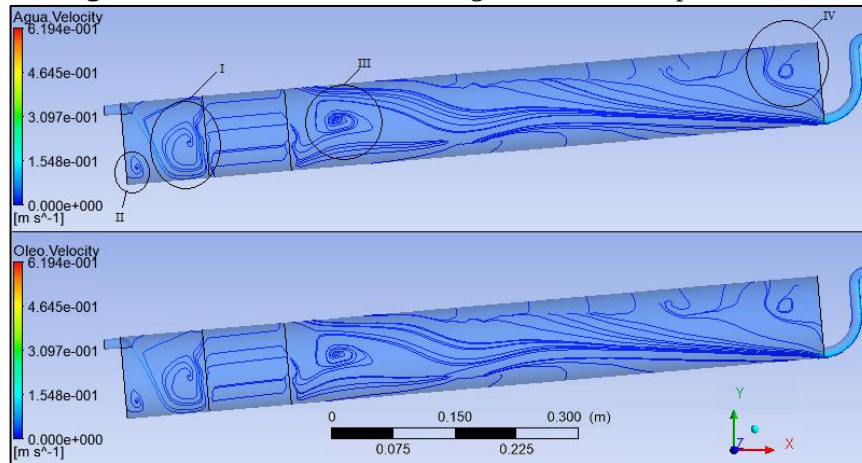
A distribuição de pressão no equipamento está disposta na Figura 3, nela pode-se observar que a pressão varia linearmente no aparato, havendo uma acentuação na queda de pressão na região do leito poroso. A pressão também está relacionada à turbulência no equipamento, de forma que nas zonas com menor pressão há uma menor turbulência, isto se dá pela maior velocidade nessas regiões, o que é explicado pela equação de Bernoulli. Da mesma forma, a alta pressão na região inferior à entrada do duto é explicada pela alta velocidade de injeção dos fluidos, condizendo com o efeito de turbulência nessa região, e, a partir da variação de pressão que existe, há a ocorrência da formação de vórtices (Figura 4). Este comportamento foi mantido constante ao se atingir o regime permanente.

Figura 3 – Distribuição de pressão ao longo do coalescedor em leito.



Fonte: Elaborada pelo autor

As linhas de corrente da água podem ser observadas na Figura 4, nela podem ser vistas turbulências no escoamento. Na região circulada I observa-se um vórtice gerado pela alta taxa de velocidade na entrada do equipamento, que ocasiona o surgimento de uma zona de alta pressão na região inferior e uma de baixa pressão na região superior, além de uma zona de recirculação no canto do equipamento, formando o vórtice observado na região circulada II. Já na III há uma zona de recirculação ocasionada pela maior velocidade nas paredes do equipamento, de forma que no centro haja uma menor pressão, propiciando a criação do vórtice, isto pode causar uma redispersão do óleo na água (Speeth et al., 2002). Por fim, a turbulência na região IV é ocasionada pelo contraste entre a zona de baixa pressão no topo do equipamento e entre a parte inferior na qual há uma maior velocidade graças à saída. As linhas de corrente do óleo podem ser observadas na parte (b), de forma que o comportamento dos vórtices descrito para as linhas de corrente da água também se aplicam às do óleo, com diferença que no segundo caso há concentração de linhas de corrente na parte superior do coalescedor, evidenciando o acúmulo de óleo na região mais elevada.

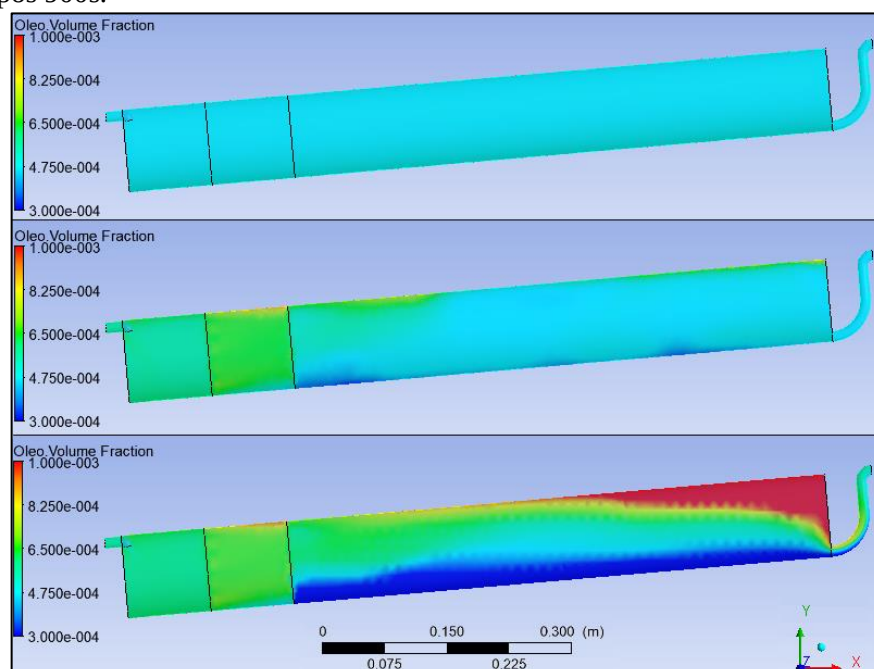
Figura 4 – Linhas de corrente da água e do óleo, respectivamente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A turbulência evidenciada pelas linhas de corrente não é desejável, podendo reduzir as taxas de separação do equipamento, aumentando a estabilidade das emulsões (Maiti et al., 2011). Este comportamento poderia ser evitado através da diminuição da velocidade do fluido na entrada do leito coalescedor.

A Figura 5 representa a concentração de óleo no equipamento em três momentos distintos, nos quais deseja-se observar o efeito de coalescência. Na parte (a) pode-se observar a concentração ao se iniciar o processo (0 s), nesse momento a mistura encontra-se em sua concentração inicial, o que é evidenciado pela mesma coloração em todo o equipamento. Já na parte (b), após 120s há um acúmulo de óleo no leito, de forma que, após atingirem um determinado diâmetro, as gotas de óleo começam a coalescer e se dirigir para a parte superior do equipamento, devido à diferença de densidade entre os líquidos. E, por fim, na parte (c), após 15 minutos (900s), o equipamento atingiu características de um regime permanente, com o óleo tendo migrado para a região mais alta do equipamento. Esse comportamento condiz com o descrito por Speeth et al. (2002).

Figura 5 – Concentração de óleo no equipamento com o passar do tempo, partes (a), (b) e (c), respectivamente. (a) concentração no início do processo, 0s. (b) Concentração após 120s. (c) concentração após 900s.



Fonte: elaborada pelo autor

Conclusões

Através da análise dos resultados verificou-se que o comportamento fluidodinâmico obtido nas simulações condiz com os dados encontrados na literatura. O modelo obtido está apto a descrever o funcionamento de um coalescedor em leito. Entretanto, valores numéricos como valor da queda de pressão e taxa de separação de óleo não puderam ser comparados, pois esses resultados variam com a geometria do equipamento, porosidade e permeabilidade do leito, impedindo a comparação com dados existentes na literatura. Estudos adicionais aliando análises numéricas e experimentais se fazem necessários para descrever essas características.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio financeiro recebido.

Referências Bibliográficas

Igunnu, E. T., Pfennig, A., Chen, G. Z., **Produced water treatment technologies**, International Journal of Low-Carbon Technologies, 9, p. 157-177, 2014.

BRASIL, Resolução CONAMA nº393, de 09 de agosto de 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. Publicado no D.O.U. de 09 de agosto de 2007.

BRASIL, Resolução CONAMA nº430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Publicado no D.O.U. de 16 de maio de 2011.

Sokolovic, R. M. S., Govedarica, D. D., Sokolovic, D. S., **Selection of Filter Media for Steady-State Bed Coalescers**, Ind. Eng. Chem. Res., 53, p. 2484-2490, 2014.

Hilgenstock, A., Ernst, R., **Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics - CFD vs experiments?**, Flow Meas. instrumentation., 7, p. 161-171, 1996.

Speth, H., Pfennig, A., Chatterjee, M., Franken, H., **Coalescence of secondary dispersions in fiber beds**, Separation and Purification Technology, 29, p. 113-119, 2002.

Sokolovic, R. M. S., Vulic, T. J., Sokolovic, S. M., Neducin, R. P. M., **Effect of Fibrous Bed Permeability on Steady-State Coalescence**, Ind. Eng. Chem. Res., 42, p. 3098-3102, 2003.

Sokolovic, R. M. S., Vulic, T. J., Sokolovic, S. M., **Effect of bed length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion**, Separation and Purification Technology., 56, p. 79-84, 2007.

Prince, M. J., Blanch, H. W., **Bubble Coalescence and Break-up in Air-Sparged Bubble Columns**, AIChE Journal, 36, p. 1485-1499, 1990.

ANSYS INC. **ANSYS CFX-Pre Theory Guide**, Release 13.0, Novembro, 2010.

Maiti, S., Mishra, I. M., Bhatthacharya, S. D., Joshi, J. K., **Removal of oil from oil-in-water emulsion using a packed bed of comercial resin**, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 398, p. 291-298, 2011.