

Estudo numérico do processo de tratamento de água oleosa via membrana cerâmica proveniente da indústria petroquímica

Numerical study of the process of oily water treatment via ceramic membrane from the petrochemical industry

DOI:10.34117/bjdv7n4-455

Recebimento dos originais: 07/03/2021

Aceitação para publicação: 01/04/2021

Helton Gomes Alves

Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande
Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus universitário Lagoa Nova - CEP 59078-970
e-mail: helton.02@hotmail.com

Hortência Luma Fernandes Magalhães

Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande
Instituição: Universidade Federal de Campina Grande
Rua José Marinho Falcão, 105 - bloco i - AP 104 – bodocongó - Campina Grande
e-mail: hortencia.luma@gmail.com

Veruska do Nascimento Simões

Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande
Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus universitário Lagoa Nova - CEP 59078-970
e-mail: veruskasimoes@hotmail.com

Wanessa Raphaella Gomes dos Santos

Doutora em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande
Instituição: Universidade Federal da Paraíba
Rua quimera, quadra D3, número 19 - Ouro Preto – Olinda
e-mail: wanessa.raphaella@yahoo.com.br

Danielle Alves Ribeiro da Silva

Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus universitário Lagoa Nova - CEP 59078-970
e-mail: danokalves@hotmail.com

Antônio Gilson Barbosa de Lima

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de Campinas
Instituição: Universidade Federal de Campina Grande
Rua Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58428-830
e-mail: antonio.gilson@ufcg.edu.br

Severino Rodrigues de Farias Neto

Doutor em Engenharia de processos pela Universidade de Nantes
Instituição: Universidade Federal de Campina Grande
Rua Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58428-830
e-mail: s.fariasn@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo aplicar a fluidodinâmica computacional no processo de separação água/óleo através de um dispositivo do tipo duplo tubo de 22,1cm de comprimento, sendo o tubo externo o meio poroso (membrana cerâmica) de espessura de 3,5cm, que funciona como barreira a passagem das gotículas de óleo e o tubo interno impermeável. As simulações foram realizadas utilizando o pacote comercial Ansys CFX 12.0 adotando-se o modelo de partículas para descrever o escoamento da fase contínua (água) e da fase dispersa (óleo), utilizando uma malha numérica estruturada formada por 87403 elementos hexaédricos. O modelo matemático definido para descrever o processo de separação água/óleo com auxílio de um meio poroso é baseado na generalização das equações (Navier-Stokes) de conservação de massa e quantidade de movimento adotando a abordagem Euleriana-Euleriana, auxiliado ao modelo de turbulência RNG k- ϵ padrão. Através dos campos de fração volumétrica, campos de pressão e velocidade superficial da água sobre os planos longitudinal e transversal pôde-se concluir que a modelagem matemática proposta foi capaz de prever os fenômenos físicos envolvidos do processo em estudo.

Palavras-Chave: Separação água/óleo; Membranas cerâmicas; Simulação; CFX.

ABSTRACT

This paper aims to apply computational fluid dynamics in the process of water/oil separation through a double tube device of 22.1cm length, being the outer tube the porous medium (ceramic membrane) of 3.5cm thickness, which acts as a barrier to the passage of oil droplets and the inner tube impermeable. The simulations were performed using the commercial package Ansys CFX 12.0, adopting the particle model to describe the flow of the continuous phase (water) and disperse phase (oil), using a structured numerical mesh formed by 87403 hexahedral elements. The mathematical model defined to describe the water/oil separation process with the aid of a porous medium is based on the generalization of the (Navier-Stokes) equations of mass and momentum conservation adopting the Eulerian-Eulerian approach, aided to the standard RNG k- ϵ turbulence model. Through the volume fraction fields, pressure fields and water surface velocity over the longitudinal and transverse planes it could be concluded that the proposed mathematical modeling was able to predict the physical phenomena involved in the process under study.

Keywords: Water/Oil Separation; Ceramic Membranes; Simulation; CFX.

1 INTRODUÇÃO

Durante o processo de produção de petróleo ocorre geralmente a produção simultânea de óleo, água, gás e areia. Inicialmente a separação líquido-gasosa é realizada

através de separadores bifásico-trifásicos em série. A corrente de gás dependendo da quantidade segue para uma UPGN (Unidade de Processamento de Gás natural) ou pode ser queimado devido à inviabilidade econômica de tratamento. O óleo na saída do tanque de lavagem está misturado com água na forma de gotículas dispersas, segue para tratadores eletrostáticos para retirada da água e outros contaminantes (SILVEIRA, 2006). E a água oleosa segue para unidade de tratamento para ser reutilizada ou descartada. Nesta etapa utilizam-se flotores, hidrociclones, membranas, dentre outros.

Os processos de separação por membranas vêm se destacando por ocorrerem, normalmente, sem que haja mudança de fase, economizando energia, e as propriedades das membranas podem ser ajustadas de acordo com a aplicação em questão (THOMAS *et al.*, 2001). Durante o processo de separação as membranas dividem os componentes das suspensões baseando-se no tamanho, carga, forma e interações moleculares entre soluto e sua superfície. Nesses processos, uma corrente de alimentação é fracionada em duas, o concentrado, corrente que contém os contaminantes inicialmente presentes na corrente de alimentação, e o permeado, fração de líquido que passou através da membrana.

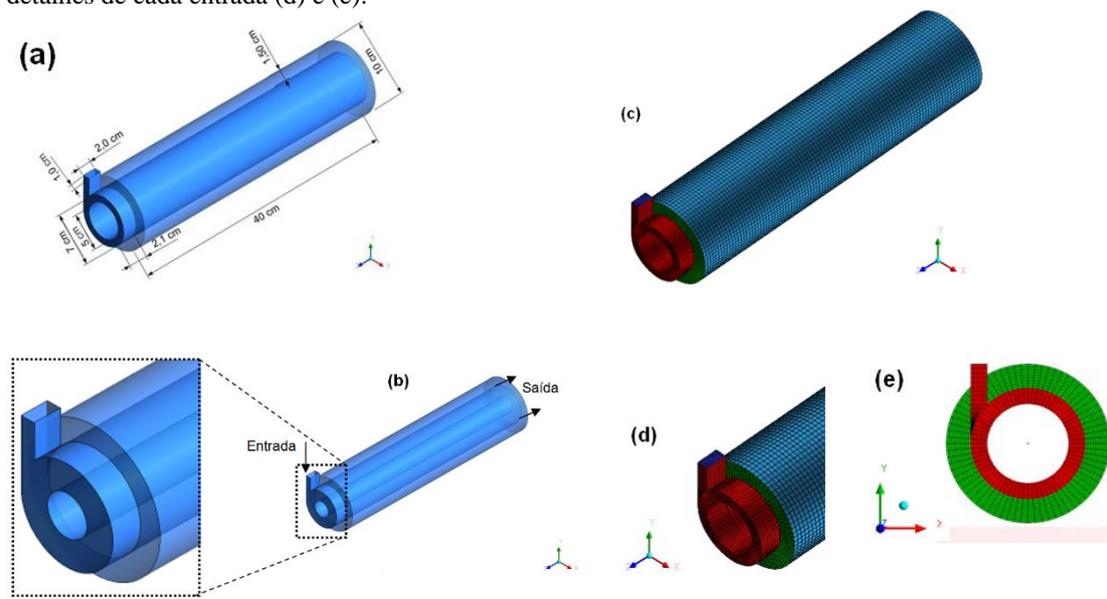
Baseado no exposto, o presente trabalho é motivado pela crescente importância dos processos de separação usando membranas, em especial as cerâmicas (classe especial das membranas) e pelo fato de que a maioria dos trabalhos reportados na literatura empregam membranas poliméricas, tanto experimentais como numéricas, tem como objetivo avaliar numericamente o processo de separação água/óleo utilizando um módulo do tipo duplo tubo com uma entrada e uma saída tangencial, sendo o tubo externo uma membrana cerâmica.

2 METODOLOGIA

O domínio de estudo corresponde a um módulo do tipo duplo tubo, sendo o tubo externo o meio poroso (membrana cerâmica) de espessura de 3,5 cm, que funciona como barreira a passagem das gotículas de óleo e o tubo interno impermeável. O fluido é injetado tangencialmente por um duto retangular situado na base do módulo de separação de 2 cm² de área de seção transversal e, em seguida, passa pelo espaço anular entre os dois tubos do módulo de separação. Na Figura 1.a está representada a geometria do domínio de estudo e suas respectivas dimensões. Foi utilizado o ICEM CFD para criar o domínio de estudo a partir de criação de pontos, curvas e superfície que delimitam e compõem as dimensões do módulo. A malha estruturada foi confeccionada utilizando a

estratégia de bloqueio predefinida empregando elementos hexaédricos. Na Figura 1.c encontra-se a malha utilizada para realizar as simulações, obtida após diferentes refinamentos foi obtida uma malha estruturada formada por 87403 elementos hexaédricos.

Figura 1 – Representação do módulo de separação munido com uma membrana cerâmica (a) e Detalhes da entrada (b). Representação da malha numérica do módulo de separação em estudo (c), bem como os detalhes de cada entrada (d) e (e).



O modelo matemático definido para descrever o processo de separação água/óleo com auxílio de um meio poroso é baseado na generalização das equações (Navier-Stokes) de conservação de massa e quantidade de movimento adotando a abordagem Euleriana-Euleriana, bem como o modelo de turbulência RNG $k-\epsilon$ (Neto et al., 2019; Fernandes et al., 2020). Foram adotadas as seguintes considerações: Fluido Newtoniano incompressível e com propriedades físicas e químicas constantes; Regime permanente; Escoamento isotérmico; A reação química, transferência de massa entre as fases e fonte de massas são desconsiderados; As forças interfaciais de arraste foram consideradas; As gotículas de óleo (0,010 mm de diâmetro) são consideradas esféricas e não deformam; O modelo matemático não prediz o fenômeno de retenção das partículas ou das moléculas em um meio poroso, contudo considera a dificuldade ou a resistência à passagem das fases (óleo e água) em meios porosos.

Com base nessas considerações as equações de conservação da massa e momento linear podem ser escritas como:

- Equação de conservação da massa:

- Para o fluido

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (1)$$

onde α representa a fase (água ou óleo), f , ρ e \vec{U}_α são respectivamente a fração volumétrica, densidade e o vetor velocidade (U, V e W).

- Para o meio poroso

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha K \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (2)$$

onde t é o tempo, ϕ é a porosidade volumétrica e $K = (K^{ij})$ é um tensor simétrico de segunda ordem, chamado de tensor permeabilidade..

- Equação de transferência de momento linear para as fases fluidas

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla \vec{p}_\alpha + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_e \left[\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] \right\} + S_{M_\alpha} + \vec{M}_\alpha \quad (3)$$

onde p é a pressão, S_{M_α} representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume, \vec{M}_α descreve a força total por unidade de volume sobre a fase α devido à interação com a fase β definido por:

$$M_\alpha = M_{\alpha\beta}^D = \frac{3C_D}{4d_p} f_\beta \rho_\alpha |\vec{U}_\alpha - \vec{U}_\beta| \cdot (\vec{U}_\alpha - \vec{U}_\beta) \quad (4)$$

onde d_p é o diâmetro da partícula e C_D é o coeficiente de arraste, o qual foi assumido igual a 0,44.

- Equação de Transferência de momento linear para o meio poroso

A equação de conservação de momento linear para meios porosos é definida pela equação:

$$\nabla \cdot [f_\alpha \rho_\alpha (K \cdot \vec{U}) \otimes \vec{U}] = -\nabla \vec{p} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_e K \cdot \left[\nabla U + (\nabla \vec{U}_i)^T \right] \right\} + S_i^M \quad (5)$$

onde μ_e é a viscosidade efetiva definida pela equação (3.6) e S_i^M representa a fonte de quantidade de movimento linear dada pela equação (3.7):

$$\mu_e = \mu_\alpha + \mu_t \quad (6)$$

onde μ_α é a viscosidade dinâmica e μ_t viscosidade turbulenta (Equação 15).

No ANSYS CFX 12.1 a fonte de quantidade de movimento linear é representada por:

$$S_i^M = -C^{R_1}U_i - C^{R_2}|\vec{U}|\vec{U}_i + S_i^{spec} \quad (7)$$

onde C^{R_1} é o coeficiente linear de resistência, C^{R_2} é o coeficiente de resistência quadrático, S_i^{spec} outras fontes de quantidade de movimento relacionadas com as espécies químicas presentes e U e U_i são velocidades superficiais.

Sendo assim, a lei de Darcy passa a ser generalizada por:

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\mu}{k}U_i + k_{loss}\rho|\vec{U}|\vec{U}_i \quad (8)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica, k_{loss} é o coeficiente empírico de perda (no *default* do código comercial ANSYS CFX, $k_{loss} = 0$) e $\frac{\mu}{k}$ não pode ser zero.

Comparando as equações (1) e (2) e utilizando as velocidades reais ao invés das velocidades superficiais, os coeficientes C^{R_1} e C^{R_2} são expressos por:

$$C^{R_1} = \frac{\mu}{\phi k} \quad (9)$$

$$C^{R_2} = \frac{k_{loss}\rho}{\phi^2} \quad (10)$$

Com a utilização das velocidades superficiais os coeficientes C^{R_1} e C^{R_2} passam a ser definidos por:

$$C^{R_1} = \frac{\mu}{k} \quad (11)$$

$$C^{R_2} = k_{loss} \rho \quad (12)$$

- **Modelo de turbulência (RNG □□□□□)**

As equações de transporte para se estimar as variáveis, κ , energia cinética turbulenta (dimensões L^2T^{-2}) e, ε , taxa de dissipação turbulenta (dimensões L^2T^{-2}) são dadas por:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_j k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{kRNG}} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_j \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon) \quad (14)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica e μ_t é a viscosidade turbulenta, que é dada por:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

onde C_μ é uma constante empírica, e os valores das constantes são dadas por:

$$C_\mu = \sigma_{\varepsilon RNG} = \sigma_{\kappa RNG} = 0.7179 \quad (16)$$

$$C_{\varepsilon 2 RNG} = 1.68 \quad (17)$$

$$C_{\varepsilon 1 RNG} = 1.42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4.38} \right)}{1 + \eta^3 \beta_{RNG}} \quad (18)$$

sendo,

$$\eta = \sqrt{\frac{P_{\kappa}}{\rho \varepsilon C_{\mu RNG}}} \quad (19)$$

Na Equação (3.19), $C_{\mu RNG}$ é a constante de turbulência do modelo RNG, sendo igual a 0,085 (ANSYS CFX 12.1), P_{κ} é a produção de turbulência devido à viscosidade e às forças de empuxo ou produção de cisalhamento, definido:

$$P_{\kappa} = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U)^T + P_{\kappa B} \quad (20)$$

onde o termo $P_{\kappa B}$ é a produção de empuxo e é modelada pela equação (21):

$$P_{\kappa B} = -\frac{\mu_t}{\sigma \rho_p} g \nabla \rho \quad (21)$$

onde, σ_p é uma constante igual a 1.

Para complementar a modelagem matemática foram previamente definidas algumas condições de contorno que podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas da membrana e dos fluidos

| Fronteira | Tipo | Condição de contorno |
|----------------------------|---------------|---|
| Filtrado | <i>Outlet</i> | $P = 99000 \text{ Pa}; \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$ |
| Parede interna da membrana | <i>Wall</i> | $U_x = U_y = U_z = 0$ |
| Paredes do dispositivo | <i>Wall</i> | $U_x = U_y = U_z = 0$ |
| Saída | <i>Outlet</i> | $\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$ |

As propriedades da água e do óleo, bem como do meio poroso utilizadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas e químicas da membrana e dos fluidos

| | Propriedade | Valor |
|-------------------|--------------------------------|------------------------|
| Água | Densidade (kg/m ³) | 997,700 |
| | Viscosidade (Pa/s) | 8,889x10 ⁻⁴ |
| Óleo | Densidade (kg/m ³) | 0,917 |
| | Viscosidade (Pa/s) | 0,985 |
| Membrana cerâmica | Porosidade | 0,4403 |
| | Permeabilidade | 2,29x10 ⁻¹⁰ |

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

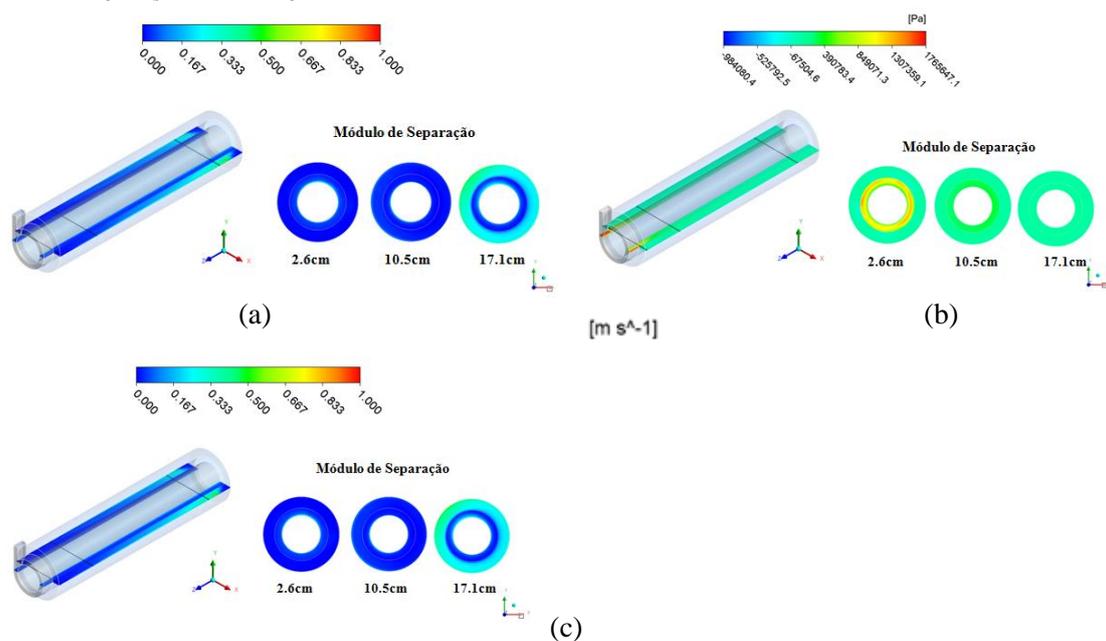
Foi realizada uma análise qualitativa sobre os campos de fração volumétrica, campos de pressão e velocidade superficial da água sobre os planos longitudinal e transversal.

A Figura 2.a apresenta os campos de fração volumétrica sobre os planos longitudinal e transversal. Os resultados obtidos evidenciam um avanço lento do óleo no interior da membrana, indica que estas dimensões dificultam a saturação da membrana com óleo. Nota-se, uma saturação da membrana apenas nas proximidades da saída da corrente do concentrado, onde a intensidade turbilhonar é mínima (onde o momento angular é inferior ao momento axial) conduzindo um aumento na saturação do óleo, comportamento semelhante obtido por Vieira *et al.* (2012) ao estudar a influência da área de seção transversal do duto retangular de alimentação no dispositivo anular com uma membrana cerâmica no processo de separação água/óleo, e Costa (2014) ao avaliar numericamente a influência da porosidade de uma membrana cerâmica em um o processo de separação água/óleo.

A Figura 2.b apresenta os campos de pressão sobre os planos longitudinal e transversal. Percebe-se, de um modo geral, que há uma pequena variação, apenas próxima a entrada tangencial, onde a intensidade turbilhonar é mais proeminente, resultado semelhante obtido por Souza (2014) ao realizar um estudo da fluidodinâmica do escoamento de fluidos em tubos permeáveis (membrana cerâmica porosa tubular), em regime laminar. Ao se afastar da entrada tangencial há uma redução da intensidade turbilhonar decorrente da redução do momento angular devido ao aumento do momento axial. Este fato é consequência da transferência de quantidade de movimento do fluido ao atingir as paredes do tubo interno e da membrana do módulo de separação convertendo assim parte da energia cinética em energia potencial, ruído e calor.

A Figura 2.c apresenta os campos de velocidade superficial da água sobre os planos longitudinal e transversal. Nota-se um comportamento semelhante ao do campo de pressão. É possível destacar que a variação, tanto nos campos de pressão, quanto nos campos de velocidade, é mais proeminente próximos à entrada tangencial, onde a força centrífuga age com maior influência sobre as forças que atuam sobre o fluido.

Figura 2 – (a) Distribuição da fração volumétrica; (b) Distribuição da pressão e (c) Perfil de velocidade superficial da água no plano longitudinal ZX nas posições angulares e pelos planos transversais em diferentes posições sobre o plano XY.



4 CONCLUSÕES

Com os resultados numéricos da simulação do processo de separação de água/óleo através de um módulo munido com uma membrana cerâmica pode-se concluir que a modelagem matemática proposta foi capaz de representar os fenômenos físicos envolvidos no processo de separação de água/óleo via membrana cerâmica.

REFERÊNCIAS

COSTA, A. B.; FARIAS NETO, S. R. **Tratamento de águas contaminadas via membrana cerâmica: modelagem e simulação**. 2014. In: XI Congresso de iniciação científica da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014.

FERNANDES, E. C. R.; BELO, A. C.; ARAÚJO, A. M.; DA SILVA, A. A. C.; BEZERRA, C. C. A.; ROCHA, G. J. A. M. **Uma avaliação de diferentes modelos de turbulência numa simulação cfd de fluxo de ar passando por um aerofólio s814**. Brazilian Journal of Development v. 6, n. , p. 58335-58348.fe 2020.

NETTO, D. C.; CAMACHO, R. G. R.; SOUZA, D. S. **Estudo Comparativo de metodologias para solução numérica da camada-limite turbulenta sobre o aerofólio nrel s809**. Brazilian Journal of Development v. 5, n. 9, p. 16180-16198.fe 2019.

SILVEIRA, M. A. C. R. **Controle de um processo de tratamento primário de petróleo**. 2006. Dissertação de Mestrado – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

SOUZA, J. S. **Estudo Teórico do Processo de Microfiltração em membranas cerâmicas**. 2014. Tese de Doutorado (Engenharia de Processos) – PPGEP - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2014.

THOMAS, J.E.; TRIGGIA, A. A.; CORREIA, C.A.; VEROTTO FILHO, C.; XAVIER, J.A D.; MACHADO, J.C.V., **Fundamentos de Engenharia do Petróleo**, ed. Interciência: Petrobrás, Rio de Janeiro, Brasil, 2001

VIEIRA, T. M.; SOUZA, J. S.; BARBOSA, S. E.; CUNHA, A, L.; FARIAS NETO, S.R.; LIMA, A. G. B., Numerical Study of oil/water separation by ceramic membranes in the presence of turbulent flow. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 2, p. 257, 2012.