

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Aplicação da Fluidodinâmica Computacional na Separação Água/Óleo através de Membranas Cerâmicas

AUTORES:

Acto de Lima Cunha, Severino Rodrigues de Farias Neto

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Campina Grande

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. 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 5º PDPETRO.

APLICAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL NA
SEPARAÇÃO ÁGUA/ÓLEO ATRAVÉS DE MEMBRANAS CERÂMICAS

Abstract

This numerical paper was developed using the commercial code CFX 10.0 which uses the finite volume method to convert differential equations that rules the process of mixing water/oil, into algebraic equations. For this were made mesh representing the ceramic membrane, on which analysis were performed to avoid influence in results. Was evidenced that the filtrate flow rate was directly proportional to the flow feed and oil volumetric rate in the mixture into the studied conditions.

Keywords: ceramic membrane, mesh, filtered flow.

Introdução

De todos os problemas enfrentados pelo o meio ambiente, a presença de poluentes nas águas oriundas de efluentes de esgotos domésticos e efluentes industriais (lavagem de pisos, tanques, máquinas de refrigeração entre outros), de plantas de processamento da indústria de petróleo (por exemplo, decantadores gravitacionais, separadores trifásico, etc.). Estas atividades tem sido alvo dos órgãos regulamentadores ambientais visando assegurar que sejam atendidos os padrões ambientais de descartes destes efluentes no meio ambiente, que de acordo com o Conama não deve superar a 20ppm. A presença de águas oleosas representa uma grande parcela dos problemas gerados por contaminantes orgânicos, a exemplo do benzeno, hexano, tolueno, entre outros. O termo água oleosa é usado para descrever todas as águas em que entre outras estão presentes óleos, graxas e lubrificantes, além de outros materiais em suspensão, (área, argila, etc) e substâncias coloidais e dissolvidas, (detergentes, sais e metais pesados). As águas oleosas oriundas dos processos de extração de petróleo comumente conhecidas por águas produzidas, representam a maior corrente de resíduos da produção de óleo de uma reserva petrolífera, que no início da produção de óleo chega a produzir de 5 a 15% de água. À medida que o declínio de produção é acentuado, há a necessidade de se recuperar a produção por meios de técnicas a exemplo da injeção de água no reservatório, que favorece um aumento na produção de água podendo chegar a valores entre 75 e 90%. Uma das técnicas utilizadas para separação água/óleo é o uso de hidrociclones em virtude de sua elevada capacidade de processamento, pouco espaço físico necessário para suas instalações e facilidade de operação, os hidrociclones são economicamente viáveis no que diz respeito à relação custo/benefício (Dios e Medronho, 2003; Carvalho e Medronho, 2004). Para aumentar a eficiência da separação água-óleo, de forma a assegurar que sejam atendidos os padrões ambientais de descartes, uma célula metálica onde é introduzida uma membrana cerâmica pode ser acoplado a uma série de hidrociclones, denominado de sistema híbrido hidrociclone-membrana. As membranas cerâmicas agem como uma barreira para o óleo emulsionado e têm sido bastante estudadas como um meio de separação entre água/óleo em emulsões estáveis, pois apresentam propriedades essenciais para filtração, tais como inércia química, estabilidade biológica e resistência a altas temperaturas (Silva et al., 2003; França, 2003).

Metodologia

Descrição do problema

No presente trabalho foi utilizada uma membrana cerâmica tubular, para separar o óleo de uma corrente aquosa que é descartada de outro dispositivo, a exemplo, de um hidrociclone que por ventura ainda esteja com uma concentração de óleo um pouco acima das especificações de descarte da mesma.

A membrana cerâmica utilizada foi confeccionada utilizando argila esmectita chocolate por França (2003) com forma tubular, Figura 1, e cujas dimensões estão ilustradas na tabela 1.

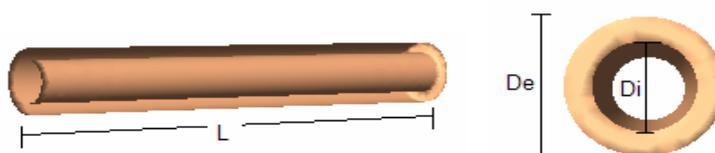


Figura 1 – Membrana cerâmica e suas dimensões características

Tabela 1 - Dimensões da membrana.

Comprimento, L	67,8	mm
Diâmetro Externo, De	10,0	mm
Diâmetro Interno, Di	6,5	mm

Modelagem Matemática

O modelo matemático utilizado para descrever o escoamento no meio poroso, bem como o processo de separação água/óleo baseado nas equações de conservação de massa e de quantidade de movimento dadas por:

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{K} \cdot \vec{U}) \otimes \vec{U}) - \nabla \cdot (\mu_e \mathbf{K} \cdot (\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T)) = -\phi \mathbf{R} \cdot \vec{U} - \phi \nabla p \quad (2)$$

onde \vec{U} é o vetor velocidade real, μ_e é a viscosidade efetiva, e $\mathbf{R} = (R^{ij})$ representa a resistência ao escoamento no meio poroso, que é, em geral, um tensor simétrico positivo de segunda ordem, a fim de atender as possíveis anisotropias na resistência, ϕ é a porosidade volumétrica, ρ a massa específica do fluido, t o tempo e $\mathbf{K} = (K^{ij})$ é um tensor simétrico de segunda ordem, chamado de tensor porosidade de área.

A resistência que a membrana cerâmica oferece ao escoamento foi estudada a partir da combinação da lei de Darcy, Equação (3), com a relação empírica proposta por Timur (1968), que

relaciona a permeabilidade com a porosidade do meio filtrante, equação (4), considerando que a membrana estivesse completamente saturada com água.

$$q = \frac{KA}{\mu} \cdot \frac{dP}{dX} = A\bar{v} \quad (3)$$

$$K = 8,58102 \frac{\phi^{4,4}}{S_w^2} \quad (4)$$

Onde $K(m^2)$ é a permeabilidade, ϕ é a porosidade da membrana, A é igual a $2\pi rL$, μ a viscosidade dinâmica do fluido, \bar{v} é a velocidade média, S_w a saturação de água no meio poroso; q é a vazão de fluido através da membrana, $\frac{dP}{dX}$ é a taxa de variação da pressão na membrana.

Condições de Contorno

As equações diferenciais (1), (2) e (3) que descrevem o fenômeno estudado necessitam de condições de contorno sobre a célula de separação, conforme pode se observar na Figura 2, a fim de complementar o modelo matemático, as quais estão listadas na Tabela 2, de acordo com o caso estudado.

Tabela 2 – Condições de contorno para os casos estudados.

Casos		W(kg/s)	r_a	r_o	P(Pa)
1	Entrada	0.1073	0.83333	0.16667	--
	Saída	--	--	--	101325
	Parede	--	0.95	0.05	--
2	Entrada	0.1073	0.6	0.4	--
	Saída	--	--	--	101325
	Parede	--	0.95	0.05	--
3	Entrada	0.1073	0.7	0.3	--
	Saída	--	--	--	101325
	Parede	--	0.95	0.05	--
4	Entrada	0.2	0.83333	0.16667	--
	Saída	--	--	--	101325
	Parede	--	0.95	0.05	--
5	Entrada	0.5	0.83333	0.16667	--
	Saída	--	--	--	101325
	Parede	--	0.95	0.05	--
6	Modificação da geometria de cilíndrica para quadrada usando as condições do caso 1				

Onde W é a vazão mássica da mistura, r_a a fração mássica da água, r_o a fração mássica do óleo, u_x , u_y e u_z correspondem as componentes da velocidade nas direções x , y e z , respectivamente e P a pressão de referência.

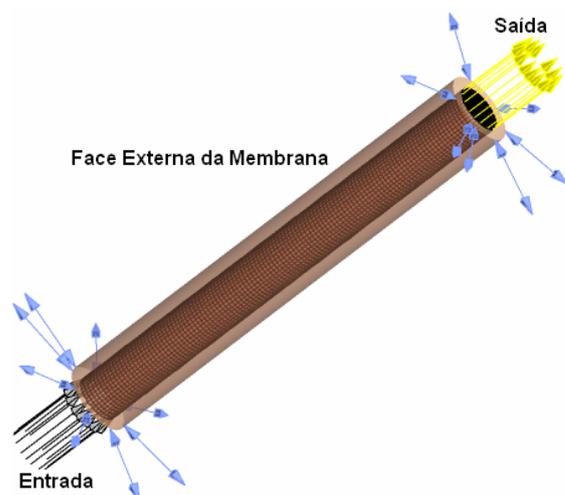


Figura 2 – Representação das fronteiras da membrana.

Outros dados importantes que foram definidos na solução do problema são aqueles relacionados com as propriedades do fluido e o meio em que este está escoando, estas propriedades estão relacionadas na Tabela 3.

As simulações mencionadas nos diferentes casos listados na Tabela 2 foram realizadas levando em consideração que: o escoamento era isotérmico (298 K), estacionário e em regime de escoamento turbulento (tratado numericamente pelo modelo $k-\varepsilon$). Adotou-se a pressão e densidade de referência igual a zero Pascal e 997 Kg/m^3 , respectivamente; o empuxo com a gravidade igual a $-9,81 \text{ m/s}^2$ na direção z ; o diâmetro médio da gota de óleo (fase dispersa) igual $1e^{-06} \text{ m}$; o resíduo RMS 10^{-6} com no máximo de 1000 iterações e um passo de tempo de 1800 s (transiente distorcido).

Tabela 3 – Propriedades Físicas e químicas dos fluidos e da membrana.

	Propriedade	Valores
Óleo	Viscosidade dinâmica	0.014 Pa.s
	Peso molecular	105.47 Kg/kmol
	Densidade	866.5 Kg/m^3
	Capacidade calorífica	$1884 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$
	Condutividade térmica	$0.143 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
Água	Viscosidade dinâmica	0.0008899 Pa.s
	Peso molecular	18.02 Kg/kmol
	Densidade	997 Kg/m^3
	Capacidade calorífica	$4181.7 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$
	Condutividade térmica	$0.6069 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
Membrana	Resistência	$3.98 \cdot 10^9 \text{ Kg/m}^3 \text{ s}^1$
	Porosidade	0.4403
	Diâmetro médio dos poros	$0,74 \mu\text{m}$

Resultados e Discussão

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem da Unidade Acadêmica de Engenharia Química e no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica. Foram utilizados computadores Pentium IV 3.0 GHz, 1 Gb

RAM e HD de 40 Gb e Intel XEON Duplo processamento 3.06 GHz, 1024 MB RAM e 4 HD de 40 Gb de alto desempenho.

A Figura 3 ilustra os resultados da simulação para o caso 1, realizada com o CFX 10.0, para as diferentes malhas utilizadas e mencionadas na Tabela 4. Dentre as diversas comparações realizadas optou-se por ilustrar, no presente trabalho, as curvas do perfil de velocidade na direção axial, ou seja, ao longo do eixo z, sobre uma posição definida sobre este eixo (z igual a 0,005 m, próximo a entrada da mistura água/óleo) conforme ilustrado na Figura 4-b.

Tabela 4 – Refinamento da malha.

Malhas	Volumes de Controle
1	39600
2	52800
3	79200
4	90000
5	120960

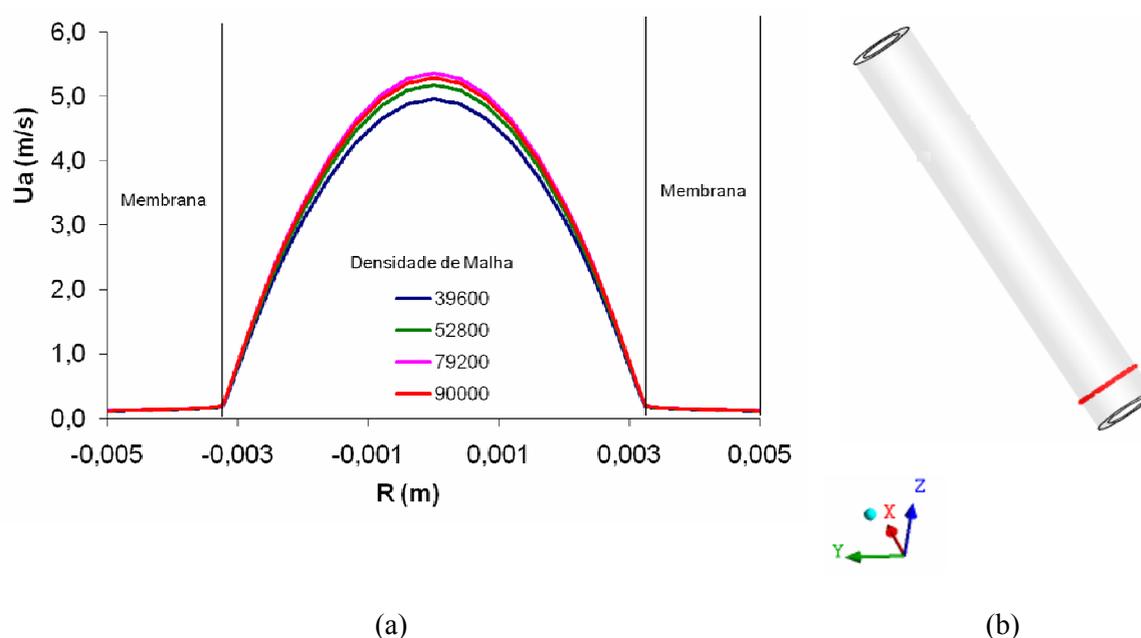


Figura 4 – Perfis de velocidade axial obtidos para diferentes malhas em $z = 0,005$ m (a) e Ilustração das posições $z = 0,005$ m tomadas na membrana cerâmica tubular (b).

Esta figura mostra claramente a influência dos resultados com a malha utilizada, sobretudo nos valores das velocidades máximas atingidas. Todavia, ao se aumentar a densidade de volumes de controle esta diferença diminuiu consideravelmente entre as malhas com 79200 e 90000 células. Não fora ilustrado os resultados referente a malha número 5, constituída por 120960 volumes de controle, decorrente da limitação de memória disponível.

A Figura 5 ilustra os detalhes da malha cilíndrica com 79200 elementos utilizada na execução das diferentes simulações realizadas para a obtenção dos resultados que serão ilustrados e discutidos com o decorrer deste trabalho.

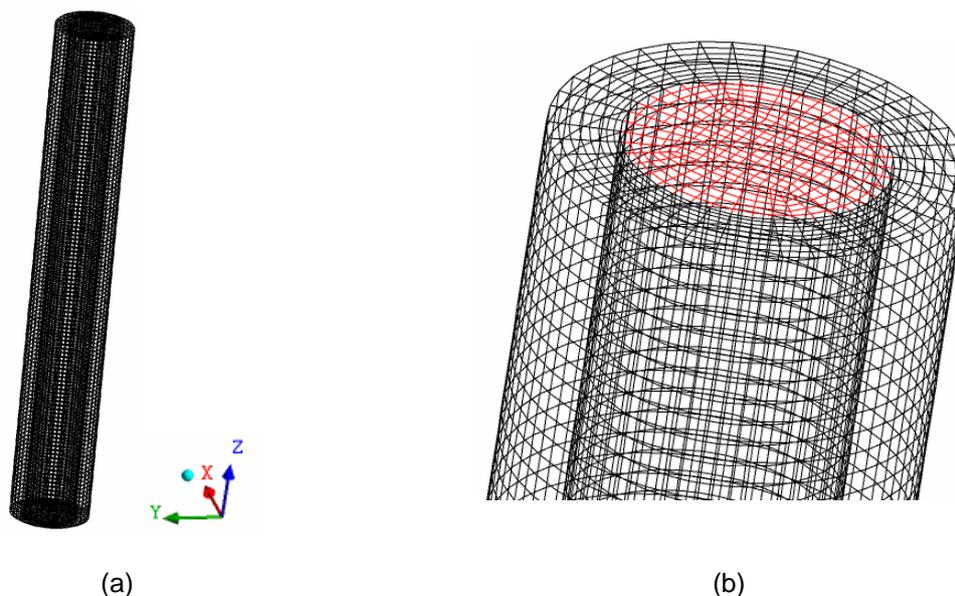


Figura 5 – Detalhes da malha cilíndrica com 79200 volumes de controle utilizada (a) visão geral (b) Detalhe da saída da membrana.

Na Figura 6 estão representados as distribuições das frações volumétricas da água sobre o plano YZ passando pela origem da célula cilíndrica de separação para diferentes fluxos da mistura água/óleo (0,1073; 0,2000 e 0,5000 kg/s). Estes resultados mostram que praticamente não há variação no comportamento da distribuição da fração volumétrica com o aumento da vazão de alimentação. Todavia, como era esperado, houve um aumento na vazão de filtrado proporcionalmente ao aumento da vazão de alimentação da mistura (0,075; 0,150 e 0,400 kg/s, respectivamente).

Ao se estudar a influência da concentração de óleo na mistura computada pela fração volumétrica de óleo, observa-se a presença de uma pequena parcela de óleo presente na membrana independente da situação avaliada, este fato pode estar relacionado com a suposição de que a membrana estaria inicialmente completamente saturada com água e a resistência foi, portanto, determinada por meio da Equação (9). Assim, percebeu-se que com o aumento da concentração de óleo na alimentação da célula (frações volumétricas iguais a 0,6; 0,7 e 0,83333) aumentava-se a vazão de água no filtrado (0,056; 0,065 e 0,075 kg/s, respectivamente).

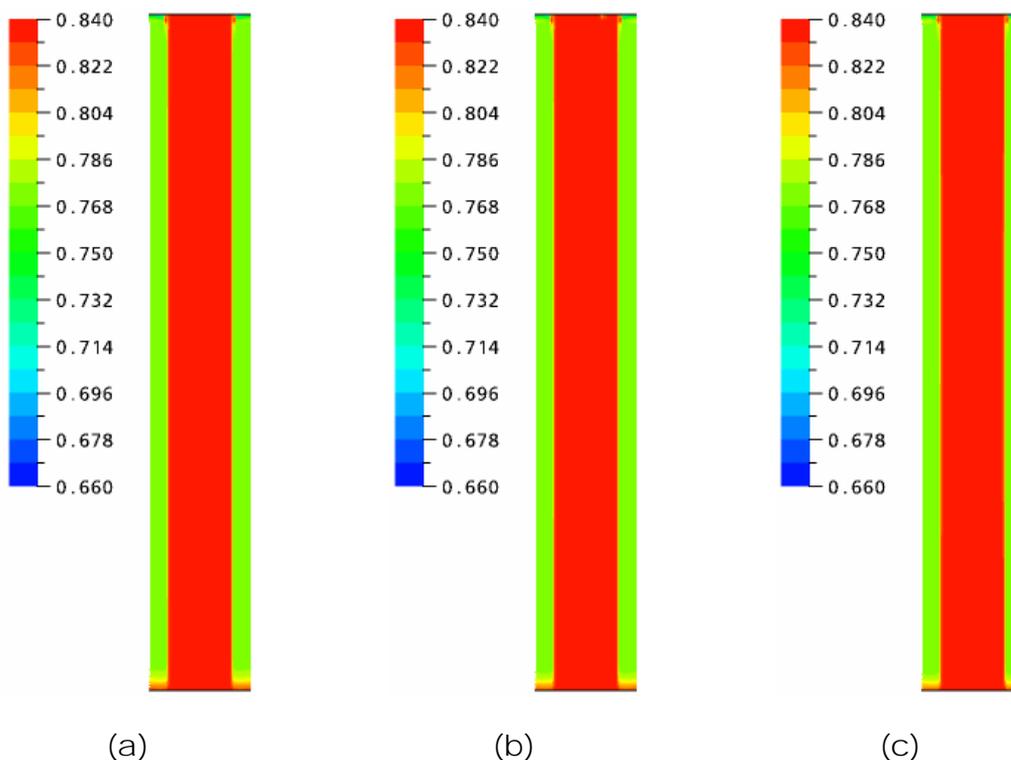


Figura 6 – Distribuição da fração volumétrica da água no plano YZ na membrana cerâmica tubular para diferentes vazões mássicas da mistura água/óleo (a) 0,1073 kg/s; (b) 0,2 kg/s e (c) 0,5 kg/s.

Na Figura 7 estão representadas as distribuições das frações volumétricas da água sobre o plano YZ passando pela origem do tubo cerâmico referentes aos casos 1, 2 e 3, onde foi variado o valor da fração volumétrica da mistura na seção de entrada. Como esperado verifica-se um aumento da fração volumétrica da água no interior da membrana, decorrente de uma diluição na mistura.

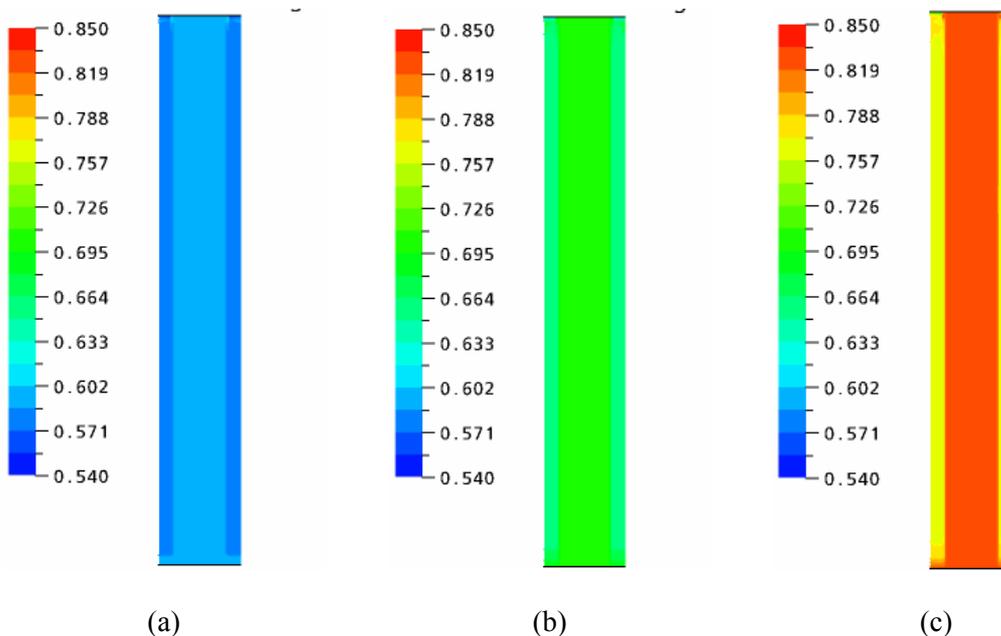


Figura 7 – Distribuição da fração volumétrica da água no plano YZ na membrana cerâmica tubular para diferentes frações volumétricas de água na alimentação (a) 0,6; (b) 0,7 e (c) 0,8333.

Conclusões

O estudo numérico do processo de separação água/óleo através de uma membrana cerâmica via código comercial CFX 10.0 proporcionaram as seguintes conclusões:

- Ao se variar a densidade de elementos ou volumes de controle sobre a malha foi observada uma leve discrepância entre os resultados de uma malha cada vez mais refinada. Após o estudo de dependência de malha foi utilizada uma malha com 79200 elementos para o duto cilíndrico.
- As comparações entre as geometrias analisadas e nas condições estudadas mostraram a presença de uma maior concentração de óleo no interior da membrana no duto retangular do que no cilíndrico, o que pode ser arrastado para a vazão de filtrado e sua concentração de óleo ficar acima do especificado pelo CONAMA.

Agradecimentos

Os autores agradecem a ANP- PRH 25 pela bolsa nível mestrado e por todo apoio financeiro que torna possível a realização deste trabalho, ao Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI)/UFCG e ao Laboratório de Térmicas e Fluido.

Referências Bibliográficas

CARVALHO A. T.; MEDRONHO, R. A. **A separação da barita do fluido de perfuração para promover uma perfuração com duplo gradiente**. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Salvador, 2004.

CFX-USER Manual, ANSYS CFX 10.0, United Kingdom, 1997.

DIOS, A.L.; MEDRONHO, R.A. **Simulação numérica da separação água-óleo em hihrociclones**. In: 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Rio de Janeiro, 2003.

FRANÇA, R.V., **Desenvolvimento de membranas cerâmicas para tratamento de águas contaminadas por óleo e resíduos sólidos**. 2003. 48 f. Curso de Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

SILVA, A. A.; MELO, K.S.; MAIA, J. B. N.; FRANÇA, R. V.; SILVA, R. A. V.; LIRA, H. L.; CARVALHO, L. H.; FRANÇA, K. B.; RODRIGUES, M. G. F. **Estudo do potencial de separação água/óleo de membranas cerâmicas tubulares de alumina através da análise das medidas de fluxo e turbidez**. In: 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Rio de Janeiro, 2003.

TIMUR, A. **An Investigation of Permeability, Porosity and Residual Water Saturation Relationships**, AIME, 1968.