



## FLUXO DE UMA GOTA DE ÓLEO EM UM MICROCANAL RETO E COM GARGANTA

OLDRICH JOEL ROMERO, RÔMULO FIENI FEJOLI

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES campus São Mateus  
Rodovia BR 101 Norte, km 60, Litorâneo, CEP 29.932-540, São Mateus, ES, Brasil

(Recibido 27 de febrero de 2015, para publicación 17 de abril de 2015)

**Resumo** – Um mecanismo dominante para o aprisionamento residual do petróleo em meios porosos é o *snap-off*, definida como a desconexão de um fluxo contínuo desse fluido quando o mesmo passa através das gargantas e constrições do poro satisfazendo um critério baseado em desequilíbrio de pressão capilar. Neste trabalho é investigado a dinâmica interfacial de uma gota de óleo em água que flui através de uma geometria formada por duas placas paralelas. Para entender o efeito da geometria no microescoamento uma segunda configuração formada por duas placas paralelas com um estrangulamento, é também utilizada. O problema bidimensional, transiente, de fluidos Newtonianos incompressíveis, bifásico, com forças de inércia pequenas, representa de forma simplificada o que ocorre no reservatório de petróleo na escala microscópica durante a mobilização das gotas de óleo formadas pelo mecanismo *snap-off*. A solução numérica do problema com interface é obtida pela abordagem VOF – *Volume Of Fluid*. Os resultados, ainda que qualitativos, são extremamente alentadores e mostram que a dinâmica do processo de movimentação da bolha de óleo nas duas geometrias, é controlado pelos parâmetros adimensionais número de capilaridade, razão de viscosidades e geometria. De uma forma geral, a gota de óleo se deforma em maior ou menor grau em resposta às forças dominantes. A presença da constrição aumenta significativamente a pressão assim como a velocidade de escoamento da gota na garganta.

**Palavras-chave** – Escoamento bifásico, microcanal, constrição, tensão interfacial, Fluent.

### 1. INTRODUÇÃO

O crescente interesse em métodos de recuperação avançada de petróleo (*Enhanced Oil Recovery - EOR*), também chamada de recuperação ‘melhorada’, está relacionado principalmente ao aumento da produção de reservatórios maduros e recém explorados. Até o momento há uma vasta gama de métodos baseados em EOR, como métodos miscíveis, térmicos, e especialmente os métodos químicos, que possuem uma ligação próxima entre a hidrodinâmica multifásica e a físico-química no meio poroso [1]. A análise microscópica, ou seja, em escala de poros é de grande importância para determinar a eficiência do fluxo de petróleo em capilares com constrições. Para os métodos químicos essa eficiência é ‘melhorada’ por meio da redução da tensão interfacial entre as fases presentes no capilar, o que acarreta em um aumento do número de capilaridade e conseqüentemente no aumento da produção de petróleo.

Quando um fluido não molhante desloca um fluido molhante em meios porosos, o fluido não molhante pode dividir-se em gotas ou bolhas devido a tensão superficial o que resulta em um trapeamento residual de fluido. Este fenômeno é geralmente chamado de *snap-off* ou *choke-off*, *pinch-off* ou *break-up* (Fig. 1). Nesta figura, óleo (fase não molhante) se movimenta ao longo da constrição, de montante para jusante, deixando aderida nas paredes superior e inferior dos poros um filme de água (fase molhante) (Fig. 1a-b). Devido a uma diferença na curvatura interfacial, a água é conduzida por tensão superficial formando um colar crescente na garganta do poro (Fig. 1c). Eventualmente, o fenômeno *snap-off* ocorre quando as interfaces superior e inferior entram em contato formando uma fase contínua na garganta e resultando no isolamento de uma bolha de óleo a jusante da garganta (Fig. 1d) [2]. Este processo lento é repetido várias vezes.

Roof [3] apresentou um critério para determinar o início do *snap-off* em um poro circular. A ideia principal é que, quando a pressão capilar à jusante do fluido não molhante (normalmente o óleo) é menor do

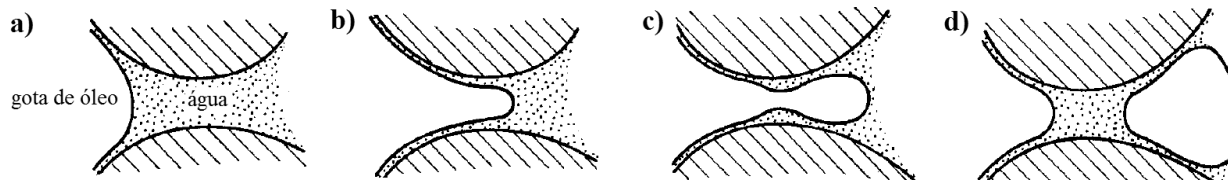


Fig. 1. Fenômeno *snap-off*: a) uma gota de óleo não molhante encontra uma constrição, b) e c) alongamento da gota através da garganta, e d) formação de outra gota de óleo (Modificado de [2]).

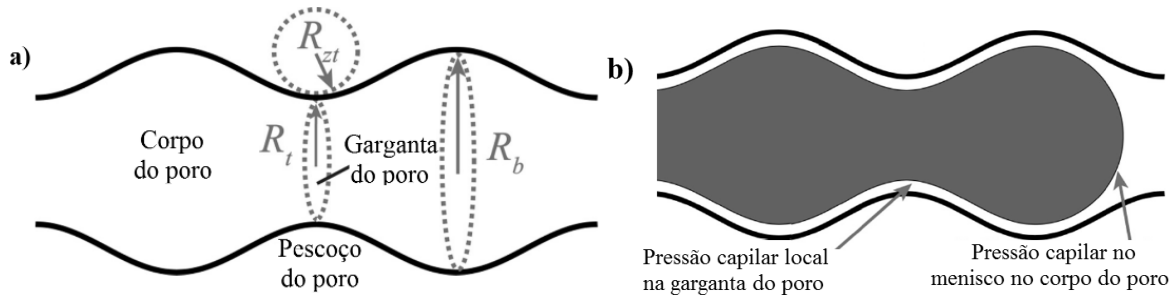


Fig. 2. a)  $1/R_b$  e  $1/R_t$  são as curvaturas do corpo e da garganta do poro, respectivamente.  $1/R_{zt}$  é a curvatura transversal da garganta de poro. b) A pressão capilar local na garganta do poro é dada por  $\sigma(1/R_t + 1/R_{zt})$ ; a pressão capilar através do menisco no corpo de poro é dada por  $2\sigma/R_b$ ;  $\sigma$  é a tensão interfacial (Modificado de [4]).

que a pressão capilar local na garganta do poro, o fluido molhante (normalmente a água) retorna pelas paredes em direção à garganta do poro provocando o *snap-off*, em outras palavras o fluido não molhante se torna instável e ocorre o *snap off* na garganta do poro. De acordo com o modelo de Roof, o *snap-off* ocorre quando parâmetros geométricos raio do corpo do poro  $R_b$ , raio da garganta do poro  $R_t$ , e raio transversal de curvatura da garganta  $R_{zt}$  (ilustrados na Fig. 2) atendem

$$\frac{2}{R_b} < \frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_{zt}} \quad (1)$$

A garganta é geralmente em forma de sela e assim  $R_{zt}$  é normalmente um valor negativo [4, 5]. Ainda na Fig. 2 ‘corpo do poro’ refere-se à seção do poro fora da constrição, ‘pescoço do poro’ é a parte estrangulada do poro, e mais estreita do pescoço é a ‘garganta do poro’. A ‘pressão capilar local’ refere-se à pressão capilar da interface fluido molhante/fluido não molhante ao longo da parede do capilar, que é diferente da pressão capilar através do menisco.

O *snap-off* resulta em trapeamento de óleo no meio poroso na forma de gotas isoladas mensurado através da saturação de óleo residual  $S_{or}$ . Métodos EOR objetivam diminuir esta quantidade de óleo retido no reservatório, para o qual é necessário promover um aumento de várias ordens de grandeza do número de capilaridade ( $C_a$ ), conforme mostrado na Fig. 3. Romero e Fejoli [7] mostraram que o aumento de  $C_a$  pode ser obtido, por exemplo, através da diminuição da tensão interfacial promovido pelo uso de tensoativos (surfactantes). Já o estudo de Payatakes [8] destaca que a mobilização do óleo trapeado por *snap-off* é a principal razão para o aumento da recuperação do óleo.

Visando compreender a dinâmica do contato na interface água/óleo, Moraes *et al.* [9] apresentam a modelagem numérica da recuperação de petróleo em um meio poroso artificial na escala microscópica, verificando que a resposta do escoamento depende de diversos parâmetros, tais como a razão de viscosidades, número de capilaridade. Problemas com superfícies livres são muito comuns na natureza e na indústria, em [10] uma extensa discussão sobre o tema é apresentada. Neste contexto, e utilizando uma abordagem similar à de Moraes e colegas, o presente trabalho expõe o processo de movimentação de uma gota de óleo imersa em água escoando em canais retos e constritos. Em campo, este fenômeno ocorre durante a injeção de água durante a recuperação convencional de petróleo.

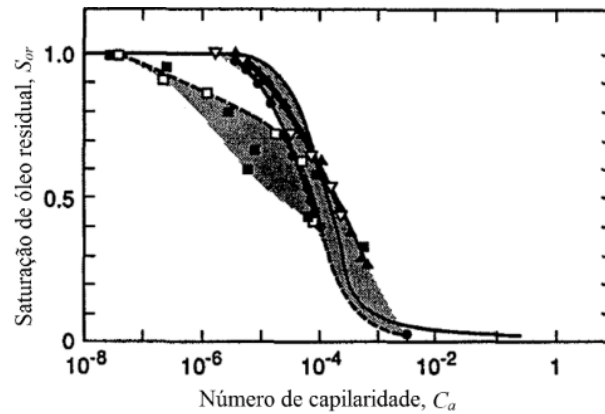


Fig. 3. Influência da variação do número de capilaridade na diminuição da saturação de óleo remanescente. Adaptado de [6].

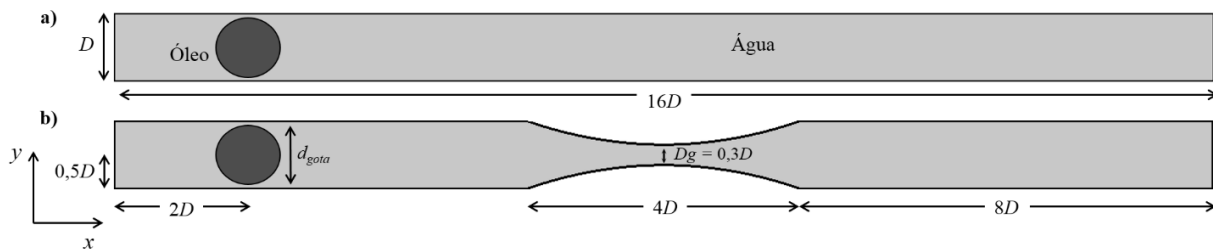


Fig. 4. Geometrias do microcanal reto (a) e do microcanal com garganta (b).

## 2. ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho o interesse é estudar a escoamento de uma gota de óleo ( $o$ ) imersa em água ( $w$ ) através de microcanais formado por placas paralelas sem restrição ao fluxo, e por placas paralelas com restrição ao fluxo. Em diante, estas geometrias serão referenciadas como microcanal reto e microcanal com garganta. São realizadas simulações computacionais utilizando a metodologia VOF – *Volume Of Fluid*, disponível no *software* Fluent® versão 14.5, para determinar o efeito da geometria, da razão de viscosidades entre o óleo e a água, da tensão interfacial em relação a velocidade e a pressão do escoamento da gota de óleo.

Nas duas configurações utilizados, microcanal reto (Fig. 4a) e microcanal com garganta (Fig. 4b), o espaçamento entre as placas é  $D = 1$  mm, com comprimento de  $16D$ , isto é 16 mm; o diâmetro da gota de óleo imersa no meio aquoso é  $d_{gota} = 0,8D = 0,8$  mm, com seu centro posicionada em  $x = 2,0$  mm e  $y = 0,5$  mm em relação ao vértice inferior esquerdo. O microcanal com garganta, apresenta uma diminuição da seção reta de tal forma que a área aberta ao fluxo se reduz para  $Dg = 0,3D = 0,3$  mm, na posição a  $8D = 8$  mm da entrada, a extensão da garganta é  $4D = 4$  mm e a curvatura é obtida fixando um raio  $R_{zt} = 5,9$  mm).

A densidade  $\rho_w$  e viscosidade  $\mu_w$  da água, que é a fase contínua, é de  $1.000$  kg/m<sup>3</sup> (equivalente a 10°API, API – *American Petroleum Institute*) e  $0,001$  kg/m s (equivalente a 1 cP), respectivamente, em todas simulações. A densidade do óleo  $\rho_o$ , que é a fase dispersa, também permaneceu constante com o valor de  $950$  kg/m<sup>3</sup> (17,4 °API). A viscosidade do óleo  $\mu_o$  assumiu dois valores 1 cP e 100 cP respectivamente, resultando nas razões de viscosidades ( $\mu_R$ ) 1 e 100.

A forma e posição da interface óleo/água é determinada pelo método VOF – *Volume Of Fluid*. O modelo de força de superfície contínua (CSF – *Continuous Surface Force*) é utilizado definindo também o coeficiente da tensão interfacial ( $\sigma$ ) entre as fases primária (água) e secundária (óleo). Esta propriedade assumiu dois valores e de tal forma a resultar em números de capilaridade diferentes ( $\sigma = 0,075$  N/m para  $C_a = 0,03$  e  $\sigma = 0,00075$  N/m para  $C_a = 3,00$ ).

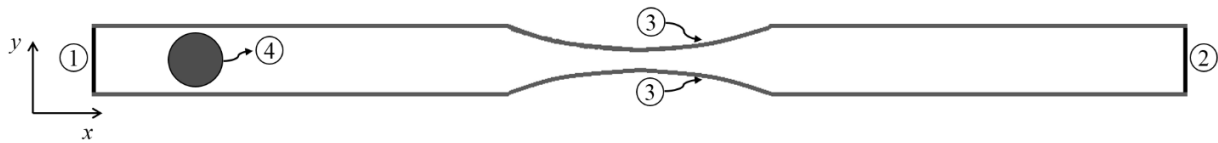


Fig. 5. Esquema identificando as condições de contorno válidas para os microcanais reto e com garganta.

### 3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

No domínio contínuo mostrado na Fig. 4, o escoamento incompressível, isotérmico, bidimensional, transiente, de dois fluidos imiscíveis com massa específica e viscosidade constantes em cada fase, desconsiderando efeitos gravitacionais, é descrito pelas equações de Navier-Stokes e da continuidade

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \mu\nabla \cdot [\nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^T] \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (3)$$

em que  $\vec{v}$  é o vetor velocidade formado pelas componentes  $u$  e  $v$ ;  $p$  é a pressão estática; o sobrescrito  $T$  denota a transposta da matriz. Tem-se três incógnitas ( $u$ ,  $v$  e  $p$ ) e três equações, entretanto para sua solução se faz necessário especificar as condições iniciais e de contorno. Estas condições de contorno são mostradas na Fig. 5 identificados por números, e são válidas para as duas geometrias utilizadas, sendo

- (1) Entrada: é definido a velocidade média de injeção de água de  $V = 2$  m/s;
- (2) Saída: pressão nula é prescrita, é o plano onde a água injetada e a gota de óleo escoam para fora do domínio;
- (3) Paredes do microcanal: condição de não deslizamento e impermeabilidade, e
- (4) Interface: a equação (7) é aplicada, é a interface entre a gota de óleo e a água.

A magnitude da velocidade na entrada é escolhida para diminuir o tempo de processamento das simulações. O passo de tempo  $\Delta t$  utilizado, que permite a convergência da solução, é de  $\Delta t = 0,0004$  segundos. Os resultados apresentados na seção § 5 são para diversos instantes de tempos função deste  $\Delta t$ .

O escoamento é governado, principalmente, por três parâmetros adimensionais, que relacionam as forças atuantes no fluido, e dois parâmetro geométrico, são eles:

- (i) razão de viscosidades  $\mu_R, \mu_R = \mu_o / \mu_w$ ;
- (ii) número de capilaridade  $C_a, C_a = \mu_w V / \sigma$ ;
- (iii) número de Reynolds  $Re, Re = \rho_w V D / \mu_w$  obtido com a velocidade média da seção de entrada.  $Re$  é igual a 55 para ambos as configurações; e
- (iv) razão de diâmetros  $D_{R1}, D_{R1} = d_{gota} / D$ ; e
- (v) razão de diâmetros  $D_{R2}, D_{R2} = D_g / D$ . Este parâmetro é igual a 1 para o microcanal reto.

Como mencionado  $\mu_o$  é a viscosidade do óleo,  $\mu_w$  é a viscosidade da água,  $d_{gota}$  é o diâmetro da gota de óleo,  $D$  é a separação entre placas do microcanal,  $D_g$  é o abertura na garganta,  $\rho_w$  a densidade da água e  $V$  a velocidade média do fluido e igual ao valor da condição de contorno de entrada.

Outras configurações e geometrias podem ser utilizadas com o objetivo de, por exemplo, observar o efeito da variação do diâmetro da gota e do diâmetro da garganta.

### 4. TRATAMENTO NUMÉRICO DO PROBLEMA COM INTERFACE

É utilizado *software* Fluent® baseado em volumes finitos para resolver as equações governantes. A interface é obtida mediante a abordagem VOF (*Volume of Fluid*) [11] resolvendo a equação de conservação

para a fração volumétrica da fase secundária, óleo ( $o$ ),  $\alpha_o$  [12], válida quando não há transferência de massa entre as fases

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_o \rho_o) + \nabla \cdot (\alpha_o \rho_o \vec{v}) = 0, \quad (4)$$

$\rho_o$  é a densidade do óleo. Em cada célula da malha a fração volumétrica de óleo  $\alpha_o$  pode assumir os seguintes valores:

- $\alpha_o = 0$ , quando a célula está vazia de óleo, portanto preenchida com água;
- $0 < \alpha_o < 1$ , quando a célula contém a interface entre o óleo e a água. Neste caso um algoritmo específico é utilizado para determinar a posição da interface no interior de cada célula. Ampliação da discussão deste tópico não é escopo deste trabalho;
- $\alpha_o = 1$ , quando a célula está completamente cheia de óleo, portanto sem água.

Conhecida a fração volumétrica do óleo, a fração de volume da fase primária água ( $\alpha_w$ ) é determinada pela restrição

$$\alpha_o + \alpha_w = 1 \quad (5)$$

A equação (2), aplicada em todo o domínio, depende das frações volumétricas de cada fase por meio das propriedades  $\rho$  e  $\mu$ . Os campos de velocidade e pressão resultantes são compartilhados entre as fases. A densidade e viscosidade dinâmica da mistura na interface são determinadas pelas equações seguintes

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha_o \rho_o + \alpha_w \rho_w \\ \mu &= \alpha_o \mu_o + \alpha_w \mu_w \end{aligned} \quad (6)$$

Na abordagem VOF o termo de força superficial volumétrica  $F_{vol}$ , é adicionado no lado direito da equação (2), que de acordo com Brackbill *et al.* [13] permite determinar esta força em função da tensão interfacial  $\sigma$  e da curvatura da interface  $\kappa$ ,  $\kappa = \nabla \cdot \vec{n}$ , sendo  $\vec{n} = \frac{\nabla \alpha_o}{|\nabla \alpha_o|}$ , através da expressão

$$F_{vol} = \sigma \kappa \frac{\rho \nabla \alpha_o}{\frac{1}{2}(\rho_o + \rho_w)}, \quad (7)$$

este modelo é denominado de *Continuum Surface Force – CSF*.

Na solução numérica 2D de fluxo de duas fases, óleo e água, é utilizado o esquema explícito para o VOF; método SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade; ‘Least Squares Cell Based’ para a discretização espacial do gradiente; ‘PRESTO!’ para a discretização espacial da pressão; ‘Second Order Upwind’ para a discretização espacial do momento; e o método de solução ‘Geo-Reconstruct’ para a discretização espacial da fração volumétrica. Para a formulação transiente foi escolhido a opção ‘First Order Implicit’.

Na abordagem VOF, o número de incógnitas aumenta de três ( $u$ ,  $v$  e  $p$ ) para cinco ( $u$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $\alpha_o$  e  $\alpha_w$ ), são necessárias portanto cinco equações [(“momentum” em  $x$ ), (“momentum” em  $y$ ), (3), (4) e (5)], as quais são resolvidas em cada elemento da malha do domínio discretizado.

Um parâmetro importante para obter convergência mediante a abordagem explícita de solução, é o número de *Courant* ( $C_o$ ), que é definido como  $C_o = V \Delta t / \Delta x$ , onde  $V$  é a velocidade média do fluido,  $\Delta t$  é passo de tempo e  $\Delta x$  o tamanho de um elemento representativo da malha. O número de *Courant* não deve exceder 0,5 para garantir a convergência.

Um teste de malha é realizado monitorando a posição da interface para escolher a discretização mais apropriada. Com isso, o domínio contínuo é dividido em 24.000 elementos. Na Fig. 6 é apresentado o grau de refinamento da malha com destaque à região da constricção.

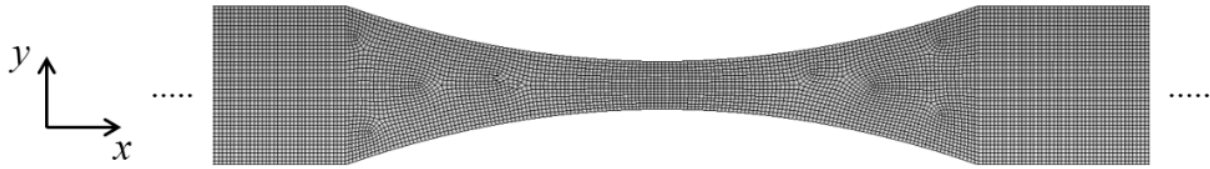


Fig. 6. Detalhe da discretização do domínio contínuo na constrição do microcanal 2D.

Tabela 1. Casos estudados e parâmetros adimensionais correspondentes.

Casos	$\mu_R$	$C_a$	$Re$	$D_{R1}$	$D_{R2}$
1	1	0,03	55	0,8	1,0
2	1	3,00	55	0,8	1,0
3	100	0,03	55	0,8	1,0
4	100	3,00	55	0,8	1,0
5	1	0,03	55	0,8	0,3
6	1	3,00	55	0,8	0,3
7	100	0,03	55	0,8	0,3
8	100	3,00	55	0,8	0,3

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como apresentado na Fig. 3, o aumento do número de capilaridade  $C_a$  resulta em diminuição da saturação de óleo residual. Este aumento do  $C_a$  pode ser obtido pela diminuição da tensão interfacial  $\sigma$  promovido pela injeção de surfactantes, por exemplo. No problema em estudo, o resultado numérico do deslocamento da gota de óleo é ilustrado nas Figs. 7 e 8, para o microcanal reto, e nas Figs. 9 e 10, para o microcanal com garganta, para diversos passos de tempos  $\Delta t$ . Em todas as figuras é apresentado o campo de pressão em Pascal (Pa).

A tabela 1 mostra os casos estudados para ambas as geometrias definidas na Fig. 4. Os casos 1, 2, 3 e 4 são referentes ao microcanal reto, enquanto que os casos 5, 6, 7 e 8 tratam do microcanal com garganta. O parâmetro  $D_{R1}$  manteve o mesmo valor de 0,8 para ambas geometrias. Já o parâmetro  $D_{R2}$  é 1,0 para o microcanal reto (em que  $D_g = 1,0$  mm), e 0,3 para o microcanal com garganta (em que  $D_g = 0,3$  mm). Estes parâmetros adimensionais foram definidos na seção § 3.

Nas Figs. 7 a 11, a gota de óleo, esférica escoada carregada pela água injetada na entrada do canal em direção à saída, localizado no lado direito. A gota se deforma em maior ou menor intensidade como resposta aos parâmetros adimensionais governantes.

Pode-se observar, nas Figs. 7 e 9, o efeito do número de capilaridade, que é aumentado em 100 vezes de 0,03 para 3, na estabilidade da interface da gota para uma mesma razão de viscosidades ( $\mu_R = 1$ ) para geometrias reta e com garganta respectivamente. Durante o deslocamento da gota quanto maior for o número de capilaridade melhor é a manutenção da interface, enquanto que números de Capilaridade menores provoca a desestabilização da mesma. Para o microcanal com garganta percebe-se que a constrição provoca uma zona de baixa pressão e alta velocidade ocasionando o alongamento da gota. Para o microcanal reto pode-se perceber que a interface tende a adotar uma curvatura negativa na parte posterior da gota a medida em que ocorre o seu deslocamento. Esse efeito é mais evidente para números capilares elevados e principalmente para o microcanal reto. Estudos tem identificado também este tipo de instabilidade em gotas isoladas.

As Figs. 8 e 10 mostram o efeito da razão de viscosidades, aumentada também em 100 vezes, de 1 para 100, na estabilidade da interface da gota para um mesmo número de capilaridade ( $C_a = 0,3$ ) nas duas configurações. Pode-se perceber que o aumento da razão de viscosidades possui um efeito de enrijecer a interface da gota, isto porque a gota é mais viscosa que o meio contínuo carreador.

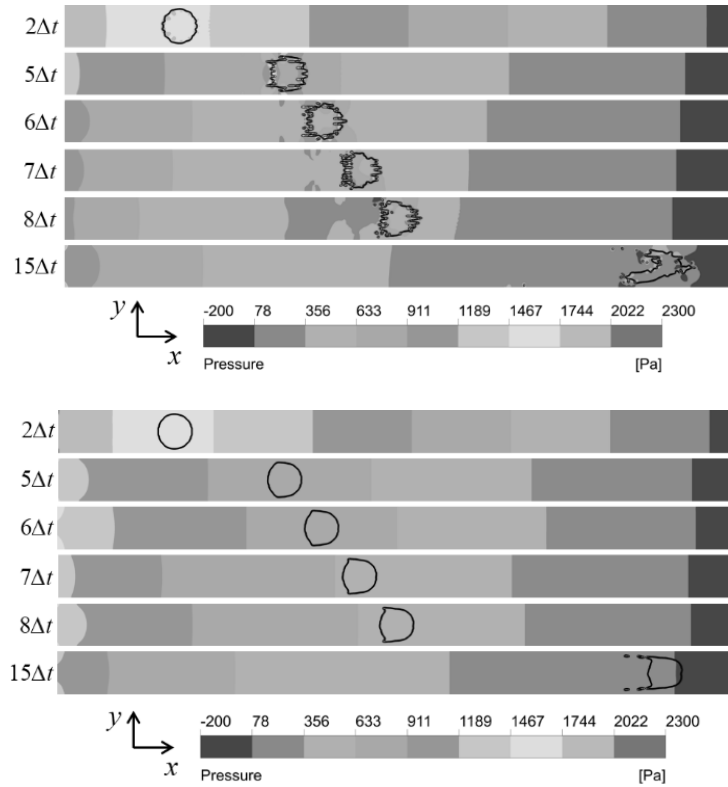


Fig. 7. Efeito do  $C_a$  no avanço da gota de óleo no microcanal reto para o caso 1 (superior) com  $C_a = 0,03$  e para o caso 2 (inferior) com  $C_a = 3,00$ . Os outros parâmetros são mantidos constantes em  $\mu_R = 1$ ,  $D_{R1} = 0,8$  e  $D_{R2} = 1,00$ .

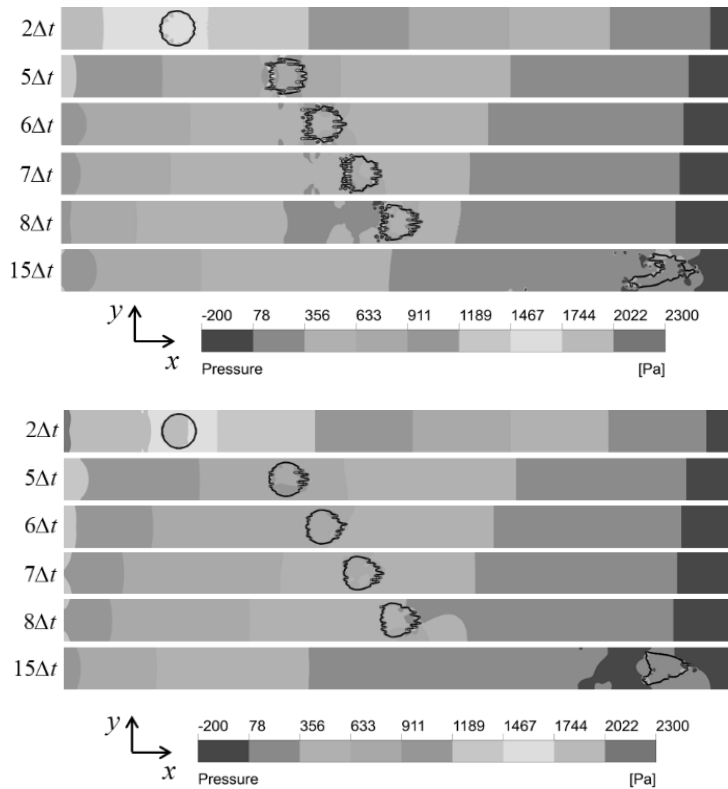


Fig. 8. Efeito da  $\mu_R$  no avanço da gota de óleo no microcanal reto para o caso 1 (superior) com  $\mu_R = 1$  e para o caso 3 (inferior) com  $\mu_R = 100$ . Os outros parâmetros são mantidos constantes em  $C_a = 0,03$ ,  $D_{R1} = 0,8$  e  $D_{R2} = 1,00$ .

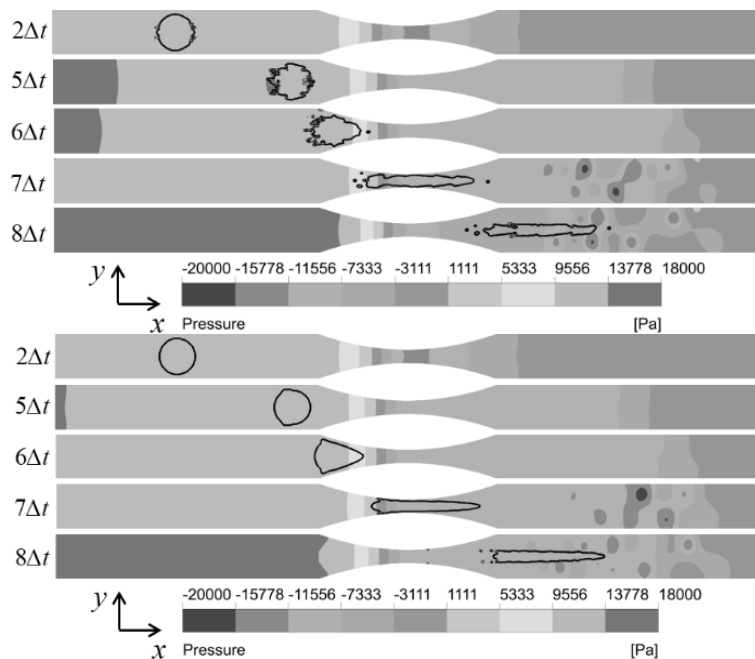


Fig. 9. Efeito do  $C_a$  no avanço da gota de óleo no microcanal com garganta para o caso 5 (superior) com  $C_a = 0,03$  e para o caso 6 (inferior) com  $C_a = 3,00$ . Os outros parâmetros são mantidos constantes em  $\mu_R = 1$ ,  $D_{R1} = 0,8$  e  $D_{R2} = 0,3$ .

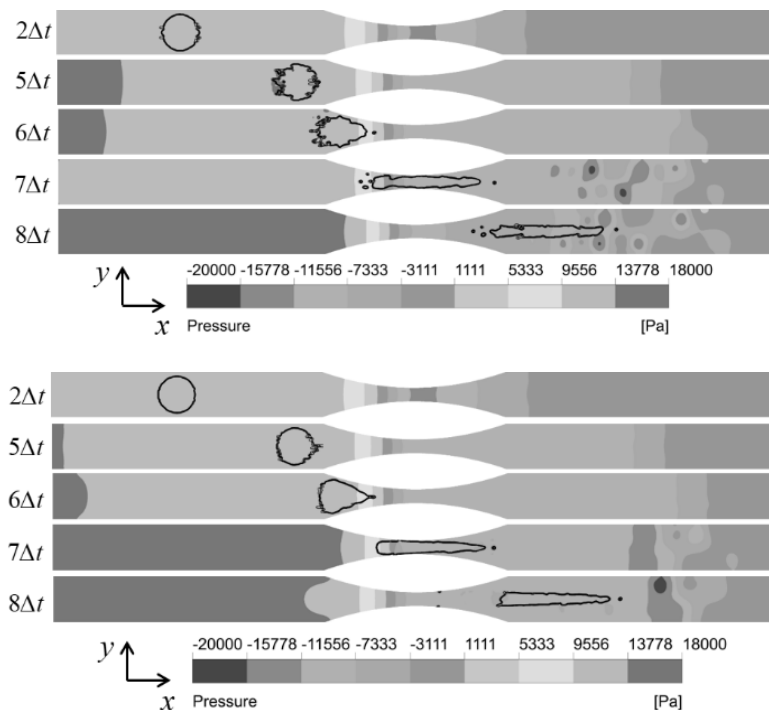


Fig. 10. Efeito da  $\mu_R$  no avanço da gota de óleo no microcanal com garganta para o caso 5 (superior) com  $\mu_R = 1$  e para o caso 7 (inferior) com  $\mu_R = 100$ . Os outros parâmetros são mantidos constantes em  $C_a = 0,03$ ,  $D_{R1} = 0,8$  e  $D_{R2} = 1,00$ .

Na Fig. 11 compara-se a influência da geometria no escoamento da gota de óleo, traduzido através do parâmetro  $D_{R2}$ . A presença da constrição acarreta em uma deformação acentuada da gota nas partes convergente e, principalmente, divergente da geometria. A gota ao se aproximar da constrição exige um incremento acentuado da pressão na entrada (de 1.000 Pa para 10.00 Pa, aproximadamente) para manter a



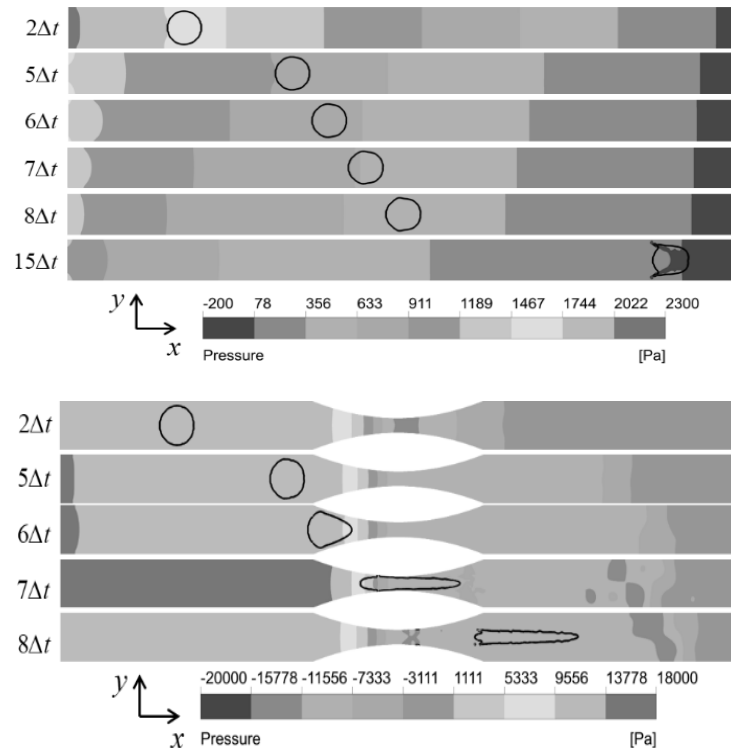


Fig. 11. Efeito da geometria no avanço da gota de óleo para o caso 4 (microcanal reto,  $D_{R2} = 1,0$ , superior) e para o caso 8 (microcanal com garganta,  $D_{R2} = 0,3$ , inferior). Os outros parâmetros são mantidos constantes em  $\mu_R = 100$ ,  $C_a = 3,00$ ,  $D_{R1} = 0,8$ .

velocidade de alimentação constante, e que, em alguns casos práticos valores elevados de pressão são inalcançáveis inviabilizando a operação de injeção de fluidos no reservatório. Como resultado, ao atravessar a constrição há uma aceleração da gota de óleo, mantendo a deformação após atingir a seção reta à jusante da constrição.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com a abordagem VOF para o tratamento do problema bifásico líquido-líquido do escoamento de uma gota de óleo imerso em um meio aquoso, mostra que o número de capilaridade, a razão de viscosidade e a geometria, controlam a dinâmica do escoamento da gota em microcanais através da resposta dos campos de velocidade e pressão. Estudos deste tipo são importantes em recuperação de petróleo, quando emulsões óleo/água formadas espontaneamente por *snap-off* devem ser mobilizadas de tal forma a diminuir a saturação de óleo remanescente no reservatório de petróleo. No contexto do EOR, emulsões são preparadas nas instalações de superfície e injetadas no meio poroso.

Embora a abordagem aqui apresentada trate do escoamento em microescala, seu entendimento tem impacto na escala macroscópica do meio poroso onde fluidos a ser produzidos encontram-se trapeados.

Nas duas configurações do microcanal utilizados, a análise dos resultados permitem concluir que o principal parâmetro atuante para a estabilização da interface da gota de óleo é o número de capilaridade. Enquanto maior seu valor, mais estável a interface é. O efeito do aumento da razão de viscosidade é similar.

Por outro lado, verifica-se que a presença da constrição, mediante o parâmetro  $D_{R2}$ , resulta em um aumento significativo da pressão necessária para escoar a gota de óleo, alterando de forma acentuada a dinâmica do escoamento. A gota de óleo, que tem um diâmetro maior do que a constrição, experimenta uma retenção ao se aproximar da garganta do microcanal, se deformada e é celerada na parte divergente do constrição. A variação axial da pressão, da velocidade e da aceleração da bolha, para uma melhor visualização desta dinâmica será apresentada em um trabalho posterior complementar. Da mesma forma, uma

análise quantitativa pode ser efetuada calculando o fator de retenção  $f$  mediante o quociente entre o diferencial de pressão  $\Delta p$  para os casos monofásico ( $sp$ ) e bifásico ( $tp$ ), isto é  $f = \Delta p_{sp} / \Delta p_{tp}$ .

Refinamentos como a utilização do modelo *Continuous Surface Stress* – CSS para o tratamento da força superficial volumétrica, abordagem acoplada VOF/ função *Level Set*, malha dinâmica com elevado refinamento perto da interface e geometria cilíndrica tridimensional, estão sendo conduzidos para aprimorar estes resultados iniciais.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Professores Daniel da Cunha Ribeiro e Fabio de Assis Ressel Pereira da UFES, pelos comentários referentes ao tratamento do escoamento multifásico no ambiente Fluent. Professor Oldrich Joel Romero agradece à FAPES – Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo, pelo suporte financeiro concedido mediante processo 54.708.508/2011.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Koroteev, D., *Direct hydrodynamic simulation of multiphase flow in porous rock*. International Symposium of the Society of Core Analysts held in Napa Valley, California, USA, 16-19 September (2013)
- [2] Gauglitz, P.A., Radke, C.J., “The dynamics of liquid-film breakup in constricted cylindrical capillaries”, *Journal of Colloid and Interface Science*, **134**, 14–40 (1990)
- [3] Roof, J.G., *Snap-off of oil droplets in water-wet pores*. SPE (1970)
- [4] Deng, W., Cardenas, M.B., Bennett, P.C., “Extended Roof snap-off for a continuous nonwetting fluid and an example case for supercritical CO<sub>2</sub>”, *Advances in Water Resources*, **64**, 34–46 (2014)
- [5] Beresnev, I.A., Deng, W., “Theory of breakup of core fluids surrounded by a wetting annulus in sinusoidally constricted capillary channels”, *Physics of Fluids*, **22** (2010)
- [6] Green, D.W., Willhite, G.P., *Enhanced oil recovery*. SPE Textbook (1998)
- [7] Romero, O.J., Fejoli, R.F., “Utilização de espuma como mecanismo de controle da mobilidade em rochas-reservatório”. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. In press. doi:10.1016/j.rimni.2014.06.006. Available online 12 March 2015 (2015)
- [8] Payatakes, A.C., “Dynamics of oil ganglia during immiscible displacement in water-wet porous media”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **14**, 365–393 (1982)
- [9] Morais, C.L., Romero, O.J., Ribeiro, D.C., Pereira, F.A.R., “Influência das forças viscosas e de capilaridade na saturação de óleo residual contido em um microcanal com obstruções”. *Petro & Química*, In press (2015)
- [10] Didier, E., “Simulação numérica de escoamentos com superfície livre”, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, **11**(3), 03-18 (2007)
- [11] Hirt, C.W., Nichols, B.D., “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”, *Journal of Computational Physics*, **39**, 201-225 (1981)
- [12] *Fluent User’s Guide*. ANSYS Fluent 14.5 (2012)
- [13] Brackbill, J.U., Kothe, D.B., Zemach, C., “A continuum method for modeling surface tension”, *Journal of Computational Physics*, **100**, 335–354 (1992)

### FLOW OF OIL DROPS THROUGH STRAIGHT AND CONSTRICTED MICROCHANNELS

**Abstract** – A dominant mechanism for oil trapping in porous media is the snap-off, defined as the disconnection of a continuous flow of fluid as it passes through canyons and pore constrictions satisfying a criterion based on capillary pressure imbalance. In this paper is investigated the dynamic of an oil drop immersed in water flowing through a microchannel formed by two parallel plates. To understand the effect of the geometry on microflow, a second configuration formed by two parallel plates with a throttling, is also used. The two-dimensional, transient, incompressible, Newtonian, two-phase flow considered here, represents in simplified form, which occurs in the oil reservoir on the microscopic scale during mobilization of the oil droplets formed by the snap-off mechanism. The numerical solution of the problem with liquid-liquid interface is obtained by

Volume of Fluid (VOF) approach. The results, although qualitative, are extremely encouraging and show that the dynamics of the motion of the oil drop in the geometries is controlled by capillarity number, viscosity ratio and geometrical parameters. The oil drop deforms to a greater or lesser degree in response to the dominant forces. The presence of the constriction significantly increases the pressure field as also the flow velocity of the droplet in the throat.

**Keywords** – Two-phase flow, Microchannel, Constriction, Surface tension, Fluent.