

DINÂMICA DA FORMAÇÃO DE GOTAS NA CONFIGURAÇÃO CROSS-JUNCTION

Jonathan Ribeiro Martins (UFES) E-mail: jonathan_ribeiro@hotmail.com
Oldrich Joel Romero (UFES) E-mail: oldrich.romero@ufes.br

Resumo: É apresentado o estudo numérico da formação de gotas de óleo, que é o fluido disperso, em água, fluido contínuo, utilizando a geometria *cross-junction* plana. As simulações deste escoamento envolvendo dois fluidos viscosos, incompressíveis e imiscíveis em regime laminar e transiente são conduzidas no *software* Ansys Fluent com o método *Volume of Fluid* – VOF e as modelagens *Continuum Surface Force* – CSF e *Continuum Surface Stress* – CSS para incorporar os efeitos interfaciais. Os resultados obtidos, os quais são coerentes com a literatura, mostram que a formação de gotas depende de fatores como propriedades dos fluidos, condições operacionais, tipo de geometria e parâmetros numéricos. A formação das gotas ocorre na junção dos dois canais perpendiculares que formam a geometria *cross-junction*, quando as forças originadas pela pressão ultrapassam a resistência oferecida pela tensão interfacial entre os fluidos. Para as condições utilizadas, as gotas de óleo formadas são maiores do que o canal principal que as contém apresentando tamanho e espaçamento constante. Os efeitos interfaciais e a maior viscosidade do fluido disperso originam aumento e diminuição local da pressão.

Palavras-chave: formação de gotas, *cross-junction*, *volume-of-fluid*, escoamento bifásico, microcanais.

DYNAMICS OF DROPLETS FORMATION IN A CROSS-JUNCTION CONFIGURATION

Abstract: *The numerical study of oil in water droplets formation in a cross-junction configuration is presented in this work. The oil is a dispersed phase and the water is the continuous phase. The numerical simulation of this microflow involving two viscous, incompressible and immiscible fluids in laminar and transient regime is conducted in the Ansys Fluent software with volume of fluid – VOF approach, and Continuum Surface Force – CSF and Continuum Surface Stress – CSS models. The results are coherent with literature validating the methodology employed in this work. The droplet formation occurs in the junction when forces originated by the pressure are higher than the resistance offered by the interfacial forces. The droplets are bigger than the width of the channel and presents regularity in size and spacing. The interfacial effects and high oil viscous results in oscillating behavior of the pressure.*

Keywords: *droplets formation, cross-junction, volume-of-fluid, two phase flow, microchannels.*

1. INTRODUÇÃO

A microfluídica pode ser definida como a ciência e engenharia de sistemas com dimensões micrométricas, na qual o comportamento dos fluídos difere da teoria tradicional para domínios macroscópicos, como o comportamento de fluidos em microcanais (aproximadamente de 10 μm até 500 μm). A microfluídica pode ser explorada para uma variedade de aplicações científicas e tecnológicas, como fabricação de DNA, cristalização de proteínas, formação de gotas e gotas, etc. Devido a este motivo, há a necessidade de maior discussão sobre os efeitos desta escala (LIH e MIAO, 2015).

Segundo Garstecki *et al.* (2006), a utilização de fluidos imiscíveis e a formação controlada de gotas em microescala oferece novas possibilidades para sistemas que realizam reações químicas, utilizando pequenos volumes de reagentes, como também para a formação de emulsões. Para estas aplicações é importante controlar exatamente a geometria dos microcanais para a geração de gotas, algumas delas são mostradas na Figura 1.

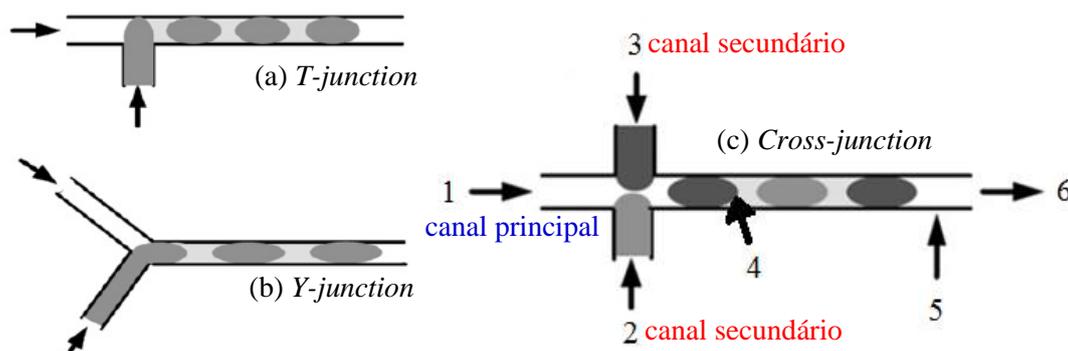


Figura 1 – Alguns dos métodos de produção de gotas. Na geometria do tipo *cross-junction*: 1 – entrada onde é injetado o fluido contínuo; 2 e 3 – entrada onde é injetado o(s) fluido(s) disperso(s); 4 – interface entre os fluidos; 5 – parede da geometria; e 6 – saída da geometria). Fonte: Shui *et al.* (2007).

Na geometria tipo *cross-junction*, representada na Figura 1c, um fluido que vem a formar a fase contínua é injetado pelo canal principal, um segundo fluido que vem a formar a fase dispersa é injetado pelo canal secundário. Os fluidos podem ser líquido/líquido ou gás/líquido, por tanto suas propriedades, além da geometria por onde escoam e as condições operacionais como pressões e/ou vazões são importantes na formação, tamanho, espaçamento, frequência e regularidade das gotas. Quando se aborda o problema desde uma perspectiva numérica surgem uma série de condicionantes tais como tamanho do elemento, passo de tempo, algoritmos numéricos, tolerância, número de iterações, dentre outros, que permitem a obtenção da solução convergida e representativa.

Este estudo investiga numericamente o processo de formação de gotas na geometria *cross-junction* (Figura 1c). A solução do problema líquido/líquido é obtida com auxílio do software comercial *Ansys Fluent* com o método *Volume of Fluid* – VOF e dois modelos para incorporar os efeitos interfaciais. Nos casos apresentados água é injetada no canal principal e vem a ser a fase contínua, nos dois canais secundários é injetado óleo que é a fase dispersa, resultando assim gotas de óleo em água que tem uma certo tamanho e frequência de formação. O escoamento na junção é por tanto simétrico.

Estudos de escoamentos bifásicos de fluidos imiscíveis em microcanais resolvidos com uma metodologia de solução similar ao aqui abordado, são encontrados em Lamine Diouf e Romero (2016), Morais *et al.* (2016), Santos *et al.* (2016), Coelho *et al.* (2016) e Romero e Fejoli (2015).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Especificação do problema

Nesse estudo a geometria utilizada é a *cross-junction* plana formada por dois microcanais perpendiculares que originam três canais de entrada de comprimentos $3h$ e um de saída de $36h$ (Figura 2). O canal principal possui comprimento h e os outros dois $h/2$ (SHUI *et al.*, 2007). Os três canais se encontram na junção onde as gotas são formadas. Em todo o trabalho $h = 0,1$ mm.

Água com viscosidade (μ_w) de 1 cP (1 mPa.s) é injetada na entrada 1, e óleo com viscosidade (μ_o) de 10 cP (10 mPa.s) nas entradas 2 e 3, ambos movimentam-se ao longo de seus respectivos canais até encontrar a junção onde as gotas de tamanho l e normalmente com diâmetro maior que a largura h do canal são formadas. Estas gotas são arrastadas ao longo dos $36h$ do canal principal. As massas específicas da água (ρ_w) e do óleo (ρ_o) são, respectivamente

1.000 kg/m³ e 900 kg/m³. Os fluidos viscosos e incompressíveis são imiscíveis apresentando por tanto uma tensão interfacial ($\sigma_{w/o}$) que neste caso é constante é igual a 0,0003 N/m.

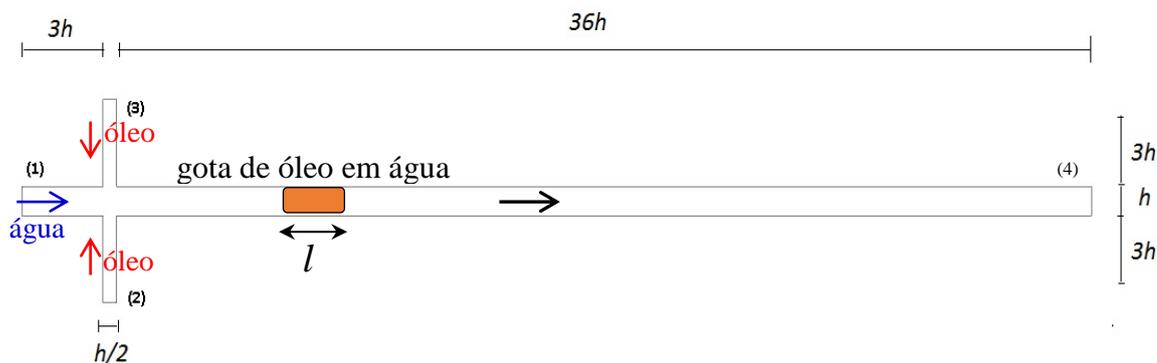


Figura 2 – Geometria cross-junction utilizada para a formação de gotas de comprimento l . Fonte: Adaptado de Shui *et al.* (2007).

2.2. Solução do problema líquido/líquido

As frações volumétricas da água e do óleo, ambas variando entre 0 e 1, são determinadas em cada ponto do domínio e para diversos instantes de tempo utilizando o modelo multifásico *Volume of Fluid* – VOF (HIRT E NICHOLS, 1981). Este modelo resolve as equações de conservação da massa, Equação (1), da quantidade de movimento, Equação (2), e a fração volumétrica da fase menos densa, neste caso óleo, Equação (3).

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{f}_{int}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_o \rho_o) + \nabla \cdot (\alpha_o \rho_o \vec{v}) = 0, \tag{3}$$

\vec{v} é o vetor velocidade e p é a pressão que são compartilhados pelas duas fases. A somatória das frações volumétricas das fases água “w” e óleo “o” é unitária, $\alpha_w + \alpha_o = 1$. Como α_o é determinada da Equação (3) a fração volumétrica da água α_w é igual a

$$\alpha_w = 1 - \alpha_o. \tag{4}$$

Na Equação (2), ρ e μ são, respectivamente, a massa específica e a viscosidade dos fluidos em todo o domínio, sendo determinadas de

$$\rho = \alpha_w \rho_w + \alpha_o \rho_o, \tag{5}$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + \alpha_o \mu_o, \tag{6}$$

com ρ_w a massa específica da água. Adicionalmente, na Equação (2) \vec{g} é a aceleração da gravidade, $\nabla\vec{v}$ é o tensor gradiente de velocidade e \vec{f}_{int} o termo fonte que introduz os efeitos interfaciais para o qual existem duas modelagens. A primeira, a modelagem *Continuum Surface Force* – CSF, desenvolvido por Brackbill *et al.* (1992) é expresso por

$$\vec{f}_{int} = \sigma_{w/o} \frac{\rho\kappa\nabla\alpha_o}{\frac{1}{2}(\rho_w + \rho_o)}, \quad (7)$$

κ é a curvatura da interface. A segunda modelagem para o termo fonte é conhecida com *Continuum Surface Stress* – CSS

$$\vec{f}_{int} = \nabla \cdot T_{int}, \quad (8)$$

T_{int} o tensor de tensões superficiais representada pela relação $T_{int} = \sigma \left(|\nabla\alpha|I - \frac{\nabla\alpha \otimes \nabla\alpha}{|\nabla\alpha|} \right)$, com I o tensor unitário e σ é o coeficiente de tensão superficial.

As condições de contorno utilizadas neste problema e que definem o domínio de solução, de acordo com a Figura 2, são:

- Na entrada 1 considera-se a velocidade média da água como sendo igual a 0,001 m/s, nas entradas 2 e 3 a velocidade média de injeção de óleo é 0,0007 m/s;
- No plano de saída 4 a pressão é considerada nula;
- Nas paredes considera-se impermeabilidade e não-escorregamento com o ângulo de adesão igual a 0 rad, significando que a água é o fluido molhante; e
- Na interface é utilizada a Equação (7) ou a Equação (8), a depender da situação analisada.

Como condição inicial tem-se que o domínio é preenchido completamente por água e em repouso.

2.3 Parâmetro adimensionais

- a) A tensão interfacial é uma propriedade importante que contribui para a forma adotada pela interface e em muitos casos a convergência do processo iterativo de solução é função do seu valor (COELHO *et al.*, 2016). Em termos adimensionais o importante é determinar o quão dominante uma força é em relação à outra. Em problemas desta natureza o número de capilaridade Ca , traduz a relação entre as forças viscosas com as forças de capilaridade mediante $Ca = \frac{\mu_w V_m}{\sigma_{w/o}}$.
- b) A razão entre as viscosidades do óleo e da água pode ser representada através do fator adimensional razão de viscosidades por $\mu_R = \frac{\mu_o}{\mu_w}$.
- c) O número de Reynolds, Re , traduz a relação entre as forças de inércia representadas pelo grupo $\rho_w V_m h$, com as forças viscosas do fluido deslocante que é a água. A expressão é $Re = \frac{\rho_w V_m h}{\mu_w}$, onde h é a longitude característica escolhida para representar o fluxo. Em todas as simulações realizadas neste trabalho o número de Reynolds é menor do que 1 significando que as forças de inercia são praticamente insignificantes.

- d) A forma com a qual as gotas são formadas ao longo do canal é fortemente influenciada pelo ângulo de adesão (θ) dos fluidos em contato com a superfície sólida do canal. Sendo assim, a molhabilidade (ou ângulo de adesão) indica qual fase tem preferência em molhar/aderir as paredes da superfície sólida. Segundo Jamaloei (2009) um ângulo de adesão zero indica completa molhabilidade da fase mais densa (no presente trabalho, água), π indica completa molhabilidade da fase menos densa (óleo) e um ângulo de $\pi/2$ rad que nenhuma fase molha preferencialmente a outra.
- e) A razão de vazões entre as fases óleo e água, q_o e q_w , é $q_R = \frac{q_o}{q_w}$.
- f) Para representar o tempo de simulação t por t_D foi desenvolvido um equacionamento que leva em consideração a velocidade do fluido que se desloca na entrada. Para isto, é considerado que o fluido se desloca a uma velocidade média V_m prescrita na entrada relativa à injeção de água (entrada 1) ao longo do canal de comprimento $L = 36h = 3,6 \text{ mm} = 0,0036 \text{ m}$, que de forma geral tem porosidade ϕ , de modo que $t_D = \frac{V_m t}{\phi L}$, onde $\phi = 1$, uma vez que todo o domínio está preenchido com fluidos.
- g) De acordo com Garstecki *et al.* (2006) o comprimento l (Figura 2) das gotas depende da razão de vazões, da largura h do canal principal e da constante α que depende da geometria $\frac{l}{h} = 1 + \alpha q_R$.
- h) Um dos principais parâmetros descritos na literatura para obter a solução convergida com a abordagem explícita em problemas dependentes do tempo é o número de Courant (C_o) definido por $C_o = \frac{V_m \Delta t}{\Delta x}$, onde V_m é a velocidade média do fluido na entrada e Δx é o tamanho de um elemento representativo da malha. Desta equação e utilizando a notação para o passo de tempo no contexto de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) tem-se $\Delta t_{CFL} = \frac{C_o \Delta x}{V_m}$. O número de Courant deve ser menor do que 1,0 para garantir a convergência do processo iterativo de solução (BETHKE, 2008). Para destacar os efeitos da tensão interfacial e viscosidade, outras propostas para a seleção do passo de tempo existem na literatura. Conforme apontado por Vigneaux *et al.* (2008) e aplicado nos trabalhos de Santos *et al.* (2016) e Coelho *et al.* (2016), além da condição de CFL existem outras propostas para determinar o passo de tempo envolvendo a tensão interfacial água/óleo, um deles é o de Brackbill *et al.* (1992) que estabelece o passo de tempo capilar como sendo função, além da propriedade da interface, da massa específica da água $\Delta t_B = \left(\frac{\rho_w \Delta x^3}{2\pi \sigma_{w/o}} \right)^{0,5}$. Outra restrição é a correlação proposta por Vigneaux *et al.* (2008) para escoamentos com número de Reynolds baixos e médios, onde ao invés da massa específica é calculada utilizando a viscosidade μ_w , desta forma $\Delta t_V = \frac{\mu_w \Delta x}{\sigma_{w/o}}$.

Os parâmetros governantes principais para os dois cenários estudados são apresentados na Tabela 1. O número de capilaridade é muito baixo indicando predominância das forças oriundas da tensão interfacial. A razão de vazões e a razão de viscosidades são selecionadas de acordo com dados da literatura. Como o problema na prática não é turbulento, os efeitos de inercia são menores do que os viscosos, o qual é traduzido pelo número de Reynolds menor do que 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nos dois casos simulados.

Cenários	Ca	q_R	μ_R	Re	Modelagem
1	0,0033	0,175	10	0,1	CSF
2	0,0033	0,175	10	0,1	CSS

2.4. Abordagem numérica

2.4.1 Algoritmos de discretização

As equações governantes, especificadas na subseção §2.2, são resolvidas utilizando o *software* comercial *Ansys* Fluent com o método *Volume of Fluid* – VOF para captura da interface. É utilizado volumes finitos com arranjo co-localizado das variáveis (velocidades, pressão e fração volumétrica) para transformar as equações governantes em equações algébricas. No procedimento são necessários algoritmos de acoplamento pressão-velocidade para obter o campo de pressão.

Neste trabalho é utilizado o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked*). Os esquemas PRESTO! (*PRESSure STaggering Option*) e *Second Order Upwind* são empregados na interpolação da pressão e da velocidade, respectivamente. Para a avaliação dos gradientes é utilizado o método de mínimos quadrados em cada célula (*Least Squares Cell Based*) que, para malhas não estruturadas, é bastante preciso e menos dispendioso computacionalmente se comparado a outros métodos. Por fim, de modo a melhorar a definição das interfaces utiliza-se o método *Geometric Reconstruction (Geo-Reconstruct)* de Pan *et al.* (2015).

2.4.2. Discretização do domínio e seleção da malha

A escolha do tamanho do passo de tempo é norteada pelo condição de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) e verificada pelos tempos capilar e de Vigneaux.

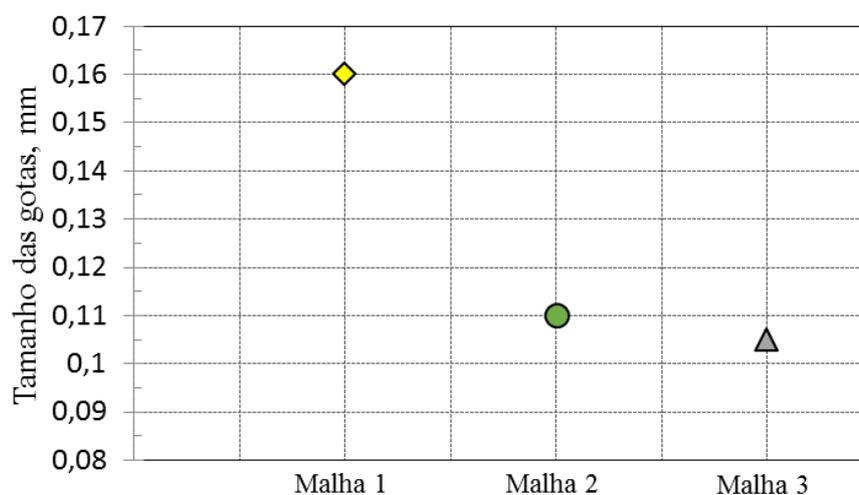


Figura 3 – Relação entre os tamanhos das gotas formadas com cada uma das três malhas selecionadas.

O teste de independência de malha é realizado comparando o tamanho das gotas mediante a equação de Garstecki *et al.* (2006), para a escolha do nível de refinamento apropriado. São utilizadas as malhas 1, 2 e 3 com 2.125, 4.250 e 8.500 elementos respectivamente, geradas com o *software Meshing* também da família *Ansys*. O resultado da comparação é apresentado na Figura 3. A malha 1, que é a menos refinada apresenta o maior tamanho de gota. Já as malhas 2 e 3 apresentam respostas muito próximas, porém, a malha 3 por ser mais refinada exige um maior tempo de simulação, logo, através desta consideração escolhe-se a malha 2 para ser utilizada neste trabalho. As características da malha selecionada são detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros da discretização do domínio.

Parâmetros	Valor
Número de nós	4.728
Número de elementos	4.250
Tamanho mínimo do elemento, mm	0,001
Tamanho máximo do elemento, mm	0,01

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de formação de gotas na geometria *cross-junction* é visualizada utilizando campos de fração volumétrica para diversos instantes de tempo e figuras cartesianas da pressão variando com a posição e com o tempo.

Figura 4 apresenta os campos de fração volumétrica em todo o domínio e para cinco instantes de tempo representativos.

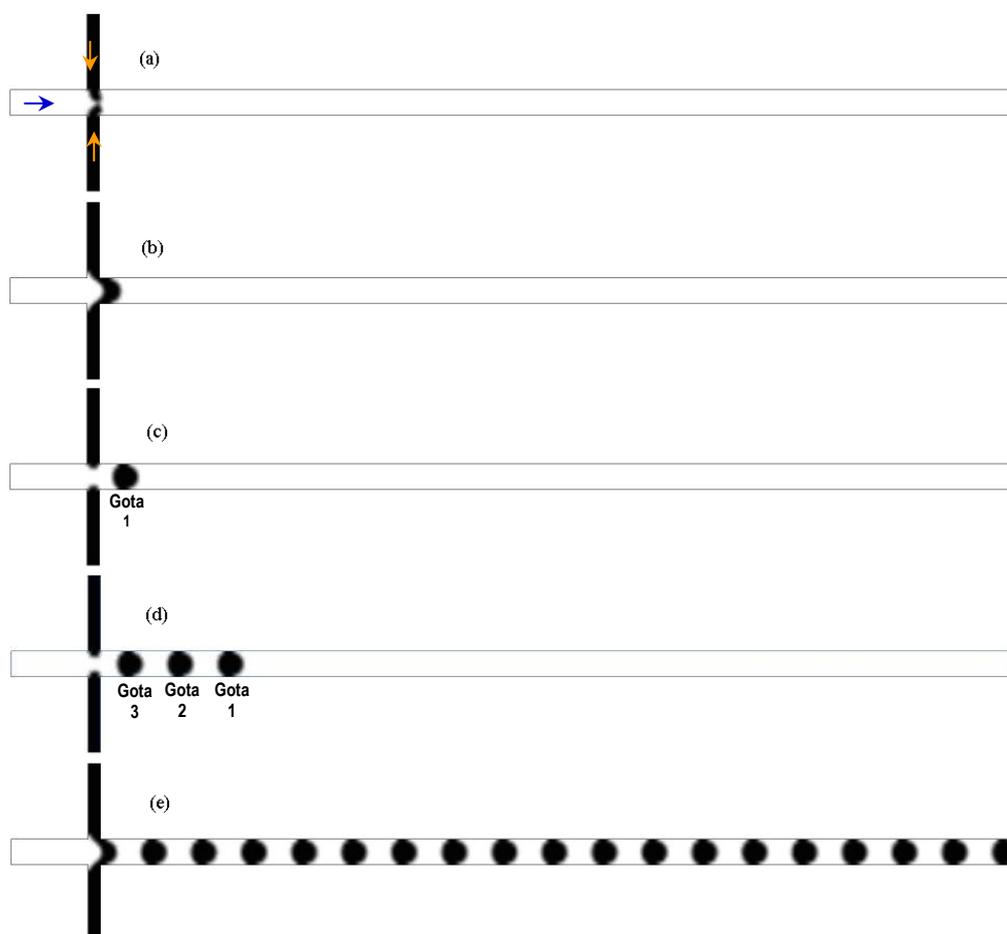


Figura 4 – Processo de formação de gotas de óleo em água na geometria *cross-junction* utilizando a modelagem CSF nos tempos (a) 0,48s, (b) 0,52s, (c) 0,56s, (d) 0,8s e (e) 2,7s.

Na Figura 4a, a água, representada pela branca, preenche o canal principal, enquanto que o óleo, representada pela cor preta e injetado pelos dois canais secundários começa a invadir o canal principal na junção. Durante este processo as pressões aumentam e diminuem conforme mostrado nas Figuras 5 e 6.

Na Figura 4b, o óleo preenche completamente o canal principal dificultando o escoamento da água. Como resultado a pressão é elevada no canal principal e maior ainda nos canais secundários (Figura 5b).

Na Figura 4c, a competição entre as forças originadas pela pressão, que tendem a quebrar a continuidade da fase óleo, e as forças de capilaridade, que resistem a esta quebra, são vencidas pelas primeiras originando a primeira gota de óleo imersa em água (gota 1). A fase óleo, continua até então, se separa em uma parte dispersa, a gota que formada flui em direção ao plano de saída do canal principal, e em uma parte que permanece contínua e que logo após a formação da gota se retrai ficando confinada no canal secundário. Como a injeção dos fluidos é constante, o processo descrito se repete com uma periodicidade notória. O formato arredondado da gota é consequência da elevada viscosidade do óleo em relação à viscosidade da água e da razão de vazões escolhida.

O processo repetido três vezes resulta nas gotas 1, 2 e 3, da Figura 4d, que são do mesmo tamanho e encontram-se igualmente espaçadas. Na Figura 4e observa-se que ao longo de um grande intervalo de tempo este processo gera gotículas de tamanhos uniforme e com uma notória regularidade.

Nos três planos de entrada as vazões são prescritas por tanto a pressão deve se ajustar para atender esta condição. Como ilustrado na Figura 5, o campo de pressão do sistema apresenta esta resposta. Aumenta quando o óleo invade o canal principal (Figuras 5a, 5b) e diminui após a formação da gota (Figura 5c).

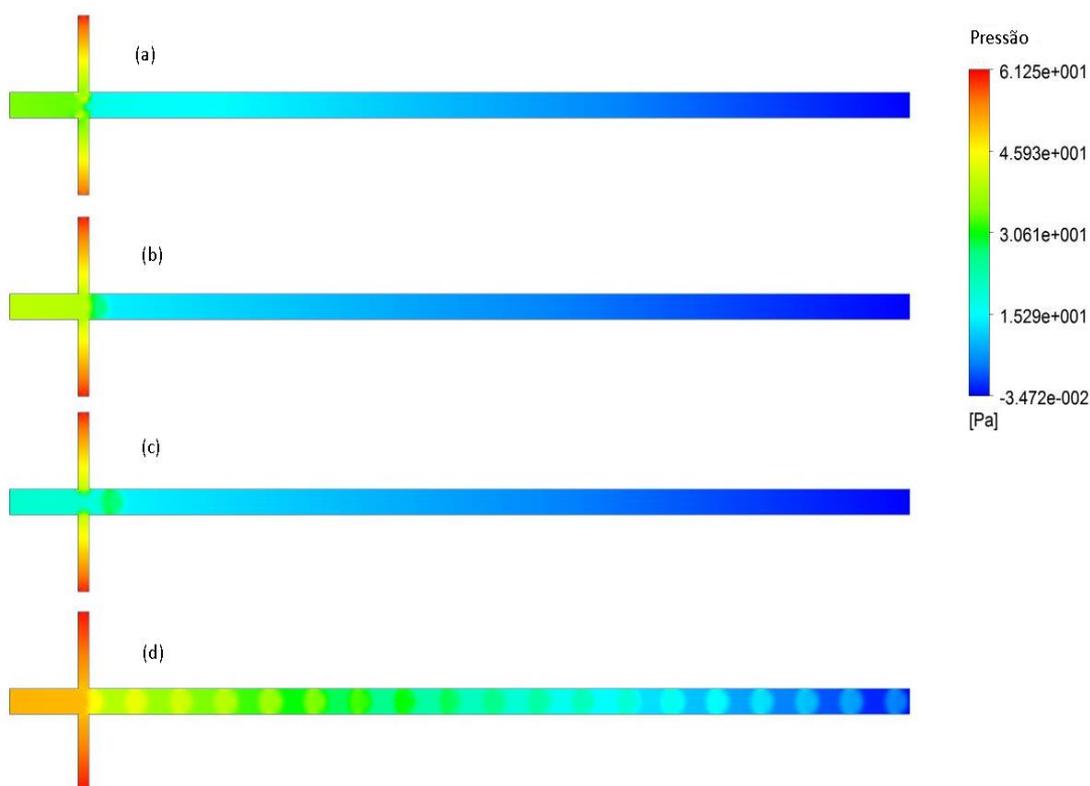


Figura 5 – Pressão em todo o sistema da Figura 3a, nos tempos de (a) 0,48s, (b) 0,52s, (c) 0,56s e (d) 2,7s.

O instante em que o óleo começa a invadir e preencher uma seção do canal principal e faz com que a pressão na entrada 1 aumente, é observado na Figura 5a. Na Figura 5b, o óleo termina de restringir toda esta seção do canal principal e a gota começa a se formar, a pressão na entrada 1 aumenta ainda mais, assim empurrando a gota emergente e fazendo com que ela se quebre. Na Figura 5c, com a gota já formada a pressão a montante acaba diminuindo pois o fluxo de água na entrada 1 empurra a gota que está dispersa. Na Figura 5d 19 gotas estão já

formadas, como o óleo é dez vezes mais viscoso que a água, a pressão exigida para mobilizar as gotas é cada vez mais elevada. Este detalhe é capturado na Figura 7. Para os mesmos fluidos e condições operacionais, a quantidade de gotas formadas é função do comprimento do canal.

Para melhor ilustrar a variação da pressão pela presença das gotas, foi traçado uma linha no centro do canal principal até a distância $10h$ para o instante de tempo $0,8s$ que corresponde à configuração com três gotas apresentada na Figura 4d. Nesta linha é graficada a pressão para um instante de tempo fixo, o resultado é observado na Figura 6. A pressão no plano de entrada é a mais elevada e diminui no sentido do escoamento, entretanto aumenta no local das gotas atingindo um máximo local para diminuir novamente. Este aumento da pressão é resultado do efeito capilar nos meniscos a jusante e a montante das gotas e da sua maior viscosidade.

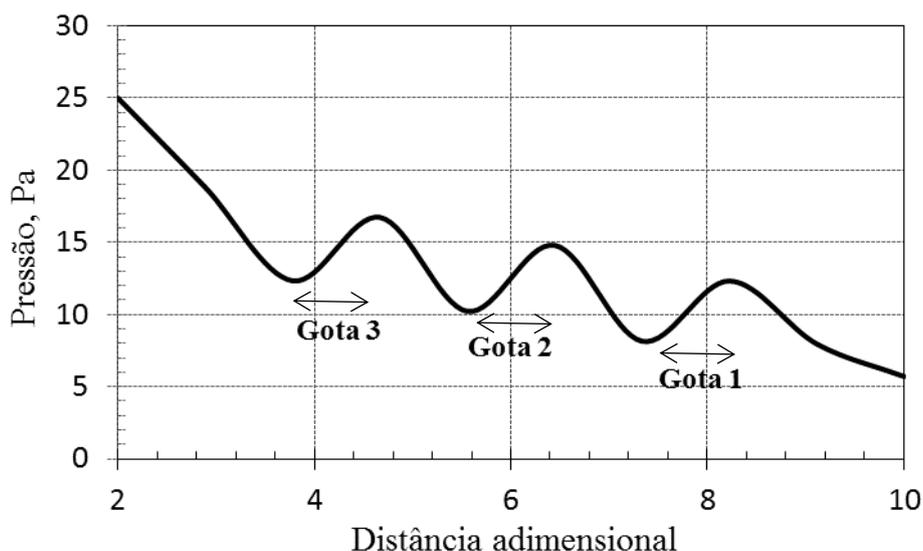


Figura 6 – Pressão ao longo da linha axial do canal principal no tempo de $0,8s$ que corresponde à configuração da Figura 4d.

Por outro lado, a pressão para uma posição fixa tende a aumentar com o tempo. Este comportamento é verificado na Figura 7, que apresenta a pressão no plano de entrada do canal principal para o tempo de simulação em que 19 gotas são formadas e encontram-se contidas no canal de acordo com a disposição da Figura 4e.

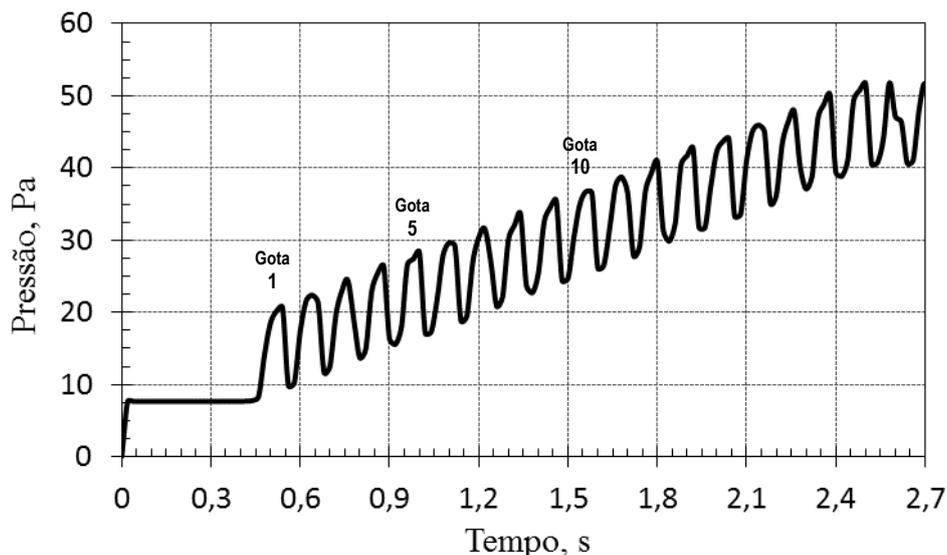


Figura 7 – Pressão no plano de entrada do canal principal variando com o tempo.

Até 0,5 s a pressão é constante, é o tempo necessário para os fluidos atingirem a junção. A gota 1 se forma entre 0,5 s e 0,55 s, aproximadamente, a pressão aumenta e diminui neste intervalo. Após isso a pressão registra um aumento linear por um breve intervalo de tempo, de 0,57 s a 0,58 s, aproximadamente. Este intervalo corresponde ao deslocamento da gota 1 já formada e o tempo em que a gota 2 começa a se formar na junção. O processo é repetido para cada gota formada, entretanto como mais gotas do óleo mais viscoso é introduzido no canal principal, a pressão exigida para seu deslocamento em direção ao plano de saída cresce oscilando.

A fim de comparar a resposta dos modelos que descrevem os efeitos interfaciais é considerado também a proposta *Continuum Surface Stress* – CSS (caso 2 da Tabela 1). Como mencionado, esta modelo possui algumas vantagens em relação ao *Continuum Surface Force* – CSF (caso 1) o que é evidente quando a tensão superficial é variável ou se a geometria é complexa. Os resultados utilizando a modelagem CSS são praticamente iguais ao CSF. Os campos de fração volumétrica e pressão são similares aos das Figuras 4 e 5, por tanto não são repetidos. Isto ocorre porque a geometria *cross-junction* não tem regiões com cantos afiados que distorcem a malha e porque a tensão superficial é constante. Logo, com os parâmetros selecionados, nesta simulação poderá ser utilizado tanto a modelagem CSF quanto a CSS.

4. CONCLUSÕES

Através deste estudo, que se refere ao processo de formação de gotas de óleo/água utilizando a geometria *cross-junction* plana, as seguintes conclusões são destacados:

- a) A metodologia utilizada fundamentada na aplicação do *software Ansys Fluent* com o método *Volume of Fluid* se mostrou eficiente e coerente para descrever o processo de formação de gotas;
- b) A formação de gotas depende de fatores como propriedades dos fluidos, condições operacionais, tipo de geometria e parâmetros numéricos. Estes devem ser avaliados, controlados e traduzidos através de parâmetros adimensionais, que neste caso são a razão de viscosidades, razão de vazões, número de capilaridade, número de Reynolds e ângulo de contato;
- c) A quebra das gotas ocorre na junção entre os dois canais perpendiculares, quando as forças originadas pela pressão ultrapassam a resistência oferecida pela tensão interfacial;
- d) As gotas formadas são maiores do que o canal principal onde estão contidas e apresentam tamanho e espaçamento que se mantem constante ao longo do tempo;
- e) A pressão, para um tempo fixo, diminui oscilando em direção do plano de saída. Estas oscilações são resultado da pressão capilar originados nos meniscos a montante e jusante das gotas, e também devido a sua maior viscosidade;
- f) A pressão, para uma posição fixa, aumenta oscilando com o tempo. Isto ocorre, como descrito em (e), pela elevada pressão capilar e viscosidade das gotas;
- g) Para as condições consideradas neste estudo as modelagens *Continuum Surface Force* – CSF e *Continuum Surface Stress* – CSS apresentam resultados praticamente iguais, não possuindo assim nenhuma vantagem de um modelo sobre o outro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Ufes por permitir a utilização das instalações do Laboratório de Simulação Numérica em Engenharia de Petróleo para desenvolver esta atividade acadêmica.

REFERÊNCIAS

- ANSYS FLUENT.** *User's Guide, ANSYS Fluent 15, 2015.*
- BETHKE, C. M.** *Geochemical and Biogeochemical Reaction Modeling. Second Edition. Cambridge University Press, p. 297, 2008.*
- BRACKBILL, J. U.; KOTHE, D. B.; ZEMACH, C.** *A continuum method for modeling surface tension. Journal of Computational Physics, v. 100, p. 335-354, 1992.*
- COELHO, J. K.; PENA, M. D.; ROMERO, O. J.** *Pore-scale modeling of oil mobilization trapped in a square cavity. IEEE America Latina, aceito, 2016.*
- GARTESCKI, P.; FUERSTMAN, M. J.; STONE, H. A.; WHITESIDES, G. M.** *Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up. Lab on a chip, v. 6, p. 437-446, 2006.*
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D.** *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of computational physics, v. 39, p. 201-225, 1981.*
- JAMALOEI, B. Y.; KHARRAT, R.; ASGHARI, K.** *The influence of pore wettability on the microstructure of residual oil in surfactant-enhanced water flooding in heavy oil reservoirs: Implications for pore-scale flow characterization”, Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 7, n. 1, p. 121–134, 2011.*
- LAMINE DIOUF, M. M.; ROMERO, O. J.** *Numerical study of droplet formation in a Y-junction microchannel, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, submetido, 2016.*
- LIH, F. L.; MIAO, J. M.** *Effect of junction configurations on microdroplet formation in a T-Junction microchannel. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, v. 58, p. 220-230, 2015.*
- 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, aceito, 2016.*
- PAN, Z.; WEIBEL, J. A.; AND GARIMELLA, S. V.** *Spurious Current Suppression in VOF-CSF Simulation of Slug Flow through Small Channels. CTRC Research Publications, Paper 243, 2015.*
- ROMERO, O. J.; FEJOLI, R. F.** *Fluxo de uma gota de óleo em um microcanal reto e com garganta. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, v. 19, n. 2, p. 71-81, 2015.*
- SANTOS, K. B.; ROMERO, O. J.; MENEGUELO, A. P.; RIBEIRO, D. C.** *A numerical investigation of immiscible water-oil displacement in simplified porous media. IEEE America Latina, submetido, 2016.*
- SHUI, L.; EIJKEL, J. C. T.; VAN DEN BERG, A.** *Multiphase flow in microfluidic systems – Control and applications of droplets and interfaces. Advances in Colloid and Interface Science, v. 133, p. 35-49, 2007.*

TARCHICHI, N.; CHOLLET, F.; MANCEAU, J. *New regime of droplet generation in a T-Shape microfluidic junction. Journal of Microfluidics and Nanofluidics*, v. 14, n. 1, p. 45-51, 2013.