



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

RÔMULO FIENI FEJOLI

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE UMA
GOTA DE ÓLEO EM ÁGUA ATRAVÉS DE
CAPILARES COM GARGANTAS**

SÃO MATEUS - ES

JULHO/2016

energia.ufes.br

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

RÔMULO FIENI FEJOLI

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE UMA
GOTA DE ÓLEO EM ÁGUA ATRAVÉS DE
CAPILARES COM GARGANTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Energia.

Orientador: Prof. Dr. Oldrich Joel Romero.

SÃO MATEUS - ES

JULHO/2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)

F763s Fejoli, Rômulo Fieni, 1991-
Simulação numérica do escoamento de uma gota de óleo em
água através de capilares com garganta / Rômulo Fieni Fejoli. –
2016.
161 f. : il.

Orientador: Oldrich Joel Romero.
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Escoamento bifásico. 2. Emulsão O/A. 3. ANSYS (Sistema
de computador). I. Romero, Oldrich Joel. II. Universidade Federal
do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo.
III. Título.

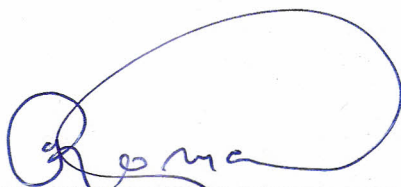
CDU: 620.9

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE UMA GOTA DE ÓLEO EM ÁGUA ATRAVÉS DE CAPILARES COM GARGANTAS

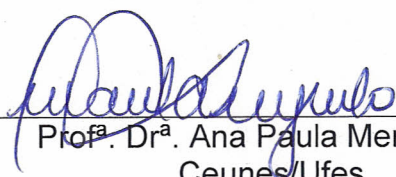
Rômulo Fieni Fejoli

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia, para obtenção do título de Mestre em Energia.

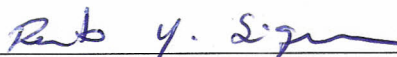
Aprovada: 13/07/2016.



Prof. Dr. Oldrich Joel Romero
Ceunes/Ufes
Orientador



Prof. Dr.ª Ana Paula Meneguelo
Ceunes/Ufes
Membro Interno



Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira
Ifes
Membro Externo

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cláudio Fejoli Leite e Dionedes Fieni Fejoli, por todo apoio afetivo e financeiro, pois sem eles o sonho de me tornar Engenheiro de Petróleo não seria realizado e posteriormente o título de Mestre em Energia.

Ao meu orientador professor Dr. Oldrich Joel Romero, o qual admiro pela inteligência, profissionalismo e dedicação. Obrigado pela confiança e direcionamento durante a realização deste trabalho mesmo em momentos difíceis. A todos Professores da UFES que me ensinaram a base para me graduar em Engenharia de Petróleo, tornando possível hoje, a minha conquista do título de Mestre em Energia, e, além disso, foram capazes de passar ensinamentos sobre a vida.

Aos professores doutores Ana Paula Meneguelo, Daniel da Cunha Ribeiro e Fabio de Assis Ressel Pereira da UFES, e ao Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira, do IFES, pelos comentários referentes ao tratamento do escoamento multifásico no ambiente Fluent[®] e pelas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

Ao Laboratório de simulação numérica (Labsim), pela infraestrutura que possibilitou a elaboração deste trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudo concedida.

Ao capítulo estudantil SPE/UFES <spe.ufes.br>, por viabilizar o uso gratuito da plataforma OnePetro <onepetro.org> da SPE – *Society of Petroleum Engineers* nas instalações da UFES campus São Mateus.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos estes que fazem parte de minha vida e que de alguma forma contribuíram para o meu aprimoramento e crescimento.

RESUMO

Neste trabalho, é investigada a dinâmica interfacial de uma gota de óleo em água que flui através de um capilar reto e com garganta com geometria axial. 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. A solução numérica do problema com interface é obtida pelo acoplamento dos métodos VOF (*Volume of Fluid*) e *Level-set*. Os resultados mostram que a dinâmica do processo do escoamento da gota de óleo, principalmente em capilares com garganta, provoca uma redução de mobilidade do escoamento, traduzido pelo parâmetro fator de bloqueio, o qual é influenciado pelos parâmetros adimensionais: número de capilaridade, razão de viscosidades e razões de diâmetros (da gota e do capilar). Obteve-se uma correlação destes parâmetros com o fator de bloqueio, em que seu valor decai para valores abaixo de um, com o aumento da razão de viscosidade e do tamanho da gota, e também uma pequena sensibilidade com a diminuição do número de capilaridade. De uma forma geral, a gota de óleo se deforma em maior ou menor grau em resposta aos parâmetros adimensionais, apresentando maior deformação com a diminuição da razão de viscosidades e do número de capilaridade. A presença da garganta aumenta significativamente a pressão assim como a velocidade de escoamento na garganta. Todas as simulações foram realizadas no *software* comercial ANSYS® Fluent® por meio de um longo processo de aprendizagem que permitiu adquirir conhecimentos importantes para este trabalho.

Palavras chave: escoamento bifásico, capilar, garganta, tensão interfacial, Fluent®.

ABSTRACT

This study is responsible for analyze the oil drop interfacial dynamics in water, which flows through a straight capillary and straight capillary with throat, both with axial geometry. The two-dimensional, transient, incompressible newtonian fluids, biphasic problem with small inertial forces, represents with a simplified form what happens in oil reservoir on the microscopic scale during the oil drops mobilization. The interface problem numerical solution is obtained by coupling the VOF (Volume of Fluid) and Level-Set methods. The results show that the dynamics of the motion process of the oil drop, mostly in capillaries with throat, result in reduced flow mobility, explained by the blocking factor parameter, being controlled by the dimensionless parameters: capillarity number, viscosity ratio and ratios of diameters (drop and capillary). It was obtained an interconnection between the parameters with the blocking factor, and its decay to values below one, with the viscosity ratio and the drop size rise and also a low sensitivity by reducing the number of capillarity. Overall, the oil drop deforms to a greater or lesser degree in response to the dimensionless parameters, showing a greater deformation with decreasing of the viscosity ratio and the number of capillarity. The presence of the throat significantly increases the pressure drop as well as the flow speed in the throat. All simulations were performed in the commercial software ANSYS® FLUENT® through a long learning process that allowed the acquisition of important knowledge to this work.

Keywords: two-phase flow, capillary, throat, surface tension, Fluent®.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia mundial por tipo de combustível no período de 1990 a 2035.....	21
Figura 2 - Esquema de meio poroso e sua representação simplificada mediante capilares.....	24
Figura 3 - Esquemas de injeção: <i>five-spot</i> , <i>seven-spot</i> e <i>nine-spot</i>	28
Figura 4 - Evolução da área invadida pela água em uma malha 1/4 <i>five-spot</i> , a) $M \gg 1$; b) $M \cong 1$	29
Figura 5 - Seção vertical de um reservatório estratificado.	30
Figura 6 - Segregação gravitacional com fluido de diferentes densidades.	31
Figura 7 - Representação da eficiência volumétrica.....	31
Figura 8 - Representação das forças que produzem a tensão superficial na água...32	
Figura 9 - Ângulo de contato θ_c da água (fluido molhante).	34
Figura 10 - Distribuição dos fluidos no meio poroso devido à molhabilidade.	35
Figura 11 - Efeito da molhabilidade nas curvas de permeabilidade relativa: a) rocha molhada por água, e b) rocha molhada por óleo.	35
Figura 12 - Influência da variação do C_a na diminuição da saturação de óleo residual.	37
Figura 13 - Gota de óleo penetrando em uma restrição de um poro.	37
Figura 14 - Fenômeno <i>snap-off</i> : a) uma gota de óleo encontra uma garganta, b) e c) alongamento da gota através da garganta, e d) formação de outra gota de óleo.	38
Figura 15 - Geometria do capilar com garganta de acordo com o modelo de Roff (1970).....	39
Figura 16 - Fase da vida de um campo de petróleo.	40
Figura 17 - Classificação geral dos métodos especiais de recuperação secundária.44	
Figura 18 - Aglomeração e bloqueio de poros com gotas de emulsão.....	45
Figura 19 - Esquema do escoamento de uma gota de óleo através de um capilar molhado por água a) reto e b) com garganta.....	46
Figura 20 - Esboço do comportamento do factor de bloqueio em função da razão de diâmetros da gota e da garganta e número capilar.....	51
Figura 21 - Curvas do fator $f(\alpha)$ para diferentes números de capilaridade.	52

Figura 22 - Comparação dos métodos (a) lagrangeanos e (b) eulerianos para modelagem da interface.....	55
Figura 23 - Métodos de captura de interface: a) Partículas marcadoras na interface; b) Malha acompanhando a interface; c) Fase definida por função indicadora ou marcadora.....	56
Figura 24 - Representação esquemática das funções de altura para: a) interfaces abertas (b) interfaces fechadas.....	58
Figura 25 - Contornos da função <i>Level-set</i> : a) configuração inicial, b) antes da fusão sem correção e c) antes da união com correção.	59
Figura 26 - Colapso de uma coluna de líquido para dois passos de tempo.	60
Figura 27 - Representação esquemática dos marcadores e sua disposição na malha.	62
Figura 28 - Malha a) estruturada e ortogonal, b) e c) estruturadas e não-ortogonais, d) e e) não-estruturadas e não-ortogonais e, f) híbrida.....	63
Figura 29 - Algoritmos baseados na pressão, a) algoritmo segregado, e b) algoritmo acoplado.	67
Figura 30 - Representação a) capilar reto e b) capilar com garganta.	68
Figura 31 - Geometria para um capilar com garganta com simetria axissimétrica. ...	74
Figura 32 - Representação da fração volumétrica do óleo (α_o) em cada volume de controle no domínio computacional.	79
Figura 33 - Arranjo dos fluidos (óleo e água) e o sinal de curvatura.	83
Figura 34 - Função Heaviside suavizada.	86
Figura 35 - Condições de contorno para o capilar com garganta, válido para o capilar reto, com simetria axissimétrica.....	87
Figura 36 - Exemplo de volume de controle para mostrar a discretização da equação de transporte de um escalar.	89
Figura 37 - Esquemas <i>Upwind</i>	91
Figura 38 - Avaliação do gradiente para um volume de controle.	95
Figura 39 - Esquemas de discretização da interface.....	96
Figura 40 - Representação da interface por diferentes esquemas.....	97
Figura 41 - Algoritmos a) iterativo, e b) não-iterativo.....	104
Figura 42 - Sequência de malhas para o método <i>Multigrid</i>	105
Figura 43 - Condições de contorno para o capilar com garganta (equivalente para o reto).....	109

Figura 44 - Detalhe das malhas para o capilar reto.....	110
Figura 45 - Detalhe das malhas para o capilar com garganta. a) malha grosseira, b) malha média e c) malha refinada.....	110
Figura 46 - Monitoramento da interface no capilar reto para passos de tempo: 10, 170, 395.....	111
Figura 47 - Monitoramento da interface no capilar com garganta para passos de tempo: 27, 90, 110 e 290.....	111
Figura 48 - Variação de pressão para o capilar com garganta para dois níveis de refinamento.....	111
Figura 49 - Geometria do capilar com garganta utilizada por Roca Reyes (2011)..	113
Figura 50 - Malha utilizada por Roca Reyes (2011) e sua reprodução na presente validação.....	114
Figura 51 - Deslocamento da gota nos instantes $t = 10\Delta t$, $t = 600\Delta t$, $t = 1200 \Delta t$, $t = 1800 \Delta t$ e $t = 2100 \Delta t$ com $\Delta t = 3 \times 10^{-5}$ s, $D_{garg} = 0,5$ e $D_{gota} = 0,6$, a) obtido por Roca Reyes (2011), b) obtido neste trabalho para as condições descritas por Roca Reyes (2011).....	114
Figura 52 - Variação da pressão para um capilar com garganta com e sem gota obtido por Roca Reyes (2011) e neste trabalho com as condições descritas por Roca Reyes (2011).	115
Figura 53 - Variação da pressão no capilar reto (caso 1) para diversos passos de tempo ($D_{garg} = 1,0$).....	117
Figura 54 - Variação da pressão no capilar com garganta (caso 11) para diversos passos de tempo ($D_{garg} = 0,1$).....	117
Figura 55 - Variação axial da pressão no capilar reto (caso 1) para $N\Delta t = 400$	118
Figura 56 - Variação axial da pressão no capilar com garganta (caso 11) para $N\Delta t = 1000$	118
Figura 57 - Variação axial da velocidade no capilar reto (caso 1) para $N\Delta t = 400$.	118
Figura 58 - Variação axial da velocidade no capilar com garganta (caso 11) para $N\Delta t = 1000$	119
Figura 59 - Variação axial da pressão após a garganta, comparação com o capilar reto.....	119
Figura 60 - Variação axial da velocidade após a garganta, comparação com o capilar reto.....	120

Figura 61 - Campo de pressão para o caso 1 para $N\Delta t = 400$ ($Dgarg = 1,0$).....	120
Figura 62 - Campo de vetores velocidade para o caso 1 para $N\Delta t = 400$ ($Dgarg = 1,0$).	121
Figura 63 - Campo de pressão para o caso 11 para $N\Delta t = 1000$ ($Dgarg = 0,1$).....	121
Figura 64 - Campo de vetores velocidade para o caso 11 para $N\Delta t = 1000$ ($Dgarg = 0,1$).....	121
Figura 65 - Perfis de velocidade para o caso 1 na entrada do capilar (0 mm) e na posição 4 mm na linha de simetria, para $N\Delta t = 400$ ($Dgarg = 1,0$).	121
Figura 66 - Perfis de velocidade para o caso 11 na entrada do capilar (0 mm) e na posição 2, 4 e 6 mm na linha de simetria, para $N\Delta t = 1000$ ($Dgarg = 0,1$).	121
Figura 67 - Variação axial da pressão para diferentes valores de $Dgarg$ para $N\Delta t = 1000$ (sem gota).	122
Figura 68 - Variação axial da velocidade para diferentes valores de $Dgarg$ para $N\Delta t = 1000$ (sem gota).	122
Figura 69 - Pressão adimensional em função de $N\Delta t$ para os casos 2, 5 e 8 com $Dgarg = 1$ e $Ca = 0,132$	124
Figura 70 - Variação axial da pressão para o caso 1 (sem gota) e 2 (com gota), com $Ca = 0,132$	125
Figura 71 - Posição da gota para $N\Delta t = 10$ e 300 e seus respectivos campos de pressão no capilar reto.	125
Figura 72 - Variação axial da velocidade para o caso 1 (sem gota) e 2 (com gota), com $Ca = 0,132$	126
Figura 73 - Posição da gota para $N\Delta t = 10$ e 300 e seus respectivos contornos de velocidade no capilar reto.	126
Figura 74 - Perfil de velocidade com a gota na posição $z = 3$ mm ($N\Delta t = 10$).	127
Figura 75 - Pressão adimensional em função de $N\Delta t$ para diversos casos com $Dgarg = 0,1$ e $Ca = 0,132$	128
Figura 76 - Deformação da gota para os casos 12 (cor preta), 13 (cor vermelha) e 14 (cor azul) para $N\Delta t = 30$ com $\mu R = 10$ e $Ca = 0,132$	128
Figura 77 - Posição da interface da gota para os casos 12 (preto, $\mu R = 10$), 15 (vermelho, $\mu R = 5$) e 18 (azul, $\mu R = 2$) com $Ca = 0,132$ e $Dgota = 0,8$	129
Figura 78 - Efeito da viscosidade da gota de óleo na variação axial da pressão. Casos 12, 15 e 18 com $Ca = 0,132$	130

Figura 79 - Fator de bloqueio em função do tamanho de gota para o capilar com garganta com $Ca = 0,132$	131
Figura 80 - Fator de bloqueio em função do número de capilaridade para diferentes valores de $Dgota$ para $\mu R = 10$	132
Figura 81 - Influência da razão de viscosidades na forma e posição da gota para os casos 12 ($\mu R = 10$, linha preta), 15 ($\mu R = 5$, linha vermelha) e 18 ($\mu R = 2$, linha azul) para $Dgota = 0,8$ e $Ca = 0,132$	134
Figura 82 - Influência do número de capilaridade na forma e posição da interface da gota para os casos 12 ($Ca = 0,132$, linha preta), 25 ($Ca = 0,106$, linha vermelha), 28 ($Ca = 0,053$, linha azul) e 31 ($Ca = 0,026$, linha verde) para $Dgota = 0,8$ e $\mu R = 10$	135
Figura 83 - Forma e posição da gota para $Ca = 0,01$ com $\mu R = 10$ e $Dgota = 0,8$ (caso 34).....	136
Figura 84 - Vetores velocidade e linhas de corrente na saída da garganta.	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no problema.	69
Tabela 2 - Parâmetros adimensionais utilizados no problema.	72
Tabela 3 - Casos simulados.	73
Tabela 4 - Características das malhas no teste.	109
Tabela 5 - Resultados das malhas nos testes.	111
Tabela 6 - Parâmetros das simulações de Roca Reyes (2011) e Torquato (2015).	113
Tabela 7 - ΔP_c e velocidade calculadas para os casos 1, 11, 21, 22, 23, e 24 (casos monofásicos).....	123
Tabela 8 - Cálculo do fator de bloqueio para o capilar reto com $Dgota = 0,8$ e $Ca = 0,132$	124
Tabela 9 - Cálculo do fator de bloqueio para o capilar com garganta com $Ca = 0,132$ (casos 12-20).	130
Tabela 10 - Cálculo do fator de bloqueio para o capilar com garganta com $\mu R = 10$	132

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

SIGLAS

AMG - <i>Algebraic Multigrid Method</i> (Método algébrico multigrid)	IOR - <i>Improved Oil Recovery</i> (Recuperação melhorada de óleo)
API - <i>American Petroleum Institute</i> (Instituto Americano de Petróleo)	MAC - <i>Marker and Cell</i>
CFD - <i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de fluidos computacional)	MUSCL - <i>Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws</i> (Esquemas <i>upstream</i> -centrados monótonos para leis de conservação)
CICSAM - <i>Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes</i> (Esquema de captura de interface compressivo para malhas arbitrárias)	NITA - <i>Non-Iterative Time-Advancement</i> (Avanço temporal não iterativo)
CLSVOF - <i>Coupled Level-Set Volume of Fluid</i> (Acoplamento volume de fluido e Level-set)	PISO - <i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i> (Pressão-implícita com separação dos Operadores)
CFL - <i>Courant Friedrichs Lewy</i>	PRESTO! - <i>Pressure Staggering Option</i> (Opção de escalonamento da pressão)
CSF - <i>Continuum Surface Force</i> (Força de superfície contínua)	QUICK - <i>Quadratic Upwind Implicit Differencing Convective Kinematics</i> (Diferenciação quadrática <i>Upwind</i> implícita dos termos cinemáticos convectivos)
CSS - <i>Continuum Surface Stress</i> (Tensão de superfície contínua)	SIMPLE - <i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i> (Método semi-implícito para equações ligadas de pressão)
EOR - <i>Enhanced Oil Recovery</i> (Recuperação avançada de óleo)	SIMPLEC - <i>SIMPLEConsistent</i> (SIMPLE Consistente)
FSM - <i>Fractional Step Method</i> (Método de passo fracionário)	VOF - <i>Volume of Fluid</i> (Volume de Fluido)
HRIC - <i>High Resolution Interface Capturing</i> (Captura de interface de alta resolução)	
IEA - <i>International Energy Agency</i> (Agencia de Energia Internacional)	

LETRAS GREGAS

α - Razão entre os raios da gota e da garganta	ΔP_c - Gradiente de pressão da fase contínua (Pa)
α^* - Razão crítica entre os raios da gota e da garganta	ΔP_{cap} - Pressão capilar (Pa)
α_o - Fração volumétrica de óleo	ΔP_{gota} - Gradiente de pressão associado à gota (Pa)
$\alpha_{o,f}$ - Fração volumétrica do óleo na face	$\Delta P_{gota_{max}}$ - Gradiente de pressão máximo associado a gota (Pa)
Γ - Interface	ΔP_{vol} - Gradiente de pressão através da interface
Γ_ϕ - Coeficiente de difusão para ϕ	

(Pa)

Δt - Passo de tempo (s)

Δx - Tamanho do elemento da malha (m)

$\Delta x_W, \Delta x_P$ e Δx_E - Distância entre as fronteiras do volume de controle W, P e E, respectivamente (m)

ε - Espessura da interface (m)

θ - Variável do esquema QUICK

θ_c - Ângulo de contato

λ_o - Mobilidade do óleo

λ_w - Mobilidade da água

μ_o - Viscosidade do óleo (N.s/m²)

μ_R - Razão de viscosidades

μ_w - Viscosidade da água (N.s/m²)

ξ - Concentração da fase dispersa

ρ - Massa específica (kg/m³)

ρ_o - Massa específica do óleo (kg/m³)

ρ_w - Massa específica da água (kg/m³)

σ - Tensão interfacial (N/m)

σ_{wo} - Tensão interfacial entre a água e o óleo (N/m)

σ_{sw} - Tensão interfacial entre o sólido e a água (N/m)

σ_{so} - Tensão interfacial entre o sólido e o óleo (N/m)

τ - Tensão (Pa)

$\bar{\tau}$ - Tensor de tensão

ϕ - Grandeza escalar qualquer a ser calculada

ϕ_f - Valor de ϕ convectada através da face f

φ - Função *Level-Set*

SÍMBOLOS

\otimes - Produto vetorial

∇ - Operador Nabla / Gradiente

a_p e a_{nb} - Coeficientes principal e vizinhos

\vec{A}_f - Área da face (m²)

A_{inv} - Área invadida do meio poroso (m²)

A_t - Área total do meio poroso (m²)

A_{vi} - Área vertical invadida (m²)

A_{vt} - Área vertical total (m²)

b - Taxa de fluxo de líquido para dentro do volume de controle

c_0, c_1 e c_i - Centro do volume de controle

C_a - Número de capilaridade

C_a^* - Número de capilaridade crítico

C_o - Número de *Courant*

d - Distância da interface (m)

d_{garg} - Diâmetro da garganta (mm)

d_{gota} - Diâmetro da gota (mm)

D - Diâmetro do capilar (mm)

D_{garg} e D_{gota} - Razão de diâmetros

E - Centro do volume principal de controle a leste do volume de controle principal P

E_A - Eficiência de varrido horizontal

E_D - Eficiência de deslocamento

E_R - Eficiência de recuperação

E_V - Eficiência volumétrica

E_{VV} - Eficiência de varrido vertical

F - Função que inclui qualquer discretização espacial

f - Fator de bloqueio

f_μ - Fator de bloqueio para o mecanismo viscoso

f_σ - Fator de bloqueio para o mecanismo capilar

f - Face do volume de controle

\vec{f} - Vetor força

\vec{f}_{sf} - Vetor força da tensão superficial

\vec{g} - Vetor aceleração da gravidade (m/s²)

h - Camada lubrificante (mm)

\bar{I} - Tensor unitário (matriz identidade)

j_f - Fluxo mássico na face f

\hat{j}_f - Termo que contém influência de velocidades de ambas as células vizinhas

j_f^* - Fluxo mássico resultante na face f

j_f' - Correção do fluxo mássico na face f

k - Curvatura	R_{gota} - Raio da gota (mm)
\bar{k} - Mobilidade do escoamento bifásico	R_{garg} - Raio da garganta (mm)
k_A, k_B - Parâmetros de ajuste	R_{gargT} - Raio de curvatura transversal a garganta (mm)
k_D - Permeabilidade efetiva de um fluido deslocante	R_{cap} - Raio do capilar (mm)
k_o - Permeabilidade efetiva do óleo	\bar{R}_{cap} - Raio equivalente do capilar (mm)
L - Comprimento de um capilar (mm)	R_d - Raio de curvatura da parte dianteira da gota
L_{gota} - Comprimento da gota (mm)	R_p - Raio de curvatura da parte posterior da gota
\dot{m}_{wo} - Transferência de massa da água para o óleo	R' e R'' - Raios de curvatura da interface
\dot{m}_{ow} - Transferência de massa do óleo para a água	S_{α_o} - Termo fonte do óleo
M - Razão de mobilidades	S_{oi} - Saturação inicial de óleo
Mtoe - Milhões de toneladas de óleo equivalente	S_{or} - Saturação de óleo residual
nb - Células vizinhas ou adjacentes	S_ϕ - Termo de geração de ϕ
\hat{n} - Vetor unitário paralelo a \vec{n}	t - Tempo (s)
\vec{n} - Gradiente da fração volumétrica	\bar{T} - Tensor tensão interfacial
\hat{n}_c e \hat{t}_c - Vetores unitários normal e tangencial	U_f - Fluxo volumétrico através da face
N_f - Número de faces que delimitam o volume de controle	V - Volume da célula da malha (m ³)
$N_{\Delta t}$ - Número de passos de tempo	v - Velocidade (m/s)
P - Centro do volume principal de controle	\bar{v} - Velocidade média (m/s)
P - Pressão adimensional	\vec{v} - Vetor velocidade (m/s)
p_{ref} - Pressão de referência (Pa)	\vec{v}_n - Velocidade normal à face do volume de controle
p^* - Campo de pressão suposto	\vec{v}_o - Vetor velocidade do óleo.
p' - Campo de pressão corrigido	\vec{x} - Vetor posição
Q - Vazão (m ³ /s)	W - Centro do volume principal de controle a oeste do volume de controle principal P
Q_m - Vazão do escoamento monofásico (m ³ /s)	
Q_b - Vazão do escoamento bifásico (m ³ /s)	r, θ e z - Sistema cilíndrico de coordenadas
Re - Número de Reynolds	f, w - Faces leste e oeste do volume de controle principal
R_1 e R_2 - Raios de curvatura do capilar com garganta	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	MOTIVAÇÃO	22
1.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	24
1.3	OBJETIVOS	25
1.4	ORGANIZAÇÃO	25
2	ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS: CONCEITOS TEÓRICOS	27
2.1	EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO	27
2.1.1	Eficiência de varrido areal ou horizontal	27
2.1.2	Eficiência de varrido vertical	29
2.1.3	Eficiência volumétrica	31
2.1.4	Eficiência de deslocamento	31
2.2	MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE PETRÓLEO	40
2.3	EMULSÕES	45
2.4	MECANISMOS DE BLOQUEIO DAS EMULSÕES	46
2.4.1	Literatura consultada sobre o tema	47
2.4.2	Modelos matemáticos do fator de bloqueio	50
3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA: CONCEITOS TEÓRICOS	54
3.1	MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS COM INTERFACES	54
3.1.1	Métodos de superfície	56
3.1.1.1	Partículas na Interface (<i>particles on interface</i>)	57
3.1.1.2	Funções de altura (<i>height functions</i>)	57
3.1.1.3	Método <i>Level-set</i>	58
3.1.1.4	Malha coincidente com a interface (<i>surface fitted methods</i>)	59
3.1.1.5	Método <i>Front-Tracking</i>	60
3.1.2	Métodos de volume	61
3.1.2.1	Marcadores no fluido	61
3.1.2.2	Frações volumétricas	62

3.2	TIPOS DE MALHA UTILIZADAS PARA DISCRETIZAR O DOMÍNIO	63
3.3	ALGUNS CÓDIGOS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	64
3.4	ABORDAGEM MULTIFÁSICA	65
3.5	VISÃO GERAL DOS MÉTODOS NUMÉRICOS	66
4	ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA A SER RESOLVIDO	68
4.1	GEOMETRIAS DOS CAPILARES	68
4.2	PROPRIEDADES DOS FLUIDOS	69
4.3	PARÂMETROS ADIMENSIONAIS	69
4.4	CASOS SIMULADOS	72
5	MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DA GOTA DE ÓLEO	74
5.1	EQUAÇÕES GOVERNANTES	74
5.2	ACOPLAMENTO DOS MÉTODOS VOF E LEVEL-SET	78
5.2.1	Método <i>Volume of Fluid (VOF)</i>	78
5.2.2	Método <i>Level-set</i>	81
5.3	MODELOS DE TENSÃO INTERFACIAL	81
5.3.1	Força de superfície contínua (<i>Continuum Surface Force - CSF</i>)	82
5.3.2	Tensão de superfície contínua (<i>Continuum Surface Stress - CSS</i>)	84
5.3.3	Adesão na parede	84
5.3.4	Força de tensão superficial	85
5.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO	87
5.5	DISCRETIZAÇÃO E SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO GERAL DE TRANSPORTE	88
5.5.1	Discretização espacial	90
5.5.2	Discretização dos termos temporais	92
5.5.3	Discretização dos termos temporais da equação da interface	94
5.5.4	Avaliação dos gradientes	94
5.5.5	Discretização dos termos espaciais da equação da interface	96
5.6	SOLVER BASEADO NA PRESSÃO SEGREGADO	97
5.6.1	Discretização da equação de movimento	98

5.6.2	Discretização da equação da continuidade	99
5.6.3	Acoplamento pressão-velocidade	100
5.6.4	Algoritmo de avanço temporal	103
5.7	MÉTODO DE SOLUÇÃO DO SISTEMA ALGÉBRICO	105
5.8	RESUMO DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS ESCOLHIDOS	106
5.9	CONVERGÊNCIA DA SOLUÇÃO NÚMERICA	106
5.10	ESCOLHA DO PASSO DE TEMPO	107
5.11	RECURSO COMPUTACIONAL.....	108
5.12	TESTE DE INDEPENDENCIA DE MALHA.....	108
6	RESULTADOS E DISCUSÕES	112
6.1	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA.....	112
6.2	ESCOAMENTO MONOFÁSICO.....	116
6.3	ESCOAMENTO DA GOTA DE ÓLEO EM ÁGUA.....	123
7	CONCLUSÕES.....	137
7.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	139
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
	APÊNDICE A: Artigo publicado	151

1 INTRODUÇÃO

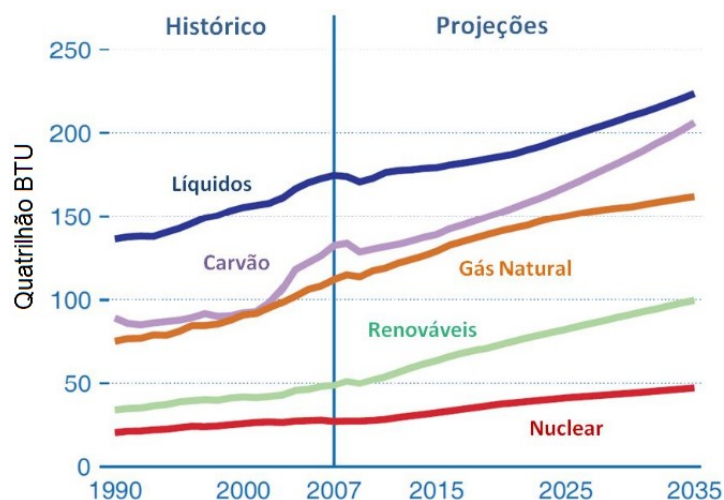
O petróleo é uma das principais fontes de energia e matéria prima do mundo. Com o crescimento industrial mundial cada vez mais ascendente, existe também o aumento do consumo de energia. Segundo Raney (2011), os combustíveis fósseis ainda serão a base da matriz energética mundial nas próximas décadas. Sua demanda crescente, só tende a acelerar a busca por este produto, vital para a vida da sociedade moderna. Esta fonte de energia não é renovável, na escala de tempo do ser humano, e por isso as suas reservas são ditas finitas.

Em 2013, as reservas provadas de petróleo no mundo atingiram a marca de 1,69 trilhão de barris, enquanto no Brasil está presente cerca de 15,6 bilhões de barris. O volume de petróleo produzido no mundo em 2013 aumentou em 550,8 mil barris/dia (0,64%) em relação a 2012, passando para 86,8 milhões de barris/dia, enquanto a produção média brasileira caiu 1,9%, aproximadamente 2,11 milhões de barris/dia (2,5% do total mundial). Em 2013, o consumo mundial de petróleo totalizou 91,3 milhões de barris/dia, após aumento de 1,6% (+1,4 milhão de barris/dia) em comparação a 2012, e o consumo médio brasileiro aumentou 5,9% (+166 mil barris/dia) totalizando 2,97 milhões de barris/dia (ANP, 2014).

Segundo a Agência de Energia Internacional (*International Energy Agency* - IEA) entre os anos 2008 e 2035 a demanda mundial de combustíveis fósseis (energia primária), como o petróleo, carvão e gás natural, incrementará em 36%, de 12.300 Mtoe (milhões de toneladas de óleo equivalente) para 16.700 Mtoe, isto significa um incremento médio de 1,2% por ano.

Para amenizar essa dependência do petróleo, novos investimentos em tecnologias devem ser realizados nas diversas fontes de energia alternativas, como solar, eólica, de biomassa, nuclear, entre outras, diversificando assim a matriz energética em nível mundial. A Figura 1 mostra a previsão do consumo mundial de energia por tipo de combustível até 2035 em que os combustíveis líquidos (derivados e não derivados do petróleo) ainda serão a principal fonte de energia mundial (IEA, 2010).

Figura 1 - Consumo de energia mundial por tipo de combustível no período de 1990 a 2035.



Fonte: IEA (2010).

Adicionalmente, a IEA reporta que a parcela de participação do petróleo registra diminuição ao longo do tempo desde o início da década de setenta (70), quando a sua participação representou 50% do consumo de energia primária no mundo até o ano 2005, que atingiu 43% no consumo energético do planeta. Ainda segundo a IEA, devido à recessão econômica mundial em 2009, o consumo de energia teve a maior queda desde 1990, cerca de 1,1%. O consumo e a produção mundial de petróleo experimentaram também as suas maiores diminuições, atingindo 1,7% (1.2 milhões de barris por dia) e 2,6% (2 milhões de barris por dia), respectivamente.

Os investimentos para diversificar as fontes de energia e obter melhoras ambientais se destacam como causas desta diminuição, favorecendo o uso de energias alternativas (renováveis) e o desenvolvimento de novas tecnologias para aumentar a eficiência energética no uso da energia nuclear e de combustíveis como o gás natural e o carvão.

Mesmo com o aumento do uso de energias alternativas, as previsões futuras mostram que o petróleo ainda terá participação dominante na matriz energética mundial, tendo nos setores industriais e de transportes sua principal demanda (IEA, 2010). Para tentar atender a essa demanda futura, grandes investimentos devem ser realizados na busca por petróleo. Incorporação de novas reservas serão necessárias para garantir a crescente demanda por óleo. Porém, as grandes descobertas petrolíferas estão cada vez mais escassas.

Outra forma de atender a demanda mundial de energia nas próximas décadas

é por meio da implementação de novas tecnologias de produção e recuperação dos reservatórios já descobertos, de maneira economicamente viável, para aumentar o fator de recuperação. A média mundial da recuperação de petróleo gira em torno de 35 %, ou seja, mais da metade do petróleo contido nos campos descobertos não é produzido, permanecendo trapeada (presa) no interior da rocha porosa (LABASTIE, 2011). Diversos são os motivos para estes índices baixos de extração, dentre eles a combinação de elevadas forças capilares e forças viscosas em ambientes microscópicos profundos, ou ultraprofundos, e de difícil acesso, podem ser consideradas as mais importantes.

Nas décadas passadas, mais de 50 % das reservas de petróleo eram de óleo leve contidas em campos de acesso simples, conhecido como óleo “fácil”, pois possuía maior facilidade de ser produzido. Essa “zona de conforto” criava uma espécie de muro entre aquele presente e o futuro incerto. Assim, o esforço tecnológico era mínimo, não havendo preocupação com as mudanças que porventura viessem a acontecer. Estes novos cenários produtivos chegaram e estão intimamente relacionadas com o tipo de reserva a ser explorada em maior escala: a de óleos mais pesados (IEA, 2010).

Nos próximos anos, considera-se que os esforços estarão dirigidos para incrementar a eficiência de campos já descobertos e recém explorados e para desenvolver tecnologias e técnicas de extração e recuperação que aumentem a produção de óleos não convencionais, considerando a sua viabilidade econômica. Há uma vasta gama de métodos de recuperação em que a análise microscópica, ou seja, em escala de poros é de grande importância para determinar a eficiência do fluxo de petróleo em capilares retos e com gargantas.

1.1 MOTIVAÇÃO

Sabendo que nas próximas décadas o petróleo ainda será a principal fonte de energia, as previsões de seu valor de mercado serão elevadas, em virtude do declínio do óleo de “fácil” produção e a incerta capacidade de suprir a crescente demanda mundial. Com o aumento do preço do petróleo, os métodos especiais de recuperação se tornarão economicamente viáveis e tecnicamente indispensáveis. Avanços tecnológicos aperfeiçoarão as técnicas existentes e juntamente com pesquisas de

novos métodos poderão tornar atrativos os projetos que antes eram considerados antieconômicos.

Por isso, tecnologias que envolvem o desenvolvimento e aplicação de técnicas capazes de aumentar a rentabilidade de campos petrolíferos são importantes e necessitam de estudos mais aprofundados, principalmente no que tange o escoamento na escala de poro.

Dentre os diferentes métodos de recuperação com grande potencial de melhoria da eficiência de recuperação pode-se citar a injeção de emulsões. A emulsão, formada por várias gotas estáveis de óleo, pode ser utilizada como agente de bloqueio seletivo do reservatório, baixos fatores de bloqueio (conceito abordado na subseção 2.4.2), melhorando a eficiência do deslocamento do óleo por meio da diminuição da permeabilidade efetiva das zonas de alta permeabilidade já varridas. Assim, as zonas com grandes volumes de petróleo remanescente, as quais não foram inicialmente varridas conseguem ser mobilizadas, melhorando a eficiência de recuperação de óleo.

O fator de bloqueio varia de zero (0) a um (1) em que valores próximos a um significa pouca restrição ao fluxo enquanto valores muito abaixo de um significa em um aumento da dificuldade para que a gota escoe no capilar, ou seja, ocorre uma redução de sua mobilidade. No contexto dos métodos de recuperação as emulsões são produzidas em superfície e injetadas no reservatório gerando seus benefícios para o aumento de produção de petróleo, sendo interessante gerar baixos fatores de bloqueio. Por outro lado, as emulsões também podem ser espontaneamente geradas por *snap-off* durante a produção de óleo gerando baixos fatores de bloqueio, sendo necessária a aplicação de um acréscimo de pressão para que a gota seja mobilizada, o que é indesejável durante a produção.

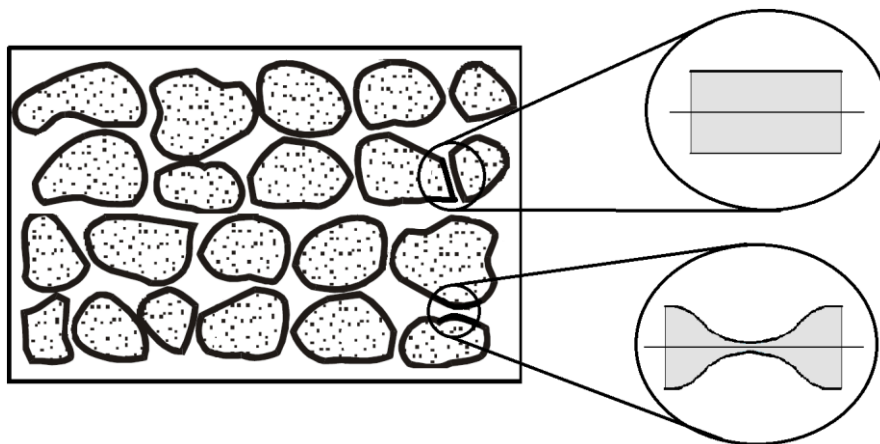
A utilização e desenvolvimento de simuladores para escoamentos em meios porosos representam uma tendência para a previsão do comportamento de produção e planejamento das operações durante a vida produtiva do reservatório, uma vez que erros representam grandes prejuízos para a companhia. Ferramentas matemáticas e numéricas vêm intensamente substituindo alguns tipos de investigação experimental, tendo em vista vantagens operacionais e principalmente economia em termos de custo e tempo.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema proposto representa a queda da eficiência de recuperação devido ao seu trapeamento no meio poroso. O escoamento de fluidos no interior de meios porosos pode ser representado, de forma simplificada, pelo escoamento em capilares com gargantas (Figura 2). Neste trabalho o interesse é estudar a escoamento de uma gota de óleo imersa em água através de capilares sem restrição ao fluxo (capilar reto), e com restrição ao fluxo (capilar com garganta). Os fluidos são imiscíveis, com propriedades constantes e escoam em regime laminar, em condições isotérmicas e sem mudança de fases. A variação do nível de constrição da garganta busca tornar possível representar meios porosos com diferentes permeabilidades. Apenas o escoamento entre dois poros é simulado.

Este fenômeno pode ocorrer após a injeção de água durante a recuperação convencional de petróleo, quando a geometria do meio permite a formação de emulsões óleo em água, mediante *snap off* por exemplo, desta forma emulsões são geradas *in-situ*. Este problema também se enquadra na recuperação especial de petróleo utilizando emulsões, em que emulsões óleo em água são preparadas em superfície e injetadas para reduzir a permeabilidade do reservatório em determinadas áreas, direcionando o fluido deslocante para regiões com permeabilidade menor ainda não contatadas e que contem óleo.

Figura 2 - Esquema de meio poroso e sua representação simplificada mediante capilares.



1.3 OBJETIVOS

O objetivo fundamental deste trabalho é entender o escoamento de emulsões óleo em água escoando em meios porosos.

Objetivos específicos

Como o meio poroso é representado por capilares o objetivo fundamental é atingido de forma indireta atendendo diversas etapas intermediárias:

- a) estudar o escoamento de uma gota de óleo através de capilares retos e com garganta;
- b) quantificar o fator de bloqueio, comparando com a resposta de um capilar reto;
- c) investigar a influência da geometria dos capilares no escoamento, comparando o diâmetro da garganta com o diâmetro da parte reta,
- d) investigar a influência da tamanho da gota de óleo em relação ao diâmetro do capilar,
- e) investigar a influência da razão de viscosidades dos fluidos;
- f) investigar a influência do número de capilaridade;
- g) criar mapas (de acordo com o trabalho de Roca Reyes, 2011) do fator de bloqueio para diferentes geometrias do capilar;
- h) criar mapas (de acordo com o trabalho de Roca Reyes, 2011) do fator de bloqueio para diferentes números de capilaridade.

1.4 ORGANIZAÇÃO

A presente dissertação está escrita atendendo as normas da UFES que se baseiam nas normas ABNT, e está dividida em oito capítulos:

O primeiro capítulo aborda uma introdução sobre o tema, assim como a motivação, os objetivos a serem alcançados e esta organização de apresentação da dissertação;

O segundo apresenta a fundamentação teórica referente ao escoamento em

meios porosos para uma correta compreensão do trabalho;

O terceiro apresenta a fundamentação teórica referente a simulação numérica;

O quarto detalha a definição do problema, mostrando as geometrias e parâmetros utilizados nas simulações;

O quinto apresenta a modelagem matemática e a numérica do problema de estudo, como as equações constitutivas, hipóteses, condições de contorno e os métodos VOF e *Level-set*, e etapas de criação da malha de simulação;

O sexto apresenta os resultados e discussões de forma organizada;

O sétimo estão as conclusões e sugestões, e finalmente o oitavo capítulo estão todas as referências utilizadas ao longo da dissertação.

2 ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS: CONCEITOS TEÓRICOS

2.1 EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO

A eficiência de recuperação (E_R) de um projeto de injeção em um reservatório de petróleo pode ser definida como o produto entre as eficiências de varrido horizontal (E_A), de varrido vertical (E_{VV}) e de deslocamento (E_D):

$$E_R = E_A E_{VV} E_D . \quad (1)$$

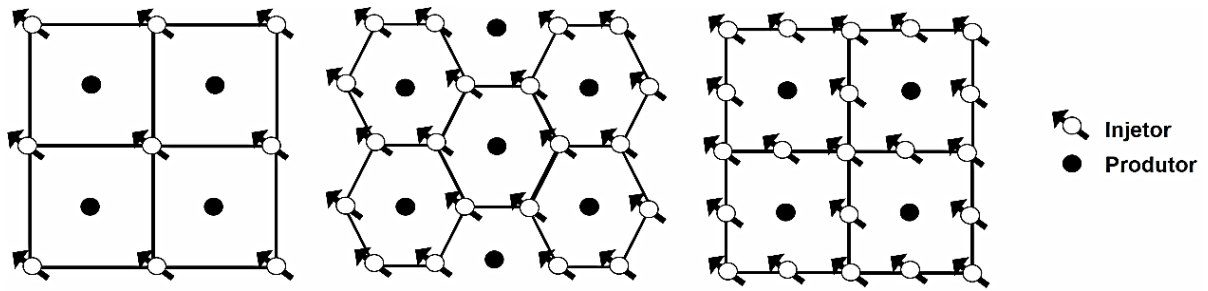
Como o produto das duas primeiras (E_A e E_{VV}) é definido como sendo a eficiência volumétrica (E_V), a Equação (1) pode também ser escrita como:

$$E_R = E_V E_D . \quad (2)$$

A eficiência de recuperação é uma medida da eficiência global do processo extrativo de um projeto de injeção, sendo a eficácia em remover o óleo dos poros. Pode ser usada para estimar o volume de óleo a ser recuperado devido ao projeto de injeção. Os fatores que influenciam em cada eficiência serão descritos a seguir.

2.1.1 Eficiência de varrido areal ou horizontal

Existe um grupo de esquemas de injeção nos quais os poços injetores e produtores estão uniformemente distribuídos em toda a área do reservatório, sendo conhecidas como injeção em malhas. Cada esquema tem um padrão ou malha básica que se repete por todo o reservatório. A Figura 3 mostra alguns exemplos destas configurações, sendo a malha de cinco pontos, conhecida como *five-spot*, a mais difundida em operações de recuperação secundária (ROSA et al., 2006).

Figura 3 - Esquemas de injeção: *five-spot*, *seven-spot* e *nine-spot*.

Fonte: ROSA et al. (2006) (modificado).

Em qualquer projeto, independentemente do esquema escolhido, existe uma área que está sujeita à influência da injeção. Define-se eficiência de varrido horizontal (E_A) como sendo a relação entre a área invadida pelo fluido injetado (A_{inv}) e a área total do meio poroso (A_t), ambas medidas em planta. Assim,

$$E_A = A_{inv}/A_t . \quad (3)$$

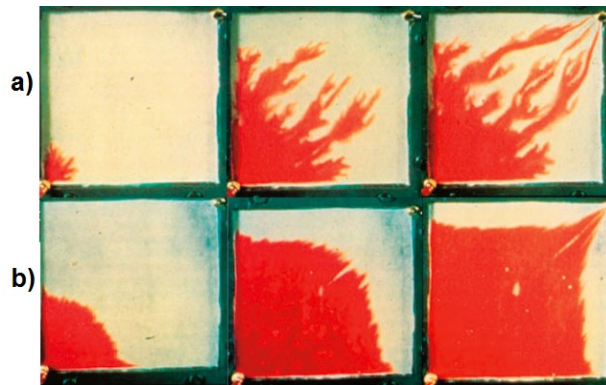
A dimensão da área invadida e, conseqüentemente, a eficiência de varrido horizontal depende da geometria de injeção, do volume de fluido injetado e da razão entre a mobilidade do fluido injetado (deslocante) e a mobilidade do fluido deslocado. Considerando que o fluido deslocante seja a água (w) e que o fluido deslocado seja o óleo (o), tem-se que a mobilidade da água (λ_w) é definida como a relação entre a sua permeabilidade efetiva (k_w) e a sua viscosidade (μ_w) nas condições de reservatório. A razão de mobilidades (M) é a relação entre a mobilidade da água (λ_w) e a mobilidade do óleo (λ_o), ou seja,

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{k_w/\mu_w}{k_o/\mu_o} = \frac{k_w \mu_o}{\mu_w k_o} , \quad (4)$$

em que μ_o é a viscosidade do óleo e k_o é a permeabilidade efetiva do óleo.

Uma razão M igual a 1 (um) significa que a água e o óleo do reservatório podem fluir através do meio poroso com a mesma facilidade, ou, com a mesma mobilidade. Quando M apresenta um valor igual a 10 (dez), por exemplo, implica que a capacidade da água de fluir é 10 vezes maior que a do óleo. Assim uma razão de mobilidade maior que 1 é considerada desfavorável. A Figura 4 mostra a injeção de água (em vermelho) que ocupa gradativamente o espaço liberado pelo óleo que está sendo produzido.

Figura 4 - Evolução da área invadida pela água em uma malha 1/4 *five-spot*, a) $M \gg 1$; b) $M \cong 1$.



Fonte: Adaptado de <<http://goo.gl/ocr4RL>>.

A Figura 4a representa uma injeção com razão de mobilidades desfavorável enquanto a Figura 4b possui razão favorável. Pode-se observar que o aumento da razão de mobilidades resulta no aumento da formação de dedos viscosos (*fingers*), e, portanto, cria caminhos preferenciais para a água, o que diminui a eficiência de varredura de óleo até o poço produtor. O objetivo da injeção de água é de varrer a maior área possível do reservatório antes de ser produzida. O momento em que a água injetada começa a ser produzida é chamado de *breakthrough*.

A redução da razão de mobilidades desfavorável ($M \gg 1$) para um valor favorável ($M \cong 1$) aumenta a eficiência de varrido. O exame da expressão da razão de mobilidades, Equação (4), mostra que pode se tornar mais favorável através da diminuição da permeabilidade efetiva da água (k_w), ou da diminuição da viscosidade do óleo (μ_o), ou do aumento da viscosidade da água (μ_w) ou também do aumento da permeabilidade efetiva ao óleo (k_o). Pouco pode ser feito para melhorar as características do fluxo de óleo no reservatório, exceto por meio dos métodos térmicos que diminuem a viscosidade do óleo. A viscosidade da água pode ser aumentada com a utilização de polímeros por exemplo.

2.1.2 Eficiência de varrido vertical

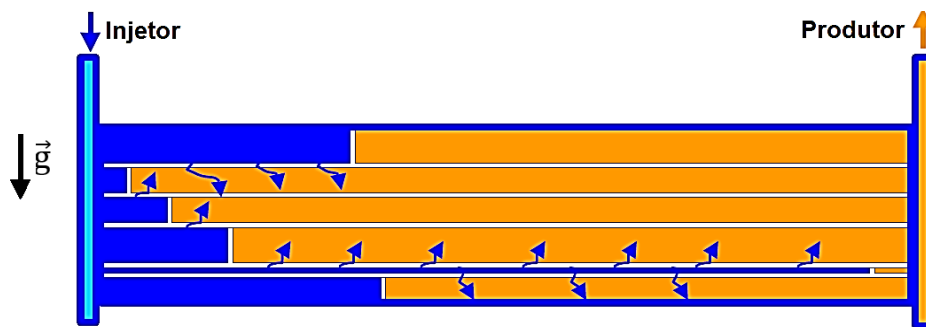
A relação entre a área vertical invadida pelo fluido injetado (A_{vi}) e a área vertical total da seção transversal do reservatório (A_{vt}) define a eficiência de varrido vertical, E_{VV} como sendo:

$$E_{VV} = A_{vi}/A_{vt} . \quad (5)$$

A Figura 5 ilustra as áreas verticais (transversais) invadidas pela água injetada. A eficiência de varrido vertical depende da seção transversal considerada, da heterogeneidade vertical, da inclinação das camadas, da densidade da água e do óleo (efeito gravitacional), da razão entre as permeabilidades vertical e horizontal, da razão de mobilidades e do volume de água injetada.

Em reservatórios estratificados, ou seja, compostos por várias camadas de diferentes permeabilidades (Figura 5), o avanço da água nas diversas camadas ocorre de maneira não uniforme, deixando zonas sem serem varridas, o que diminui a eficiência de varrido.

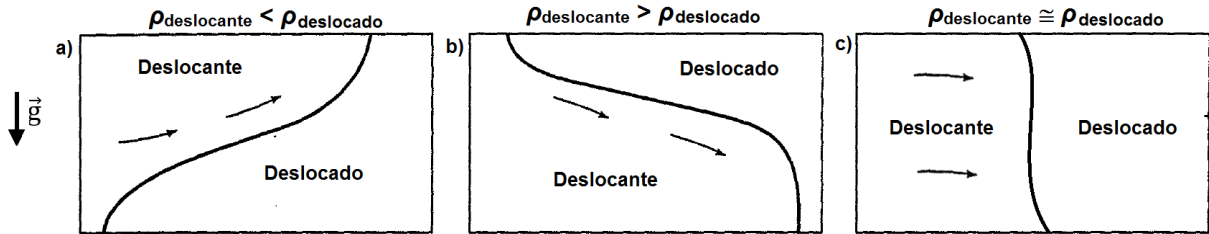
Figura 5 - Seção vertical de um reservatório estratificado.



Fonte: SANTOS (2010a) (modificado).

Embora o movimento de fluidos seja principalmente no plano horizontal, se a diferença de densidades é significativa pode induzir a movimentação dos fluidos na direção vertical, ocasionando segregação gravitacional da frente de avanço. Quando o fluido injetado é menos denso, este se desloca para a parte superior do reservatório (*gravity override*) (Figura 6a). Quando o fluido injetado é mais denso, este escoia principalmente pela parte inferior da formação (*gravity underride*) (Figura 6b). Em ambos os casos o *breakthrough* é antecipado reduzindo a eficiência de varrido vertical. Uma situação desejável é mostrada na Figura 6c, em que é obtida uma frente uniforme de avanço varrendo mais eficientemente todo o reservatório (GREEN e WILLHITE, 1998).

Figura 6 - Segregação gravitacional com fluido de diferentes densidades.

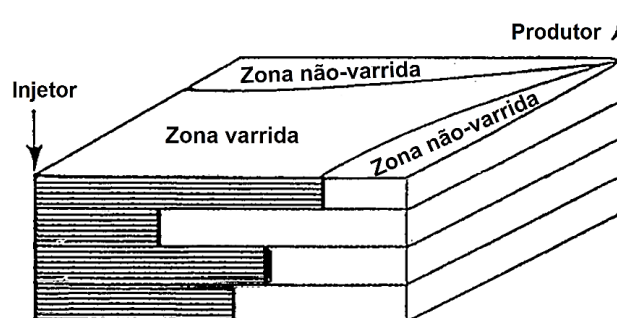


Fonte: GREEN e WILLHITE (1998) (modificado).

2.1.3 Eficiência volumétrica

Também chamada eficiência macroscópica, ou eficiência de varrido, a eficiência volumétrica (E_V) é calculada como sendo a relação entre o volume invadido pelo fluido injetado e o volume total de óleo presente na malha de injeção considerada. É uma medida da estabilidade da frente de avanço formada pela interface entre o fluido deslocante e o deslocado (óleo). A eficiência volumétrica define como o fluido efetivamente varre a jazida, tanto horizontalmente como verticalmente, em direção aos poços produtores (GREEN e WILLHITE, 1998). A eficiência volumétrica é composta pelo produto entre a eficiência de varrido horizontal (E_A) e a eficiência de varrido vertical (E_{VV}), como já mencionado. A Figura 7 ilustra este conceito.

Figura 7 - Representação da eficiência volumétrica.



Fonte: SANTOS (2010a) (Modificado).

2.1.4 Eficiência de deslocamento

Também chamada de eficiência microscópica, a eficiência de deslocamento refere-se ao deslocamento ou mobilização do óleo em escala de poro. É uma medida

da efetividade do fluido deslocante na mobilização do óleo nos poros onde o fluido injetado está em contato com o óleo (GREEN e WILLHITE, 1998). A eficiência de deslocamento (E_D) pode ser calculada da seguinte relação:

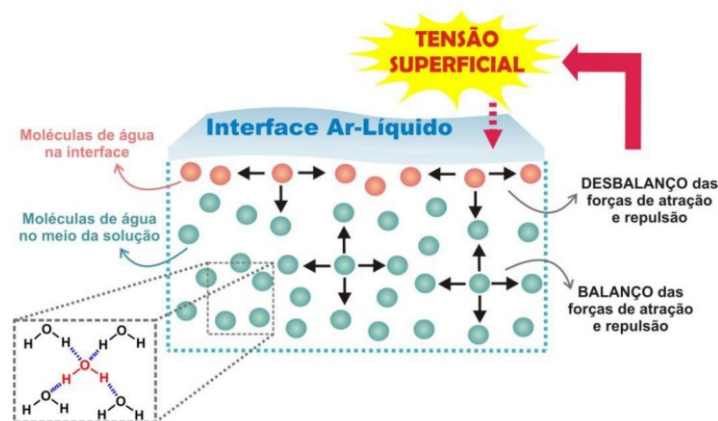
$$E_D = (S_{oi} - S_{or})/S_{oi} , \quad (6)$$

onde S_{oi} é a saturação inicial de óleo, ou seja, a fração volumétrica do espaço poroso inicialmente ocupada pelo óleo, e S_{or} é a saturação de óleo residual que representa a fração volumétrica do espaço poroso ocupada pelo óleo ao final do processo de deslocamento.

Quando a eficiência de deslocamento é baixa, o fluido injetado não desloca apropriadamente o óleo para fora da região invadida. A saturação de óleo residual, ou irreduzível, se deve à existência dos fenômenos capilares, relacionados com as tensões superficiais (formação de membranas) e interfaciais (superfície de separação) entre os fluidos e a rocha e também a geometria de poros (ROSA et al., 2006).

A tensão superficial surge como resultado de forças atrativas das moléculas no contato entre dois fluidos imiscíveis, como por exemplo, a água e o ar, conforme ilustrado na Figura 8. Diferentemente das moléculas de água no interior da solução, há um desequilíbrio das forças com as moléculas que estão na interface, levando à tensão superficial (DALTIM, 2011).

Figura 8 - Representação das forças que produzem a tensão superficial na água.



Fonte: HUSMANN e ORTH (2015).

Quando a superfície de contato se dá entre um líquido e um gás, o fenômeno e as propriedades que aí aparecem chamam-se superficiais. Quando o contato é entre

dois líquidos imiscíveis o fenômeno é denominado interfacial, como por exemplo água e óleo. Mesmo com aplicações diferentes, não existe diferença entre ambos os fenômenos, sendo esta distinção unicamente por convencionalismo (ROSA et al., 2006; BECHER, 2001). O termo interfacial é adotado neste trabalho. A tensão interfacial de um líquido será maior, quanto maiores forem as forças intermoleculares. Como a água possui atrações intermoleculares mais fortes, devido às ligações de hidrogênio, ela tem a maior tensão interfacial dentre todos os líquidos (HUSMANN e ORTH, 2015).

Uma das manifestações da tensão interfacial é a capilaridade. Um tubo capilar (ou duas placas muito próximas) parcialmente imerso em um líquido mostrará uma elevação ou uma depressão da superfície do líquido em seu interior, conforme a afinidade do material do tubo com o líquido (SAMPAIO et al., 2007).

O fenômeno da capilaridade sempre ocorre no interior dos meios porosos que constituem os reservatórios de petróleo por apresentarem, além de fluidos imiscíveis, capilares. Como estes fluidos estão em contato com o material que é formada a rocha, outro conceito importante é o fenômeno da molhabilidade.

A molhabilidade é a tendência de um fluido se espalhar ou se aderir sobre uma superfície sólida na presença de outra fase imiscível. Quando duas fases imiscíveis são colocadas em contato com uma superfície sólida, uma fase geralmente é atraída para o sólido mais fortemente do que a outra fase. A fase mais fortemente atraída é chamada a fase molhante, e a outra fase é denominada não molhante. A forma da interface entre fluidos imiscíveis resulta da interação entre as forças moleculares que atuam nas interfaces líquido-líquido e líquido-sólido (GREEN e WILLHITE, 1998; GUILLEN NÚÑEZ, 2007 e 2011). Assim, num sistema óleo-água em contato com uma superfície sólida, conforme representado na Figura 9, a tensão de adesão (σ_A) é definida como:

$$\sigma_A = \sigma_{so} - \sigma_{sw} = \sigma_{wo} \cos \theta_c , \quad (7)$$

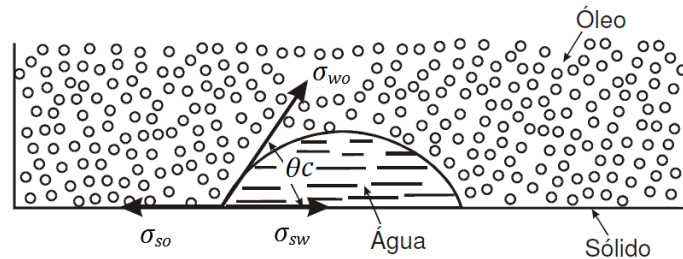
de onde se obtém que:

$$\cos \theta_c = \frac{\sigma_{so} - \sigma_{sw}}{\sigma_{wo}} , \quad (8)$$

onde σ_{so} é a tensão interfacial entre o sólido e o óleo, σ_{sw} a tensão interfacial entre o

sólido e a água, σ_{wo} é a tensão interfacial entre a água e o óleo e θ_c é o ângulo de contato.

Figura 9 - Ângulo de contato θ_c da água (fluido molhante).



Fonte: ROSA et al. (2006) (adaptado).

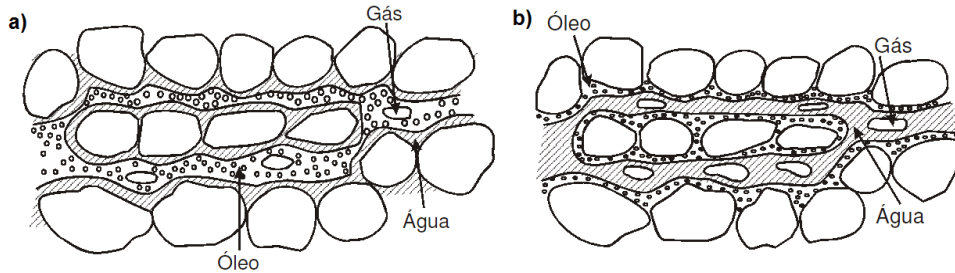
A tensão de adesão é a responsável pela ascensão ou depressão de fluidos em capilares, ou seja, determina qual fluido molha preferencialmente o sólido. Se $\sigma_{sw} < \sigma_{so}$ então $\sigma_A > 0$, a superfície sólida é molhada preferencialmente pela água. Se $\sigma_{sw} > \sigma_{so}$ então $\sigma_A < 0$, a superfície sólida é molhada preferencialmente pelo óleo. Uma tensão de adesão igual a zero indica que ambas as fases têm a mesma afinidade pela superfície sólida. A molhabilidade pode também ser definida pelo ângulo de contato θ_c (variando entre 0° e 180°) medido no fluido mais denso. Quando esse ângulo de contato é menor que 90° diz-se que o líquido mais denso molha preferencialmente o sólido, no caso a água, e quando é maior que 90° diz-se que o líquido menos denso molha preferencialmente o sólido (ROSA et al., 2006). Assim, quanto maior for a tensão interfacial, maior será o ângulo de contato do líquido com a superfície, e conseqüentemente, menor será sua molhabilidade (HUSMANN e ORTH, 2015).

Nos reservatórios de petróleo, observa-se que o meio poroso, na maioria dos casos, é molhado preferencialmente pela água na presença do óleo. A distribuição desses fluidos no interior do meio poroso pode ser ilustrada pela Figura 10a. Existem casos em que o reservatório é molhado preferencialmente pelo óleo. Em tais situações, a mobilização do óleo é mais difícil. A distribuição desses fluidos nos poros é esquematizada na Figura 10b.

A molhabilidade também afeta a permeabilidade relativa. A permeabilidade de um meio poroso é uma medida de sua capacidade de se deixar atravessar por fluidos. No caso em que dois ou mais fluidos saturam o meio poroso, a capacidade de transmissão de um desses fluidos chama-se permeabilidade efetiva do meio poroso ao fluido considerado. A soma das permeabilidades efetivas é a chamada

permeabilidade absoluta. O quociente entre a permeabilidade efetiva e a permeabilidade absoluta é denominado permeabilidade relativa ao fluido (ROSA et al., 2006).

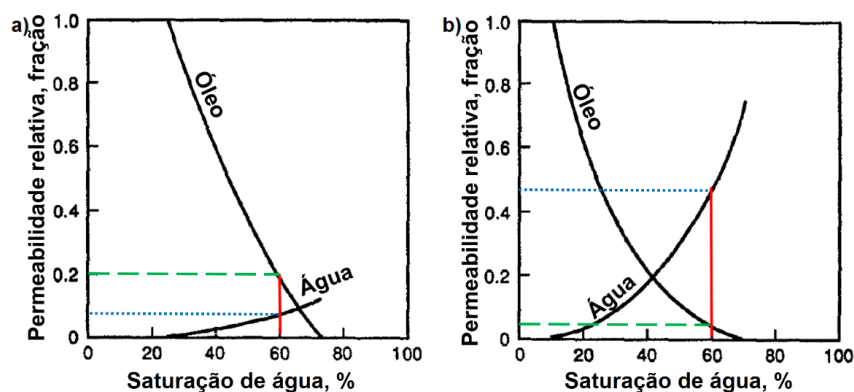
Figura 10 - Distribuição dos fluidos no meio poroso devido à molhabilidade.



Fonte: ROSA et al. (2006).

A Figura 11 mostra curvas típicas de permeabilidade relativa de uma rocha molhada por água (a) e molhada por óleo (b) em função da saturação de água. Tomando por exemplo uma saturação de água de 60 % para ambos os casos, a permeabilidade relativa à água é muito maior quando a água é a fase não molhante (b), tendo aproximadamente um valor de 0,47, e de 0,08 para quando a água for a fase molhante (a). A permeabilidade relativa ao óleo é maior quando a água é a fase molhante (a), tendo aproximadamente um valor de 0,2, e de 0,05 para quando o óleo for à fase molhante (b). Assim, quanto maior molhabilidade da rocha à água, menor é a saturação de água posicionada no centro dos poros, competindo com o óleo nos caminhos mais permeáveis, aumentando a permeabilidade relativa ao óleo e, conseqüentemente, a eficiência de deslocamento.

Figura 11 - Efeito da molhabilidade nas curvas de permeabilidade relativa: a) rocha molhada por água, e b) rocha molhada por óleo.



Fonte: GREEN e WILLHITE (1998) (adaptado).

Para que ocorra um decréscimo significativo da saturação de óleo residual, é necessário promover um aumento do número de capilaridade (C_a), dada por:

$$C_a = \frac{\text{forças viscosas}}{\text{forças capilares}} = \frac{\bar{v}\mu_w}{\sigma}, \quad (9)$$

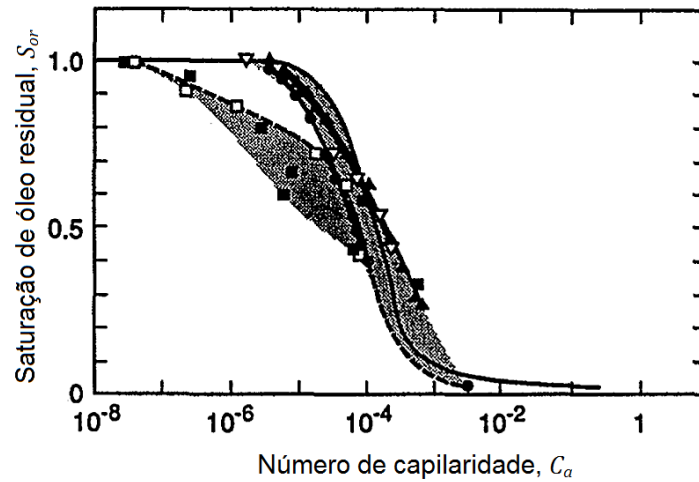
onde \bar{v} a velocidade média da água injetada (m/s), μ_w a viscosidade da água (N.s/m²) e σ a tensão interfacial (N/m).

O número de capilaridade representa a razão entre as forças viscosas associadas ao escoamento da fase deslocante e as forças capilares entre as fases, que dificulta o deslocamento da outra fase. O aumento do C_a desloca o balanço para o lado das forças viscosas e, conseqüentemente, diminui a saturação de óleo no poro.

O exame da Equação (9) mostra que o seu valor pode se tornar mais favorável por meio do aumento da velocidade de injeção de água e da sua viscosidade, ou/e diminuição da tensão interfacial. Aumentar a velocidade de injeção de água seria uma opção bastante antieconômica, em virtude da necessidade de bombas mais robustas para aumentar a vazão de bombeio, o que elevaria os custos. As alternativas mais viáveis seriam aumentar a viscosidade da água injetada mediante uso de polímeros, e/ou diminuir a tensão interfacial entre os fluidos utilizando surfactantes por exemplo. Portanto, para mobilizar o óleo trapeado, retido na rocha, os métodos de recuperação devem promover o aumento do número de capilaridade.

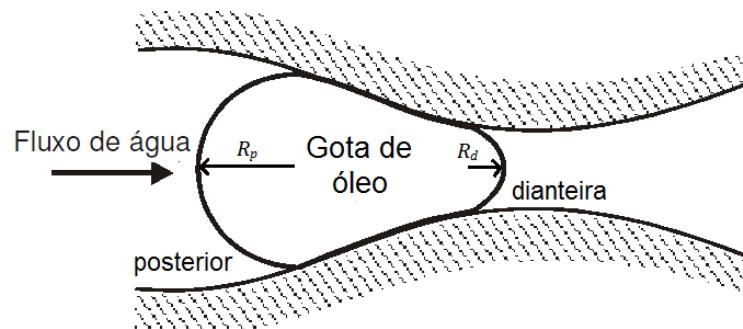
A correlação entre a saturação de óleo trapeado (residual) e o número de capilaridade é obtida em ensaios de deslocamento de óleo por água com diferentes valores do C_a . Construindo-se, dessa forma, a curva de saturação capilar do meio (FARIAS, 2013). A Figura 12 mostra esta correlação em que aumentos do C_a reduzem a saturação de óleo residual. Valores típicos de C_a estão entre 10^{-7} e 10^{-4} (GREEN e WILLHITE, 1998).

Outro fator importante para a mobilização do óleo trapeado é o efeito *Jamin*, que está relacionado com a pressão necessária para deslocar um fluido não molhante através de um espaço poroso com redução de área aberta ao fluxo. Considere-se uma gota de óleo entrando numa garganta de poro de dimensão menor do que a gota, como se mostra na Figura 13.

Figura 12 - Influência da variação do C_a na diminuição da saturação de óleo residual.

Fonte: GREEN e WILLHITE (1998) (adaptado).

Figura 13 - Gota de óleo penetrando em uma restrição de um poro.



Fonte: ROSA et al. (2006) (adaptado).

O fluxo de gotas e suspensões é muito similar ao fluxo de emulsões óleo em água em meios porosos. Ao contrário das partículas sólidas, as gotas de óleo podem ser movidas através da garganta do poro incrementando o diferencial de pressão (ΔP) ao longo do poro (MONTALVO, 2008).

A resistência oferecida pela gota de óleo ao escoamento através da garganta está relacionada com a pressão capilar (ΔP_{cap}) nas partes dianteira e posterior da gota, dada pela Equação (10).

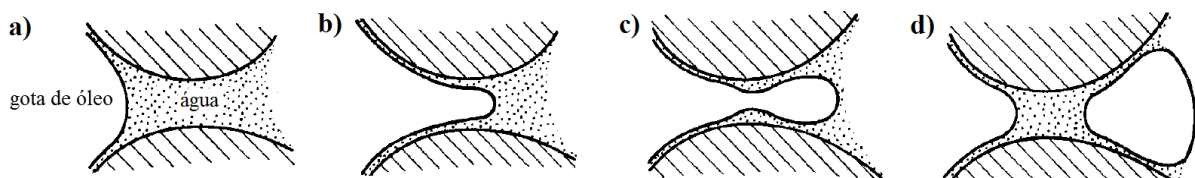
$$\Delta P_{cap} = 2\sigma \left[\frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_p} \right]. \quad (10)$$

O raio de curvatura da parte dianteira da gota (R_d) é menor do que na parte posterior (R_p), e conseqüentemente a pressão capilar (ΔP_{cap}) é maior na parte

dianteira da gota do que na parte posterior. Portanto, um diferencial de pressão maior ($\Delta P > \Delta P_{cap}$) é necessário para movimentar a gota através da garganta.

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 (σ), o que resulta em um trapeamento residual de fluido. Este fenômeno é geralmente chamado de *snap-off*, *choke-off*, *pinch-off* ou *break-up* (Figura 14). Nesta figura, óleo (fase não molhante) se movimenta ao longo da garganta, de montante para jusante, deixando aderida nas paredes superior e inferior dos poros um filme de água (fase molhante) (Figura 14a-b). Devido a uma diferença na curvatura interfacial, a água é conduzida por tensão superficial formando um colar crescente na garganta do poro (Figura 14c). 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 gota de óleo a jusante da garganta (Figura 14d) (GAUGLITZ e RADKE, 1990). Este processo é lento e repetido várias vezes.

Figura 14 - Fenômeno *snap-off*: a) uma gota de óleo encontra uma garganta, b) e c) alongamento da gota através da garganta, e d) formação de outra gota de óleo.

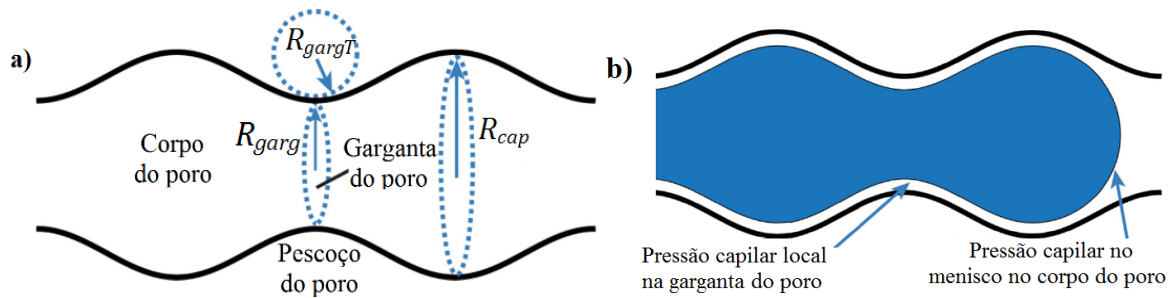


Fonte: GAUGLITZ e RADKE (1990) (adaptado).

Roof (1970) apresentou um critério para determinar o início deste fenômeno em um poro circular. A ideia principal é que, quando a pressão capilar à jusante do fluido não molhante (óleo) é menor do que a pressão capilar local na garganta do poro, o fluido molhante 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.

Na Figura 15a, 'corpo do poro' refere-se à seção do poro fora da garganta, 'pescoço do poro' é a parte estrangulada do poro, e mais estreita do pescoço é a 'garganta do poro'. A Figura 15b, '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.

Figura 15 - Geometria do capilar com garganta de acordo com o modelo de Roff (1970).



Fonte: DENG et al. (2014) (adaptado).

As curvaturas do corpo e da garganta do poro são $1/R_{cap}$ e $1/R_{garg}$, respectivamente, e $1/R_{gargT}$ é a curvatura transversal da garganta de poro. A pressão capilar local na garganta do poro é dada por $\sigma (1/R_{garg} + 1/R_{gargT})$, onde σ é a tensão interfacial. A pressão capilar através do menisco no corpo de poro é dada por $2\sigma/R_{cap}$. De acordo com o modelo de Roff, o *snap-off* ocorre quando parâmetros geométricos como o raio do capilar (R_{cap}), ou corpo do poro, raio da garganta do poro (R_{garg}), e raio de curvatura transversal a garganta (R_{gargT}), ilustrados na Figura 15, atendem a relação (DENG et al., 2014; BERESNEV e DENG, 2010):

$$\frac{2}{R_{cap}} < \frac{1}{R_{garg}} + \frac{1}{R_{gargT}} \quad (11)$$

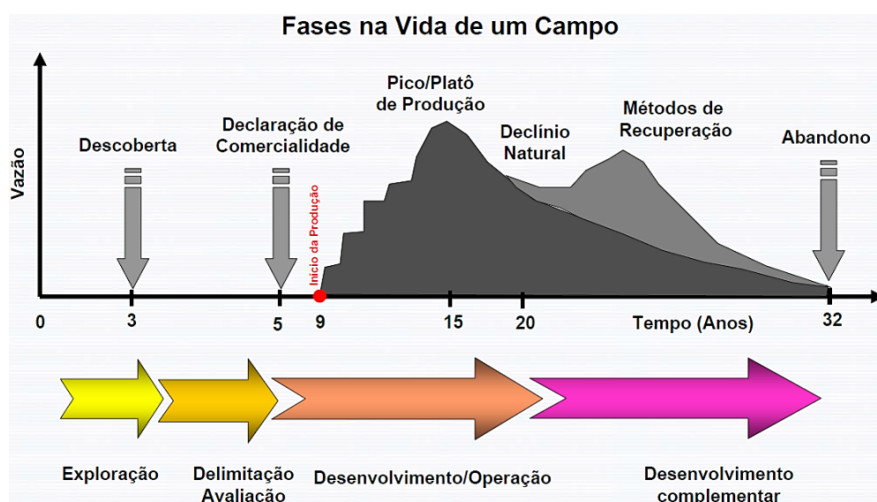
O *snap-off* resulta em trapeamento de óleo no meio poroso na forma de gotas isoladas mensurado através da saturação de óleo residual, S_{or} . Os métodos de recuperação objetivam diminuir esta quantidade de óleo retido no reservatório, para o qual e como já mencionado é necessário promover um aumento acentuado do número de capilaridade (C_a), conforme mostrado na Figura 12. Romero e Fejoli (2015) verificaram 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 (1982) destaca que a mobilização do óleo trapeado por *snap-off* é a principal razão para o aumento da recuperação do óleo.

Em resumo, a eficiência de deslocamento é afetada pela razão de mobilidades, volumes injetados, efeitos gravitacionais, vazão de injeção, molhabilidade, permeabilidade relativa, número de capilaridade, pressão capilar e geometria do poro.

2.2 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE PETRÓLEO

Os reservatórios de petróleo possuem um “ciclo de vida”, que começa com uma curva ascendente até atingirem o pico de produção e depois decair. As fases da vida de um campo desde a sua descoberta até o momento do abandono são ilustradas na Figura 16. Observa-se que o pico de produção, também chamado de platô, é atingido geralmente nos cinco primeiros anos a partir do início da produção. Essa etapa representa a capacidade de produção máxima, para o qual os equipamentos de produção foram dimensionados. Após esta fase, inicia-se o período de declínio em direção ao limite econômico. Entretanto, se houver aplicação de técnicas de recuperação (convencional e especial), esta curva de declínio pode ser desacelerada, aumentando a produção de óleo por um tempo adicional (LUCZYNSKI, 2002).

Figura 16 - Fase da vida de um campo de petróleo.



Fonte: NAVEIRA (2007).

No início da produção, os reservatórios de petróleo possuem certa quantidade de energia natural denominada de energia primária. O processo de recuperação de óleo de um reservatório por meio da energia primária é chamado de recuperação primária, também chamada de produção por surgência. Os três principais mecanismos responsáveis por essa energia são: gás em solução, capa de gás e influxo de água. A intensidade dessa energia é determinada pelo volume e pela natureza dos fluidos existentes na acumulação, bem como pelos níveis de pressão e de temperatura do reservatório. Durante a produção, a energia decai em função da

descompressão dos fluidos e pelas resistências encontradas no escoamento em direção aos poços produtores. Essas resistências se devem às forças viscosas, capilares e tortuosidades presentes no meio poroso. O decréscimo da energia primária reflete-se principalmente na queda da pressão do reservatório, resultando numa redução de produtividade (ROSA et al., 2006). Segundo Bressan (2008), o fator de recuperação máximo de óleo original de um reservatório de petróleo na recuperação primária é de 15 %, possuindo baixa eficiência.

Reservatórios com mecanismos de produção pouco eficientes, que retêm grandes quantidades de hidrocarbonetos após a exaustão da sua energia natural, são fortes candidatos ao emprego de um método convencional de recuperação (denominado antigamente de recuperação secundária). Os métodos convencionais são processos que possuem tecnologias bem conhecidas e cujo grau de confiança na aplicação é bastante elevado. A recuperação convencional é um processo pelo qual uma quantidade adicional de óleo é produzida por suplementação da energia primária, artificialmente transferida para a jazida, ou por meios que tendem a tornar a energia primária mais eficiente, utilizando como fluido de injeção principalmente a água. A injeção de água é responsável por mais da metade da produção de óleo no mundo.

Não é necessário esperar o declínio total da energia natural para começar a injeção de água e/ou gás no reservatório. Mesmo havendo energia para a produção primária, o método de recuperação convencional é aplicado. Existe uma prática recomendada chamada de “manutenção de pressão”, que consiste na injeção desses fluidos no início da vida produtiva do reservatório com objetivo de manter a pressão em níveis elevados, preservando melhor as características dos fluidos e do fluxo (SANTOS et al., 2010).

É importante mencionar que após a injeção de água nem todas as áreas do reservatório foram contatadas, que devido às forças capilares deixou aprisionado gotas microscópicas de óleo (óleo residual) no meio poroso. O óleo residual representa de 60% a 90% de todo o óleo ainda no reservatório (depois da injeção de água) (ROCA REYES, 2011).

Em um determinado campo ou mesmo país é comum o número de projetos de recuperação convencional aumentar até atingir um pico e depois declinar. Isso ocorre porque deixam de existir reservatórios adequados para a aplicação desses métodos, em termos econômicos. Nesse ponto, surge a questão de como fazer para manter ou reduzir a taxa de declínio das vazões de produção. Uma resposta seria recuperar parte

do óleo residual deixado pela recuperação convencional. Ao final da recuperação convencional uma média de 50 % do óleo permanece no reservatório, em virtude de uma eficiência de varrido pobre e do trapeamento do óleo nos capilares e poros. Segundo Bressan (2008), o fator de recuperação máximo de óleo original de um reservatório de petróleo na recuperação convencional fica entre 20 e 35 %.

Os métodos de elevação artificial e de estimulação de poços não se incluem entre os métodos de recuperação, pois não afetam diretamente as energias expulsivas do reservatório (ROSA et al., 2006).

No passado, os métodos aplicados após a fase de recuperação convencional eram os chamados métodos de recuperação terciária. Os métodos eram então classificados de acordo com a sua cronologia de aplicação em um determinado campo ou reservatório. O inconveniente de considerar as três etapas de recuperação como uma sequência cronológica é que muitas operações de produção não são conduzidas numa ordem especificada. Por exemplo, em reservatórios de óleos pesados, o óleo dificilmente irá escoar pela influência da energia primária, pois existe uma alta razão de viscosidades entre o óleo e a água. Neste caso, a utilização de energia térmica (método de recuperação especial) seria o único caminho para recuperar uma quantidade significativa de óleo, sendo então empregado no início da produção do reservatório (MONTALVO, 2008).

Por causa desta e outras situações, o termo “recuperação terciária” caiu em desuso na literatura de engenharia de petróleo e a designação do termo *enhanced oil recovery* (EOR), que traduzido para o português significa “recuperação avançada de óleo” ou “recuperação especial de óleo”, tornaram-se mais aceitos (MONTALVO, 2008).

O alvo para aplicação da recuperação especial varia para os diferentes tipos de petróleo. Para reservatórios de óleo leve a recuperação especial é geralmente aplicada após as operações de recuperação convencional. Já reservatórios de óleos pesados e ultra pesados (areias betuminosas) respondem mal a recuperação primária e convencional, sendo a produção de tais reservatórios pelos métodos especiais (THOMAS, 2007).

Outra denominação comumente utilizada é *Improved Oil Recovery* (IOR), que no português significa “recuperação melhorada de óleo”. A diferença entre os termos EOR e IOR é que o segundo engloba, além dos métodos convencionais de recuperação secundária e os métodos especiais de recuperação secundária,

quaisquer outros métodos ou técnicas que aumentem a recuperação e/ou aceleram a produção, como por exemplo, melhoras na caracterização/gerenciamento de reservatórios, novos fluidos de injeção, técnicas de perfuração (poços multilaterais), completação inteligente, etc.

Os diferentes métodos EOR geralmente envolvem a injeção de algum tipo de fluido no reservatório e, dependendo do método escolhido, produtos químicos são utilizados. O fluido injetado suplementa a energia primária e, além disso, interage com o sistema rocha/óleo no reservatório, criando condições favoráveis para o escoamento do óleo. Estas interações podem resultar na diminuição da tensão interfacial, na redução da viscosidade do óleo, aumento da viscosidade da água, na expansão do óleo e na modificação da molhabilidade. Um método escolhido pode apresentar várias interações atuantes ou pelo menos uma interação principal.

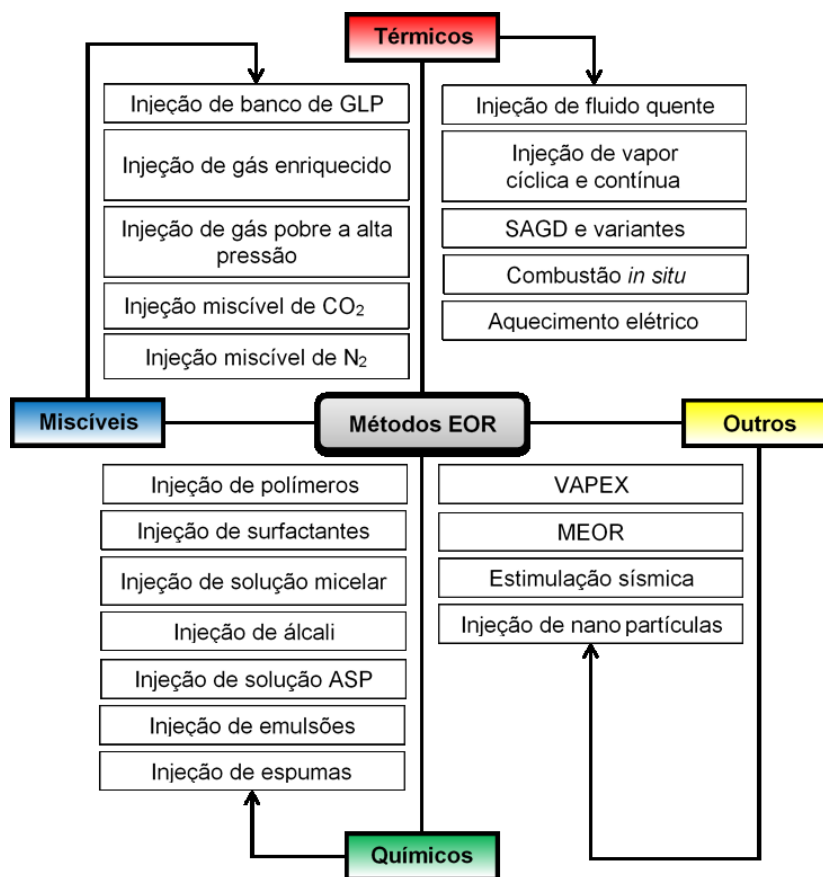
Segundo Bressan (2008), o fator de recuperação máximo de óleo original de um reservatório de petróleo na recuperação especial fica entre 40 e 45 %.

Os métodos especiais atuam nos pontos onde o processo convencional falhou, ou falharia caso fosse empregado. Alguns métodos ainda não estão satisfatoriamente desenvolvidos por apresentarem tecnologia complexa. Para cada tipo de método, há limitações, bem como alguns efeitos secundários indesejáveis. Por exemplo, alguns métodos são caros, alguns necessitam de interromper temporariamente a produção, ou podem criar efeitos ecológicos prejudiciais (BERESNEV e JOHNSON, 1994).

Os métodos EOR podem ser agrupados, de acordo com a natureza geral dos processos, em quatro grandes categorias: métodos miscíveis, métodos térmicos, métodos químicos e outros métodos, como mostrado na Figura 17. O método a ser utilizado vai depender das características do reservatório, da rocha, dos fluidos presentes, bem como as interações rocha-fluido e do retorno monetário do investimento. Além disso, antes de qualquer implementação de um método, é necessário elaborar um projeto metucioso, incluindo simulações numéricas cruciais, quantidades adequadas de produtos de injeção e químicos e análise econômica do processo (BARILLAS et al., 2008; ROCA REYES, 2011). Dessa forma, antes do desenvolvimento de um campo de petróleo, é necessário saber como este reservatório responderá às técnicas de produção escolhidas para a exploração, pois altos custos estão envolvidos. É desejável aplicar um método de recuperação que possa extrair ao máximo possível de forma econômica, trazendo assim, máximo lucro para a companhia exploradora.

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 (KOROTEEV et al., 2013). 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.

Figura 17 - Classificação geral dos métodos especiais de recuperação secundária.



Fonte: FEJOLI (2014).

Os métodos EOR tem um papel importante a desempenhar no futuro do abastecimento de energia. Estudos têm mostrado que se a recuperação for apenas 1 % mais eficiente no mundo, seria possível dispor de 88 bilhões de barris de petróleo adicionais, quantidade equivalente a três anos de produção nas condições atuais. A recuperação avançada de petróleo atualmente contribui com 4 % da produção mundial, podendo aumentar 20 % até 2030 (IEA, 2010).

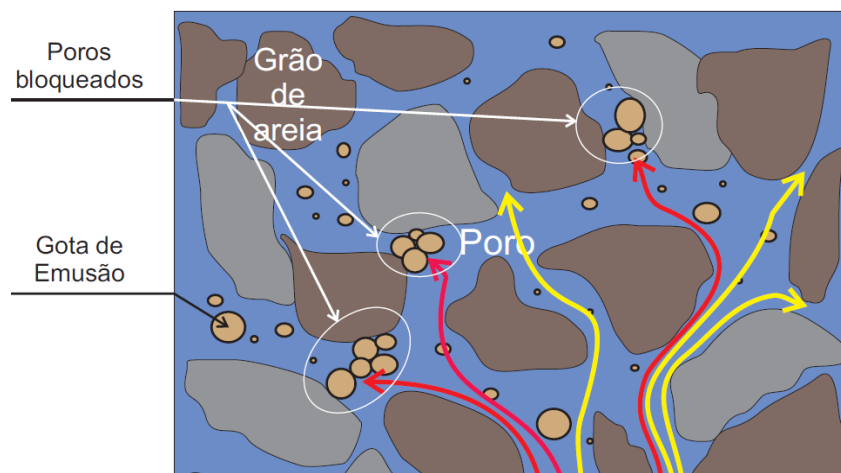
Dentre os diferentes métodos de EOR com grande potencial de melhoria do fator de recuperação, pode-se citar a injeção de emulsões. A teoria acerca dos outros métodos especiais de recuperação pode ser encontrada em Fejoli (2014).

2.3 EMULSÕES

Emulsões são definidas com um sistema heterogêneo de pelo menos dois líquidos imiscíveis, onde um deles está disperso em forma de gotas (fase dispersa) no outro (fase contínua), na presença de agentes emulsificantes (surfactantes). O surfactante ajuda na formação de uma interface estendida, mediante a redução da tensão interfacial entre os dois fluidos, favorecendo a formação da emulsão e estabilizando as gotas para evitar a coalescência (GUILLEN NÚÑEZ, 2011).

O princípio deste método é projetar e injetar emulsões com a finalidade de bloquear os poros de zonas de alta permeabilidade que já foram varridas por processos de recuperação anteriores, como por exemplo a injeção de água. Com a diminuição da permeabilidade efetiva destas zonas, é possível deslocar o óleo residual nas zonas de baixa permeabilidade, que ainda não foram varridas, melhorando a recuperação de óleo, como mostrado na Figura 18 (SHAH, 1985; BRAGG, 1999; CASTILLO, 2011). A eficiência deste bloqueio parcial depende fortemente da geometria do poro, das características morfológicas e propriedades físicas da emulsão injetada (MONTALVO, 2008).

Figura 18 - Aglomeração e bloqueio de poros com gotas de emulsão.



Fonte: GUILLEN NÚÑEZ (2011).

Normalmente, a formação de emulsões durante a produção de petróleo é considerada indesejável e pode causar sérios problemas. Emulsões devem ser tratadas antes dos processos de refino, pois, além de incrementar o custo de transporte, a presença de água gera outros problemas de manutenção, como por exemplo problemas de corrosão.

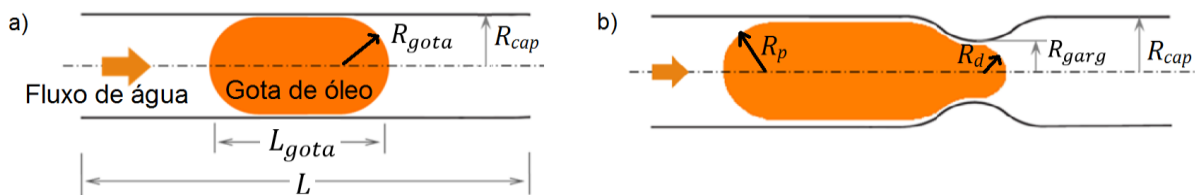
2.4 MECANISMOS DE BLOQUEIO DAS EMULSÕES

A variação da mobilidade do escoamento de uma gota de óleo através de um capilar, isto é, o bloqueio parcial do escoamento, ocorre por dois diferentes mecanismos: viscoso e capilar.

No mecanismo de bloqueio viscoso, f_μ , o incremento da queda de pressão é produzido pela substituição de fluido de baixa viscosidade, neste caso a fase contínua, água, por outro de elevada viscosidade, fase dispersa, óleo, como mostrado na Figura 19a.

No mecanismo de bloqueio capilar, f_σ , o incremento da queda de pressão no escoamento bifásico é gerado pela variação da curvatura (deformação) da gota de óleo na sua passagem através da garganta do capilar, como mostrado na Figura 19b.

Figura 19 - Esquema do escoamento de uma gota de óleo através de um capilar molhado por água a) reto e b) com garganta.



Fonte: CASTILLO (2011) (adaptado).

Castillo (2011) propôs relações do fator de bloqueio para cada mecanismo. O mecanismo de bloqueio viscoso é expresso na seguinte equação:

$$f_\mu = \frac{\bar{k}}{\bar{k}(1-\xi)+\xi} \quad (12)$$

em que:

$$\xi \sim \frac{L_{gota}}{L}, e \quad (13)$$

$$\bar{k} = \frac{Q}{\Delta P_g/L} = 1 + \left(\frac{R_{gota}}{R_{cap}} \right)^4 \left[\frac{\mu_w}{\mu_o} - 1 \right], \quad (14)$$

onde ξ é a concentração da fase dispersa da gota, L_{gota} é o comprimento da gota, L é o comprimento do capilar, \bar{k} é mobilidade do escoamento bifásico em um capilar de raio R_{cap} . A mobilidade, \bar{k} , cai à medida que o raio da gota, R_{gota} , aproxima-se ao raio do capilar, e $\mu_o \rightarrow \infty$.

Este mecanismo é caracterizado pelo decréscimo do fator de bloqueio. O número de capilaridade apresenta uma dependência fraca com o mecanismo viscoso.

Já o mecanismo de bloqueio capilar é expresso na seguinte equação:

$$f_\sigma = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_c + \Delta P_{cap}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{cap}^2}{4LCa} \left(\frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_p} \right)}, \quad (15)$$

onde R_d e R_p são os raios de curvatura da parte dianteira e posterior da gota, respectivamente, e ΔP_{cap} é a diferença de pressão capilar requerida para mover a gota através da garganta do poro. O fator de bloqueio para este mecanismo leva em consideração a queda de pressão produzida no escoamento da fase contínua (ΔP_c) através do capilar e a pressão capilar (ΔP_{cap}). Se a diferença de pressão atual ao longo do poro é menor do que a pressão capilar, a gota de óleo ficará retida na garganta do poro (SCHRAMM, 1996).

Neste mecanismo, o decréscimo do fator de bloqueio é mais forte em capilares com gargantas menores e a baixos valores do número de capilaridade. Para valores do número de capilaridade altos, o fator de bloqueio se aproxima de 1, demonstrando uma forte dependência do escoamento com o número de capilaridade.

2.4.1 Literatura consultada sobre o tema

Nesta seção, são apresentados os estudos realizados na área de escoamento de suspensões e/ou emulsões em capilares reto e com garganta, que serviram de

base e motivação para a presente dissertação.

McAuliffe (1973) apresentou resultados de teste de campo em poços de injeção de água que o uso de emulsões óleo em água levou a uma mudança na eficiência de varrido volumétrico, em que emulsões com tamanho de gota igual ou ligeiramente maior que o diâmetro da garganta acarretavam em uma melhoria na produção de óleo.

Olbricht e Leal (1983) avaliaram o escoamento de uma gota em capilares com garganta de diâmetro variável, observando oscilações de pressão devido a passagem da gota através das gargantas em função do número de capilaridade e da razão de viscosidades entre as fases. As gotas possuíam tamanho da ordem do diâmetro da garganta. Observaram que a gota experimenta uma grande alteração morfológica ao fluir por uma restrição. Esta deformação é acompanhada por uma queda de pressão adicional quando comparado com capilares retos. Este aumento na queda de pressão pode ser responsável pela retenção de gotas em certas condições de gradiente de pressão e de diâmetro de garganta.

Bragg (1999) apresentou um estudo de injeção de emulsões, fundamentado em diversos testes de sucesso em campos, como um método químico alternativo de recuperação de óleo pesado com a capacidade de desenvolver um eficiente controle da mobilidade da água no deslocamento do óleo através do meio poroso. Ele considera a aplicação da injeção de emulsões mais favorável que o uso da injeção de polímeros.

Montalvo (2008) demonstrou e quantificou o fenômeno de bloqueio parcial de capilares com garganta devido ao escoamento de emulsões óleo em água. Os efeitos da geometria das gargantas dos capilares demonstraram que quanto menor o tamanho da garganta, maior a intensidade de bloqueio parcial.

Cobos et al. (2009) estudaram o fluxo de emulsões de óleo em água através de capilares de quartzo com garganta. Eles caracterizaram o efeito da fase dispersa no fluxo utilizando o fator de bloqueio. Os resultados mostraram que, quando as gotas são muito menores do que o diâmetro da garganta, o fator de bloqueio é independente do número de capilaridade. Por outro lado, quando as gotas possuem um diâmetro semelhante ou maior que o diâmetro da garganta o fator de bloqueio é uma forte função do número de capilaridade.

Roca Reyes (2011) e Roca e Carvalho (2013) apresentaram um estudo numérico resolvido pelo acoplamento totalmente implícito de um método de *Level-set* modificado ao método de elementos finitos. Este estudo obteve as mesmas relações

de dependência com o tamanho de gota apresentadas no estudo experimental de Cobos et al. (2009). Para um capilar reto, gotas com diâmetro inferior a 0,4 do diâmetro do capilar não afetam o escoamento e o fator de bloqueio decai minimamente com o aumento do tamanho da gota, sendo praticamente insensível a alterações no número de capilaridade. No caso de capilar com garganta, o fator de bloqueio diminui consideravelmente à medida que o número de capilaridade cai e o tamanho de gota aumenta.

Castillo (2011) estudou o escoamento de emulsões em meios porosos mediante abordagens experimentais utilizando um capilar com garganta conectando dois poros adjacentes. Foi quantificado a queda de pressão para diferentes vazões com emulsões de três tamanhos de gota e duas concentrações de óleo em dois capilares diferentes. Os resultados confirmaram que a razão entre o diâmetro da garganta do capilar e o tamanho de gota influencia fortemente a relação vazão-queda de pressão. Os resultados mostraram que, para baixos números de capilaridade, o escoamento de emulsões é dominado por efeitos capilares e leva a uma diminuição da mobilidade local.

Torquato (2015) estudou o escoamento de emulsões por meio modelagem numérica tridimensional do escoamento de uma gota imersa em fase contínua escoando em um capilar com garganta utilizando o método de Lattice-Boltzmann. O autor realizou simulações variando a velocidade do fluxo, a razão de viscosidades dos fluidos, a relação entre os diâmetros da gota e do tubo e a magnitude da tensão interfacial para verificar a influência desses parâmetros na redução da mobilidade do escoamento. Concluiu que o fator de bloqueio reduz com a razão de viscosidade e com o tamanho da gota, assim como fora determinado numericamente por Roca-Reyes (2011) com o método *Level-set*. Também notou uma pequena sensibilidade do fator de bloqueio ao número de capilaridade, assim como estabelecido experimentalmente por Castillo (2011).

Visando compreender a dinâmica do contato na interface água/óleo, Morais et al. (2016) 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 e o número de capilaridade.

2.4.2 Modelos matemáticos do fator de bloqueio

Para o escoamento laminar completamente desenvolvido no interior de um capilar horizontal, onde o gradiente de pressão é constante, a vazão pode ser expressa como uma função da queda de pressão (FOX e McDONALD, 2006). No caso do escoamento monofásico, por exemplo água, de viscosidade μ_w , através de um capilar reto de raio R_{cap} e comprimento L , a vazão Q_m é:

$$Q_m = \frac{\pi R_{cap}^4 \Delta P_c}{8\mu_w L}, \quad (16)$$

onde ΔP_c é o gradiente de pressão provocado pela fase contínua.

No caso do escoamento através de capilares com garganta, a vazão incluindo a fase dispersa, como por exemplo uma gota de óleo, pode ser expressa utilizando a Equação (16), com três alterações. Primeira, a queda de pressão produzida pela passagem da gota é considerada como uma queda de pressão adicional à queda de pressão produzida no escoamento da fase contínua. Segunda, o gradiente de pressão por unidade de comprimento ($\Delta P/L$) produzido no capilar com garganta é equivalente ao gradiente de pressão por unidade de comprimento produzido num capilar reto com um raio equivalente \bar{R}_{mc} . E terceira, a viscosidade das duas fases é aproximada à viscosidade da fase contínua. Desta forma, incluindo um coeficiente que relacione as aproximações descritas anteriormente, a Equação (17) foi desenvolvida para calcular a vazão do escoamento bifásico, Q_b , através de um capilar com garganta (CASTILLO, 2011):

$$Q_b = f \frac{\pi \bar{R}_{cap}^4 \Delta P_g}{8\mu_w L}, \quad (17)$$

onde ΔP_g é o gradiente de pressão total que inclui a presença gota e \bar{R}_{mc} é o raio equivalente de um capilar reto.

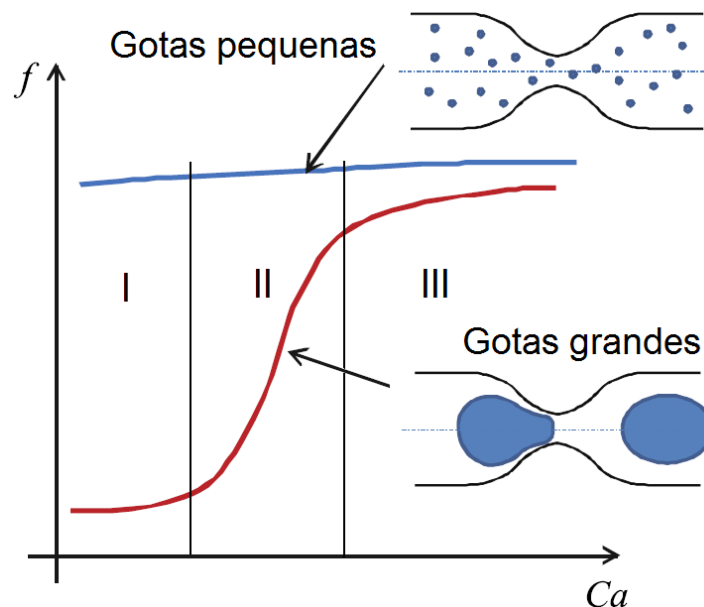
Para um mesmo valor de vazão ($Q_m = Q_b$), o coeficiente f , pode ser definido em função de ambas as quedas de pressão, como apresentado na Equação (18).

$$f = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{gota_max}}. \quad (18)$$

O fator de bloqueio, também chamado de fator de retenção ou de redução de mobilidade, é definido como a razão entre a diferença de pressões necessária para que escoe a fase contínua (ΔP_c) e a diferença máxima de pressões associada com a presença da gota no escoamento (ΔP_{gota_max}) para uma mesma vazão. Este parâmetro possui dependência com a geometria do capilar, tamanho de gotas da fase dispersa e as viscosidades das fases. O significado físico deste fator pode ser interpretado como uma correção adimensional de mobilidade que se origina a partir do bloqueio de uma garganta de poro que reduz a mobilidade do líquido (COBOS et al., 2009; CASTILLO, 2011; ROCA REYES, 2011; ROMERO et al., 2011; GUILLEN et al., 2012; FARIAS, 2013; ROCA e CARVALHO, 2013).

Quando a gota é muito menor do que o diâmetro da garganta, f é independente do número de capilaridade e tem valor de aproximadamente igual a um. Quando a gota é do mesmo tamanho ou maior que a garganta, f tem uma relação forte com o número de capilaridade, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 - Esboço do comportamento do factor de bloqueio em função da razão de diâmetros da gota e da garganta e número capilar.



Fonte: GUILLEN et al. (2012) (modificado)

Para números de capilaridade elevados, f se aproxima de um valor constante (região III). A pressão extra necessária para deformar a gota é muito menor do que a queda de pressão associada com efeitos viscosos. A redução da mobilidade é conseguida simplesmente quando um líquido de baixa viscosidade (água) é

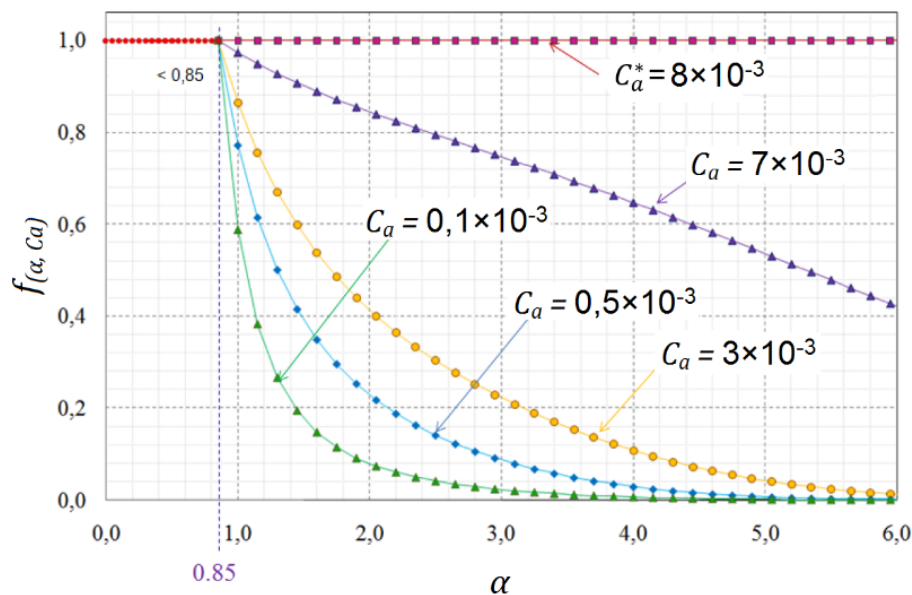
substituído por um líquido de viscosidade mais elevada (óleo). Para números de capilaridade baixos (região I), a pressão capilar relacionada com a deformação da gota é da mesma ordem ou maior do que a queda de pressão associada com efeitos viscosos e o valor de f torna-se muito menor do que 1 (um). Ainda pela Figura 20 existe um número de capilaridade crítico (região II) abaixo do qual o fator de bloqueio cai abruptamente.

Com base nos resultados experimentais de Cobos et al. (2009), Romero et al. (2009) propuseram uma relação do fator de bloqueio como uma função do raio da gota (R_{gota}), raio da garganta (R_{garg}) e número de capilaridade (C_a), sendo mostrada na Equação (19):

$$f_{(\alpha, C_a)} = \left[4 - 5 \frac{\alpha}{0,85} + 4 \left(\frac{\alpha}{0,85} \right)^{1,1} \right] \left(1 - \frac{\alpha}{0,85} \right) \left(1 - \frac{C_a}{C_a^*} \right) * \left[\frac{C_a}{C_a^*} \right]^{\frac{1}{5}(1-0,85\alpha)}, \quad (19)$$

onde C_a^* é o número de capilaridade crítico e $\alpha = R_{gota}/R_{garg}$. A Figura 21, mostra f como uma função de α para diferentes números de capilaridade, em que para um C_a alto, o fator de bloqueio mantém um valor constante independentemente da relação α . Essa relação teve como objetivo reproduzir qualitativamente o comportamento macroscópico observado nos experimentos de injeção em amostras de rochas.

Figura 21 - Curvas do fator $f_{(\alpha)}$ para diferentes números de capilaridade.



Fonte: ROMERO et al., 2009 (Adaptado).

Também a partir dos resultados experimentais de Cobos et al., (2009), Romero et al. (2011) propuseram a seguinte forma de cálculo para o fator de bloqueio, $f(\alpha, C_a)$:

1) para a razão entre raio da gota R_{gota} e raio da garganta R_{garg} , denotada como $\alpha = R_{gota}/R_{garg}$, abaixo do valor crítico α^* , o escoamento não é afetado pela presença da fase dispersa. O fator de bloqueio é igual a um.

2) para $\alpha > \alpha^*$, o fator de bloqueio é função da razão de raios e do número de capilaridade: $f = f(\alpha, C_a)$. Em números de capilaridade acima do valor crítico C_a^* , as forças capilares não são relevantes e o fator de bloqueio é unicamente em função de α . Resumindo:

Para $\alpha < \alpha^*$, $f = 1$.

Para $\alpha > \alpha^*$,

$$f = e^{-k_A \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha^*} - 1\right)} \cdot \left(\frac{C_a}{C_a^*}\right)^{k_B \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha^*} - 1\right)}, \quad C_a < C_a^*, \quad (20)$$

$$f = e^{-k_A \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha^*} - 1\right)}, \quad C_a > C_a^*. \quad (21)$$

Os parâmetros empíricos são: α^* que é razão crítica entre os raios da gota e da garganta do poro acima da qual o escoamento é afetado pela presença da fase dispersa; C_a^* o número capilar crítico abaixo do qual a deformação gota dispersa contribui para reduzir a mobilidade; k_A e k_B são parâmetros de ajuste que descrevem como o fator de bloqueio f varia com raio de gota e com o número de capilaridade.

3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA: CONCEITOS TEÓRICOS

3.1 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS COM INTERFACES

Nas últimas décadas diferentes métodos de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) têm sido desenvolvidos para simular problemas de fluxo bifásicos imiscíveis separados por uma interface bem definida.

A imiscibilidade de dois fluidos é um resultado de intensas forças de coesão entre suas moléculas e depende da natureza dos fluidos. A facilidade com que os fluidos podem ser misturados é expresso por meio de um coeficiente determinado experimentalmente conhecido como tensão superficial. Quanto maior for o valor deste coeficiente, mais forte será a resistência a ser misturado. Um valor negativo indica que não há resistência à mistura, como por exemplo água e álcool (BATCHELOR, 1967).

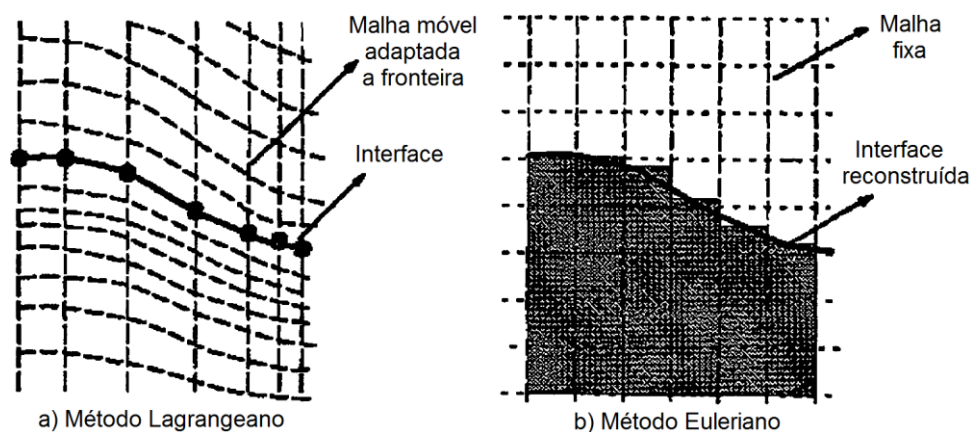
O fluxo de fluidos imiscíveis pode ser classificado em três grupos com base nas estruturas interfaciais e distribuição das fases: fluxos segregados, fluxos de transição e fluxos dispersos (ISHII, 1975). O fluxo segregado ocorre quando as duas fases permanecem separadas com uma única interface bem definida. O fluxo misto ou de transição ocorre quando parte da interface fica instável e se rompe. Fluxos dispersos ocorrem quando uma fase é completamente suspensa em outra fase não apresentando uma superfície de separação. Os métodos CFD de captura de interface tratam principalmente os fluxos segregados (UBBINK, 1997).

O fluxo segregado é complicado pela presença de uma interface bem definida, cuja posição deve ser determinada como parte do algoritmo de solução (FERZIGER e PERIC, 1996). Os requisitos para um bom método numérico de previsão de fluxo monofásico, como: a conservação, a generalidade, alta precisão, armazenamento computacional mínimo e tempo de cálculo também são aplicáveis a previsão de fluxo multifásico. Porém, para o fluxo multifásico necessitam-se de requisitos adicionais, tais como: a representação da interface em uma malha computacional, o movimento da interface com o tempo, o tratamento dos volumes de controle da malha que apresenta a interface e o acoplamento das condições da interface com as equações do movimento.

A malha computacional citada pode ser tratada como fixa ou móvel. Existem diversas metodologias com estes tratamentos, cada uma com suas vantagens e desvantagens e características próprias, e podem ser classificadas basicamente em três categorias principais (MARIANI, 2002): métodos lagrangeanos, métodos eulerianos e métodos euleriano-lagrangeanos.

As principais características dos métodos eulerianos e lagrangeanos são apresentadas na Figura 22. Nos métodos lagrangeanos, as malhas são móveis, isto é, em dois tempos distintos de simulação as malhas são distintas. Estes métodos caracterizam-se por possuir malhas localmente ajustadas para coincidir com a interface ou superfície livre que mudam durante o processo, como pode ser observado na Figura 22a. De uma maneira geral estes métodos são de difícil implementação e exigem um grande esforço e tempo computacional, devido ao tratamento da informação da interface (forma, localização, velocidades...) juntamente com as equações do escoamento, podendo em determinadas geometrias, gerar a malha novamente para ajustar as irregularidades de alguns volumes. Nos métodos eulerianos, a malha é fixa e a interface se move através dela como uma curva, como pode ser observado na Figura 22b, em que a interface (reconstruída) é um contorno apropriado da alguma propriedade do escoamento, como a fração volumétrica.

Figura 22 - Comparação dos métodos (a) lagrangeanos e (b) eulerianos para modelagem da interface.



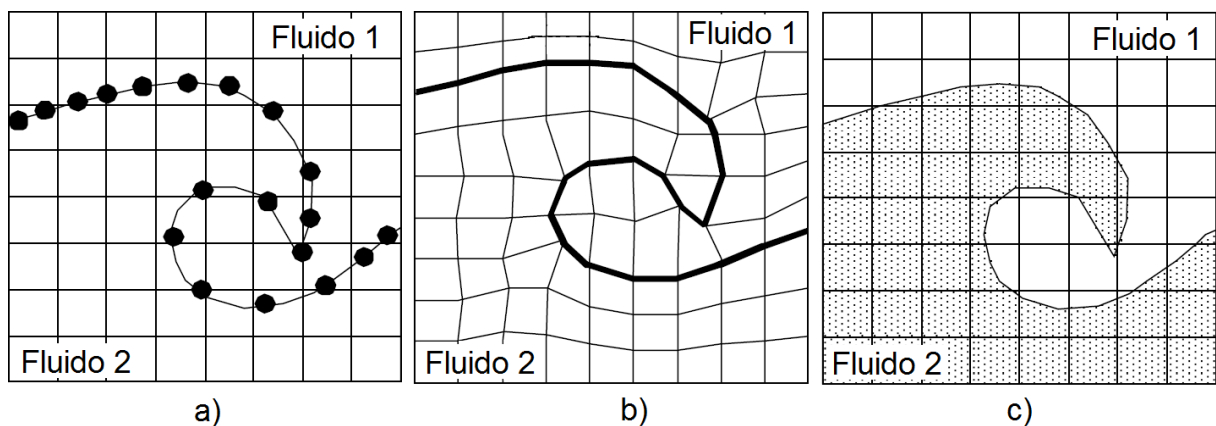
Fonte: MARIANI (2002).

Já métodos euleriano-lagrangeanos combinam algumas características das duas metodologias anteriores. A interface é modelada explicitamente como curvas no espaço bidimensional ou como superfícies no espaço tridimensional, semelhante à metodologia lagrangeana. Os cálculos são executados em uma malha fixa cuja

topologia é independente daquela da interface, semelhante à metodologia euleriana.

Referências em metodologias CFD de previsão da interface tem início desde os anos sessenta. Desde então tem havido inúmeros desenvolvimentos na área, mas ainda existem limitações para cada um deles. De acordo com Ferziger e Peric (1996), os métodos de captura de interface podem ser divididos em dois grupos: i) métodos de superfície e ii) métodos de volume. A esquematização dos dois métodos pode ser observada na Figura 23. Na Figura 23a, a posição da interface é indicada por partículas marcadoras. Já na Figura 23b a malha computacional é forçada a se mover com a interface. Esses dois esquemas encaixam-se na categoria dos métodos de superfície. Nos métodos baseados em volume, a interface é definida pelos seus volumes adjacentes que definem a fase por meio de marcadores ou funções indicadoras, como visto na Figura 23c. Mais detalhes sobre as duas abordagens são apresentados nas subseções seguintes, juntamente com suas vantagens e desvantagens. Somente a modelagem matemática dos métodos VOF e *Level-set*, empregados neste trabalho, são descritos no Tópico 5.2.

Figura 23 - Métodos de captura de interface: a) Partículas marcadoras na interface; b) Malha acompanhando a interface; c) Fase definida por função indicadora ou marcadora.



Fonte: UBBINK (1997) (adaptado).

3.1.1 Métodos de superfície

Nessa classe, a posição da interface é calculada através de interpolações entre as partículas marcadoras. A vantagem do método é o fato de captar interfaces bem definidas à medida que a mesma é transportada ao longo da malha, facilitando o

cálculo da curvatura da interface, parâmetro necessário para o cálculo da força de tensão superficial (σ). A seguir, são apresentadas algumas formas de marcação da interface (UBBINK,1997).

3.1.1.1 Partículas na Interface (*particles on interface*)

Daly (1969) apresenta um método de rastreamento em que a interface é definida através de partículas marcadoras conectadas (sem massa) que são convectadas (ou advectadas) em uma malha fixa pelas velocidades locais resultantes, conforme ilustrado na Figura 23a. Uma vez que estas partículas são acompanhadas ao longo de sua trajetória, esta classe de métodos é também chamada de "acompanhamento Lagrangeano" (do inglês, *Lagrangian Interface Tracking*).

O método é sensível ao espaçamento entre as partículas marcadoras. Quando as partículas estão afastadas, a interface não é bem resolvida e quando estão muito próximas, podem dar origem a uma curvatura muito elevada, resultando em fortes forças de tensão superficial. As partículas na interface, no entanto, não mantêm o mesmo espaçamento ao longo dos cálculos do deslocamento da interface e são, portanto, necessárias para adicionar ou eliminar partículas dinamicamente, renumerando a sua posição para manter uma sequência.

A sequência mencionada acima é a grande desvantagem do método, pois impõe uma restrição à previsão da união ou ruptura da interface. Além disso, em caso tridimensional, a contabilidade da conectividade das partículas se torna uma tarefa difícil (UBBINK, 1997).

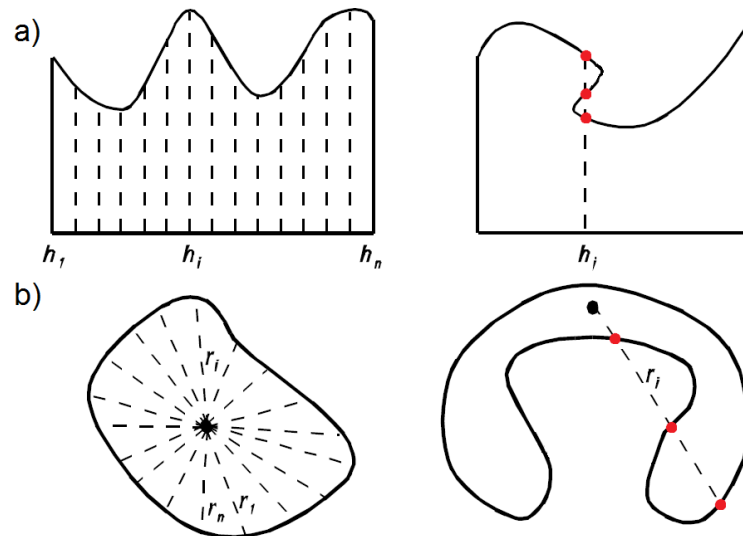
3.1.1.2 Funções de altura (*height functions*)

Nichols e Hirt (1973) estenderam a ideia de partículas marcadoras na interface relacionando os pontos de referência na interface para pontos em um determinado plano de referência. A localização da interface é então definida pela sua altura ou distância do plano de referência. A Figura 24a apresenta uma representação esquemática da sua aplicação para interfaces abertas. Para interfaces fechadas, tais como uma gota ou bolha, é possível definir um ponto de referência único no interior

do objeto. Neste caso, o raio em diferentes posições angulares é a função de distância, como visto na Figura 24b.

A grande limitação deste método é que todas as coordenadas de referência podem representar apenas um valor de interface. Portanto, não é possível prever situações em que a referência de coordenadas é multi avaliada, como é o caso, por exemplo, da quebra de gotas, como ilustrado na Figura 24. No entanto, esta abordagem é muito eficiente em termos computacionais e é mais adequada para a modelagem de superfícies livres não complexos em um espaço tridimensional (UBBINK, 1997).

Figura 24 - Representação esquemática das funções de altura para: a) interfaces abertas (b) interfaces fechadas.



Fonte: UBBINK (1997) (adaptado).

3.1.1.3 Método *Level-set*

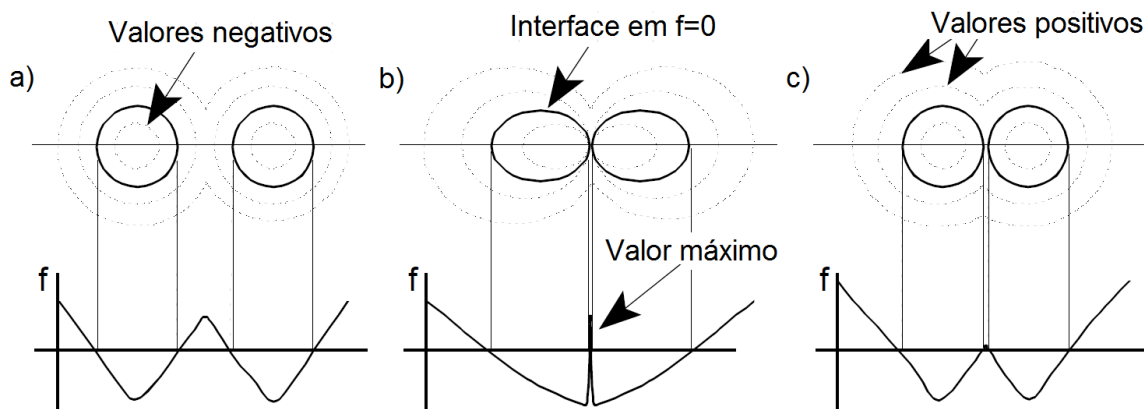
A função *Level-set* (OSHER e SETHIAN, 1988) é escalar e contínua, introduzida ao longo de todo o domínio computacional. O valor da função *Level-set* em cada ponto é definido como a distância mais curta entre esse ponto e a interface (SUSSMAN et al., 1994). Assim, a interface é definida para estar onde a função tem um valor de zero. Com o objetivo de distinguir entre os dois fluidos em ambos os lados da interface um sinal negativo é anexado a função de distância para um dos fluidos.

A Figura 25a mostra os contornos *Level-set* para duas gotas que se deslocam

uma em direção a outra. A Figura 25b mostra os contornos *Level-set* um pouco antes da união das gotas. O valor *Level-set* inicial máximo entre as duas interfaces ainda está presente e forma uma folha impenetrável entre as duas interfaces, impedindo a união natural das duas gotas. Isto é necessário para reinicializar a função de distância depois de cada passo de tempo (SUSSMAN et al., 1994).

Na maioria das situações, a interface divide o volume de controle da malha deixando-o parcialmente cheio. A fim de prever a densidade de um volume de controle parcialmente cheio, é necessário reconstituir a interface durante cada passo de tempo. Isto permite o cálculo das proporções de fluido que ocupam o volume de controle. Estas proporções, também conhecidas como frações volumétricas (NOH e WOODWARD, 1976), são então utilizadas para prever a densidade média dos fluidos que ocupam um volume de controle em particular.

Figura 25 - Contornos da função *Level-set*: a) configuração inicial, b) antes da fusão sem correção e c) antes da união com correção.



Fonte: UBBINK (1997) (adaptado).

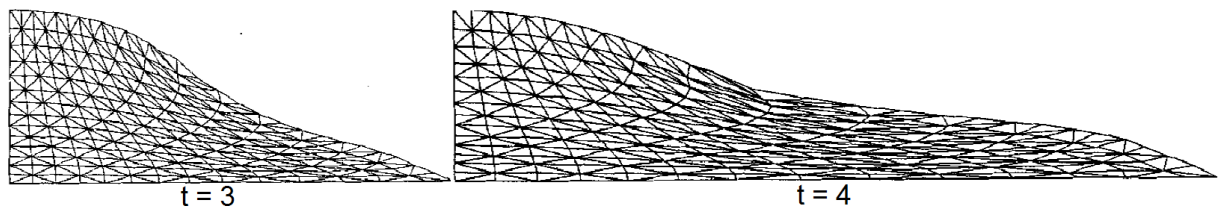
3.1.1.4 Malha coincidente com a interface (*surface fitted methods*)

Nesse método a malha computacional é gerada de forma que as faces dos elementos ou volumes de controle coincidam com a interface, e a posição de seus nós é atualizada a partir da velocidade da mesma. Ubbink (1997) cita alguns trabalhos que utilizam esse método, bem como a razão da escolha, sendo elas: i) redução do armazenamento computacional devido a não necessidade do uso de marcadores; ii) facilidade de capturar grandes mudanças de direção na interface e iii) evitar células

parcialmente ocupadas.

A grande vantagem da utilização deste método está na facilidade e precisão da aplicação das condições de contorno, uma vez que a interface se movimenta com a malha. Por outro lado, a desvantagem do método é a necessidade da recriação da malha durante o processo. Seu uso não é recomendado para casos com grandes deformações, pois acarretará grandes distorções na malha, adicionando complexidade e maior esforço computacional, como pode ser visto na Figura 26 para um caso de colapso de uma coluna de líquido.

Figura 26 - Colapso de uma coluna de líquido para dois passos de tempo.



Fonte: UBBINK (1997) (adaptado).

3.1.1.5 Método *Front-Tracking*

Este método pode ser definido como uma combinação entre os métodos de superfície e o de volume, pelo fato de incorporar em parte o conceito do método de partículas na interface e uma função que indica a presença das diferentes fases. Na técnica desenvolvida por Unverdi e Tryggvason (1992), a posição da interface é definida a partir das partículas marcadoras que são transportadas pelo campo de velocidade compartilhado entre as duas fases, de forma parecida como a mostrada na Figura 23a, e a partir da posição da interface, o domínio físico é discretizado, como visto na Figura 23b. Os valores na interface são computados mediante funções de interpolação e o método não é necessariamente conservativo devido a necessidade de criação/destruição dos pontos que definem a interface em determinadas situações (CERQUEIRA, 2015).

3.1.2 Métodos de volume

Nos métodos de volume, como comentado anteriormente, a interface é definida pelos seus volumes adjacentes que definem a fase por meio de marcadores ou funções indicadoras em cada lado da interface (Figura 23c). Isto dá origem a principal desvantagem deste método, como a posição exata da interface não é conhecida explicitamente, técnicas específicas precisam de ser aplicada para capturar uma interface bem definida. Ela é calculada implicitamente através de algoritmos de reconstrução da interface que analisam os marcadores ou as funções indicadoras de fase (UBBINK, 1997; CERQUEIRA, 2015). Tais técnicas e os métodos para marcar os fluidos são discutidos no restante desta seção.

O fato da interface não ser obtida explicitamente não gera grandes problemas em termos dependentes da normal (\hat{n}) e curvatura (k), pois tal desvantagem é contornada por modelos em que as forças de tensão superficial, que atuam em superfícies, são modeladas como termos fontes nos volumes de controle da malha, como o modelo de força de superfície contínua (CSF - *Continuum Surface Force*) de Brackbill et al. (1992) e o de tensão de superfície contínua (CSS - *Continuum Surface Stress*) de Lafaurie et al. (1994).

3.1.2.1 Marcadores no fluido

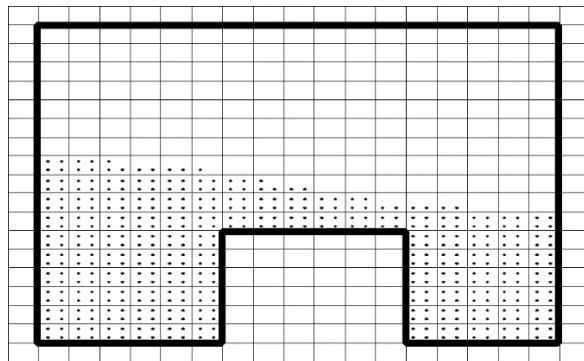
O primeiro trabalho a propor essa forma de acompanhamento de interface foi o método *marker and cell* (MAC) desenvolvido por Harlow e Welch (1965), baseado na distribuição de partículas marcadoras sem massa ao longo do volume ocupado por um fluido com uma superfície. Na Figura 27, o volume de controle que apresenta partículas marcadoras está preenchido pelo fluido, enquanto que o contrário indica um volume de controle vazio. A interface é definida pelos elementos adjacentes aos volumes de controle considerados vazios. As partículas marcadoras servem como um auxiliar de identificação do fluxo através do qual a trajetória do fluido no volume de controle possa ser rastreada. Durante cada passo de tempo, partículas são deslocadas de acordo com os componentes de velocidade na sua vizinhança.

Daly (1967) estendeu o método MAC para casos bifásicos. Neste caso as

partículas marcadoras de cada fluido delimitam um segmento da interface no volume de controle, calculando também a densidade e viscosidade da mistura dos fluidos em cada volume de controle.

De acordo com Ubbink (1997), o método é atrativo pela possibilidade de tratar fenômenos complexos, como quebra de ondas, e pela facilidade de ser estendido para casos tridimensionais. Uma das desvantagens de sua utilização, principalmente em casos tridimensionais, é o excesso de armazenamento e esforço computacional requerido, uma vez que mais memória é requerida para guardar a posição das células marcadoras.

Figura 27 - Representação esquemática dos marcadores e sua disposição na malha.



Fonte: UBBINK (1997).

3.1.2.2 Frações volumétricas

A fração volumétrica é uma função indicadora escalar entre 0 e 1 usada para distinguir dois fluidos diferentes em um volume de controle, um valor zero indica a presença de um fluido enquanto um valor de unidade indica a presença do segundo fluido. Valores de frações volumétricas entre estes dois limites indicam a presença da interface e indicando também a quantidade de fluido ocupado no volume de controle da malha computacional. O uso de frações volumétricas é mais vantajoso do que partículas marcadoras pois apenas um valor precisa ser atribuído para cada volume de controle da malha. O método de fração volumétrica mais utilizado é o *Volume of Fluid* (VOF) desenvolvido por Hirt e Nichols (1961).

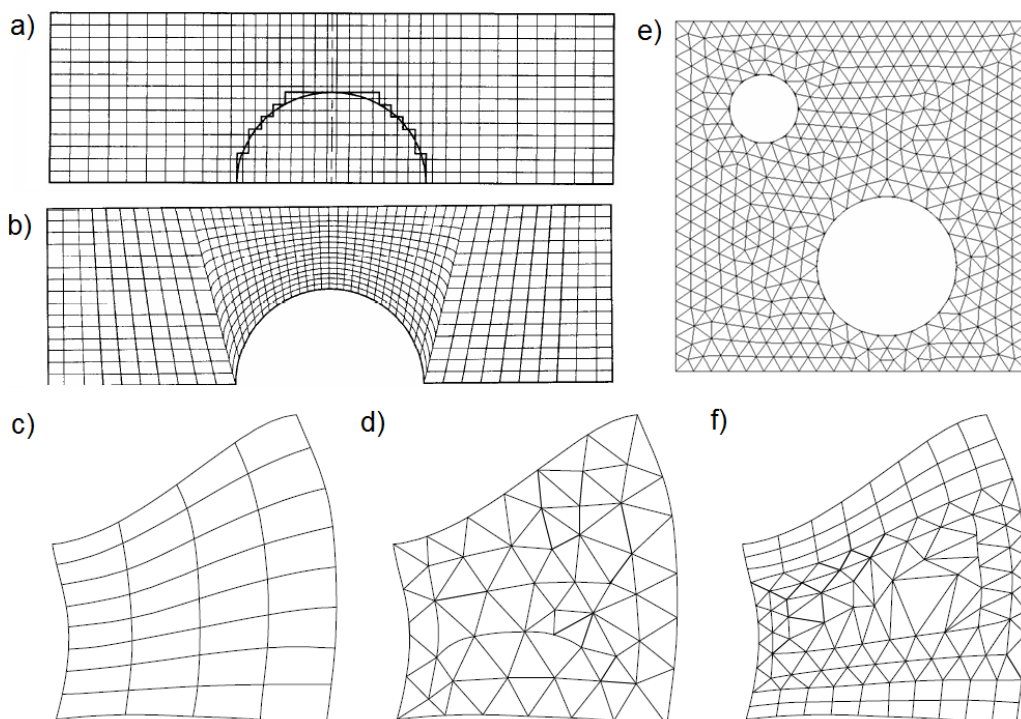
Vários métodos foram propostos com o objetivo de manter uma interface bem definida nos volumes de controle da malha. Ubbink (1997) comenta três tipos de

métodos: técnicas de linha (*line techniques*), formulação *donor-acceptor* e esquemas *higher order differencing*.

3.2 TIPOS DE MALHA UTILIZADAS PARA DISCRETIZAR O DOMÍNIO

Os pontos em que as variáveis são calculadas, são definidos pelas malhas numéricas as quais são, essencialmente, uma representação discretizada do domínio geométrico no qual o *software* irá atuar para resolver o problema. A malha divide o domínio da solução em um número finito de elementos ou volumes de controle (GONÇALVES, 2007; SANTOS, 2010b, CUNHA, 2014). As malhas podem ser classificadas como estruturadas, não-estruturadas, ortogonais, não-ortogonais e híbridas (combinações). A Figura 28 mostra esses tipos de malhas.

Figura 28 - Malha a) estruturada e ortogonal, b) e c) estruturadas e não-ortogonais, d) e e) não-estruturadas e não-ortogonais e, f) híbrida.



Fonte: GONÇALVES (2007) e SANTOS (2010b) (modificado).

Uma malha estruturada é definida como uma grade em que todas as linhas tem o mesmo número de elementos que representa facilmente geometrias simples. Esta característica das malhas faz com que a matriz do sistema de equações algébrico seja

regular, o que otimiza a velocidade de resolução dos sistemas. As malhas não estruturadas podem ser formadas por elementos triangulares, tetraedros, hexaedros, dependendo da acurácia desejada para a aproximação da geometria, e são apropriadas para geometrias complexas e sua resolução é lenta e a discretização é muito complexa (PRAMIU et al., 2010; SANTOS, 2010b). As malhas híbridas combinam blocos de malhas estruturadas e não estruturadas, sendo muito usadas para permitir alta resolução junto de uma parede, sem exigir tanta resolução longe da parede.

3.3 ALGUNS CÓDIGOS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Uma vez obtido o sistema de equações que definem o problema, pode-se prosseguir com sua solução de duas formas diferentes: analítico ou numérico. O método analítico permite apresentar solução ao problema aplicando simplificações e condições de contorno que diminuam a sua complexidade. Se um sistema de equações não pode ser resolvido analiticamente, possivelmente devido a não-linearidade, então os métodos numéricos são aplicados ao problema.

Existem diferentes métodos de discretização para a solução de problemas envolvendo fluidos, os mais usuais na dinâmica dos fluidos computacional (em inglês: *Computational Fluid Dynamics*, CFD) são os métodos de diferenças finitas, de elementos finitos e principalmente o método de volumes finitos. Este método de discretização é utilizado por diversos códigos comerciais baseado em CFD, como por exemplo ANSYS® Fluent®, CFX, STAR-CD, STAR-CCM+, OpenFOAM e PHOENICS (IMADA, 2014).

O método de volumes finitos consiste em dividir o domínio computacional em volumes de controle e integrar temporalmente e espacialmente cada equação de transporte em cada volume de controle, estabelecendo uma equação discreta que expresse a lei de conservação em cada um deles (PATANKAR, 1980; VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995).

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), a prática de CFD consiste em três etapas principais: pré-processamento, processamento (*solver*) e pós-processamento. A etapa de pré-processamento consiste nos dados de entrada do problema no programa computacional CFD. As principais tarefas a serem realizadas são:

- Definição da geometria e regiões de interesse (domínio computacional);
- Geração da malha, a qual divide o domínio em células (volumes de controle);
- Seleção dos modelos dos fenômenos físicos e químicos;
- Definição das propriedades do fluido e superfícies de contato;
- Configuração das técnicas de interpolação e métodos numéricos a serem utilizadas pelo *solver*; e
- Definição das condições de contorno do domínio computacional.

A segunda etapa consiste na resolução do sistema de equações. Através das tarefas feitas na fase anterior, o programa resolve numericamente as equações de conservação, sendo transformadas em sistemas de equações algébricas, linearizando o sistema não-linear através da discretização das equações, gerando arquivos de saída a serem interpretados no pós-processamento. É nesta fase de processamento que a convergência da solução é avaliada por meio de gráficos que mostram a variação de variáveis do escoamento entre as iterações.

Na última etapa, o pós-processamento consiste na visualização dos resultados conforme o desejado. Os resultados podem ser apresentados na forma de campos coloridos e legendados, vetores, linhas de corrente, entre outros.

O modelo matemático apresentado no capítulo anterior foi resolvido pelo *software* CFD comercial ANSYS® Fluent® versão 16.0, o qual é baseado no método de volumes finitos, sendo detalhada a metodologia de resolução nos próximos tópicos.

O Fluent® é um *software*, escrito na linguagem C, que possui os principais modelos de CFD. Segundo o manual do *software*, é possível efetuar a modelagem de escoamento de fluidos, transferência de calor, combustão, escoamentos multifásicos e reações químicas em múltiplos sistemas de referência com geometrias complexas.

3.4 ABORDAGEM MULTIFÁSICA

A evolução da dinâmica computacional de fluidos forneceu uma concepção mais aprofundada de fluxos multifásicos. Atualmente, existem duas abordagens para o cálculo numérico de escoamentos multifásicos, a abordagem Euler-Lagrange e a Euler-Euler (FLUENT, 2014).

- Euler-Lagrange: utilizada em sistemas multifásicos contendo a mistura de fases dispersas e fases contínuas. Equações da conservação são utilizadas para as

fases contínuas e servem de base para a determinação do campo de velocidade que é utilizado nas equações Lagrangeanas de cada partícula. Essa abordagem é adequada para casos em que a interação entre as partículas possa ser desconsiderada frente à influência da fase contínua sobre elas, como escoamento de jatos de *spray*.

- Euler-Euler: considera-se que o volume de cada fase não pode ser ocupado pelo volume de outra, gerando-se o conceito de fração volumétrica (uma função contínua no espaço e no tempo cuja soma para todas as fases é igual à unidade). Essa abordagem pode ser aplicada tanto para sistemas compostos apenas de fases contínuas, quanto para sistemas de fases dispersas em meios contínuos. Equações de conservação para cada fase constituem um sistema de equações acopladas por relações empíricas ou pela teoria cinética de partículas (para as fases dispersas). No *software* Fluent[®], três modelos estão disponíveis para Euler-Euler: *Volume of Fluid* (VOF), mistura (*mixture*) e o Euleriano (*Eulerian*).

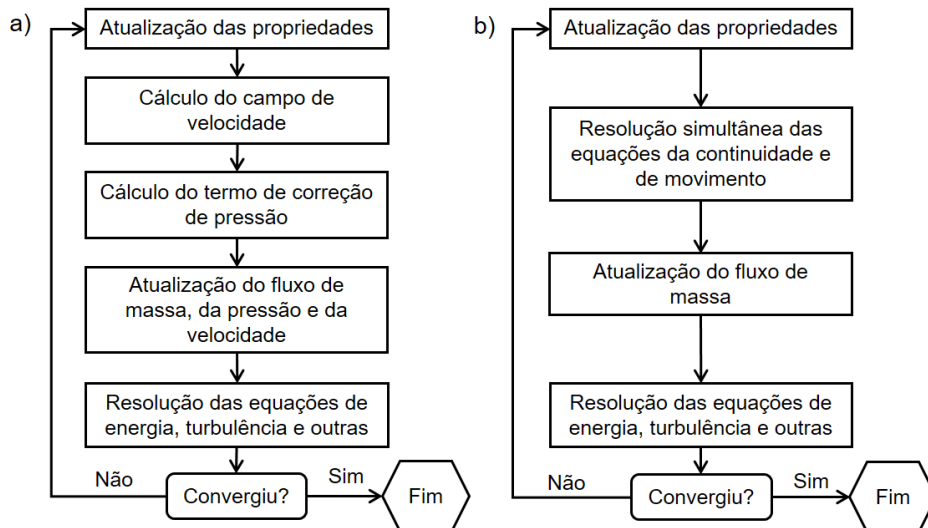
O modelo VOF foi desenvolvido para simular dois ou mais fluidos imiscíveis tal que a posição da interface entre eles se apresenta como informação de interesse. Dessa forma, o modelo é tipicamente aplicado para simulações de líquidos em canais abertos e misturas líquido-gás ou líquido-líquido em tubulações, sendo, portanto, escolhido para as simulações realizadas no presente trabalho (FLUENT, 2014).

3.5 VISÃO GERAL DOS MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos de discretização possibilitam a formulação de equações algébricas, porém a sua linearização se torna necessária dado o caráter não linear das equações governantes. Esse processo de linearização, em conjunto com os procedimentos de resolução do sistema de equações, é, portanto, realizado por métodos numéricos de solução. No *software* Fluent[®], dois desses métodos, ou solucionadores (em inglês: *solvers*) estão disponíveis: o baseado na pressão (*pressure-based*) e o baseado na densidade (*density-based*). Enquanto o segundo se apresenta mais recomendado para simulações de gás real, vapor úmido e escoamento compressível de alta velocidade, o primeiro é mais indicado para a aplicação de modelos de cavitação, *Volume of Fluid* (VOF), mistura, Euleriano e de combustão (FLUENT, 2014). O *solver* baseado na pressão foi utilizado neste trabalho.

O *solver* baseado na pressão emprega um algoritmo que pertence a uma classe geral de métodos chamados de projeção (CHORIN, 1968). Neste algoritmo, a restrição de conservação de massa (continuidade) do campo de velocidades é atingida resolvendo-se uma equação de correção de pressão. A equação de correção de pressão é derivada das equações da continuidade e de movimento de forma a garantir que o campo de velocidades, corrigido pela pressão, satisfaça a continuidade. Uma vez que as equações governantes não são lineares e acopladas, o processo de solução envolve várias iterações em que todo o conjunto de equações até a solução convergir. No *software* Fluent® dois algoritmos para o *solver* baseado na pressão estão disponíveis: o algoritmo segregado e o algoritmo acoplado (Figura 29).

Figura 29 - Algoritmos baseados na pressão, a) algoritmo segregado, e b) algoritmo acoplado.



Fonte: FLUENT (2014) (adaptado).

Por meio de qualquer método, o Fluent® integra as equações da continuidade, da conservação da quantidade de movimento, da energia e dos parâmetros de turbulência, se necessário. No esquema segregado as equações governantes são resolvidas para uma variável (por exemplo, a velocidade) em todos os volumes de controle de cada vez e armazenadas na memória para os cálculos iterativos, deste modo há pouca exigência de memória computacional. Já o método acoplado resolve as equações governantes para todas as variáveis (velocidade, pressão, temperatura) em todos os volumes de controle simultaneamente e possui uma velocidade de convergência dos cálculos mais rápida. No modelo acoplado a requisição de memória aumenta de 1,5 a 2 vezes em relação ao modelo segregado (FLUENT, 2014).

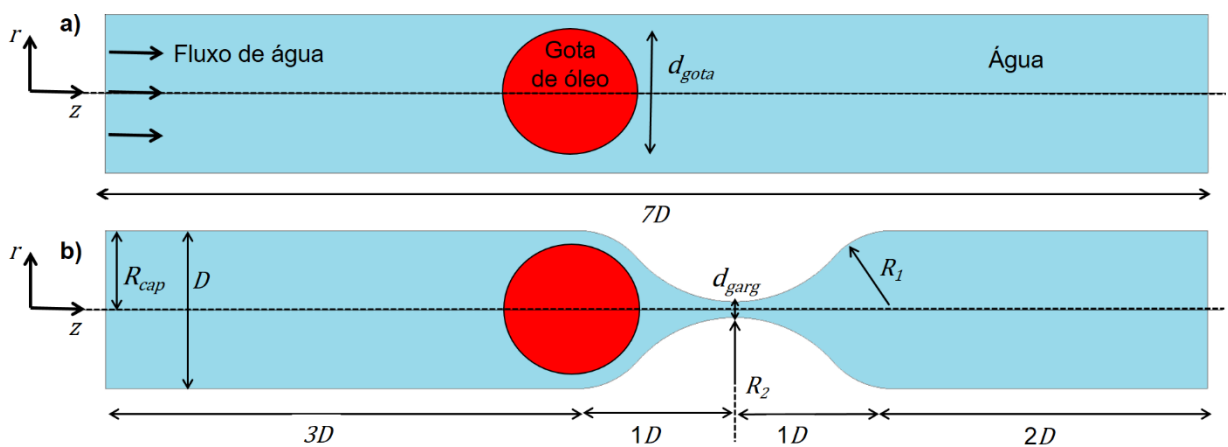
4 ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA A SER RESOLVIDO

Este capítulo é designado para expor todas os parâmetros e geometrias utilizados durante o trabalho, bem como todos os casos de simulação.

4.1 GEOMETRIAS DOS CAPILARES

Nas duas configurações utilizadas, capilar reto (Figura 30a) e capilar com garganta (Figura 30b), o raio do capilar (distância entre a parede e a linha de simetria) é $R_{cap} = 0,5$ mm, logo o diâmetro é $D = 1,0$ mm e o comprimento é de $7D$, isto é, 7 mm. O diâmetro da gota de óleo (d_{gota}) imersa no meio aquoso assume três valores, 0,8mm, 0,6mm e 0,4mm. O centro da gota é posicionado em $z = 3,0$ mm e $r = 0,0$ mm em relação a linha de simetria das geometrias. O capilar com garganta, apresenta uma diminuição da seção reta de tal forma que a área aberta ao fluxo se reduz em função de R_2 , e a curvatura é obtida fixando um raio $R_1 = 0,5$ mm. O valor de R_2 , aplicado somente para o capilar com garganta, é obtido variando conforme desejado o diâmetro da garganta (d_{garg}). O centro da garganta está a uma distância de $5D = 5$ mm da entrada e possui uma extensão de $2D = 2$ mm.

Figura 30 - Representação a) capilar reto e b) capilar com garganta.



4.2 PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

A densidade, ρ_w , e viscosidade, μ_w , da água, que é a fase contínua, é de 1.000 kg/m³ (equivalente a 10 °API, API - *American Petroleum Institute*) e 0,001 kg/ms (equivalente a 1 cP), respectivamente, em todas simulações. A densidade do óleo ρ_o , que é a fase dispersa, também permaneceu constante com o valor de 950 kg/m³ (17,4 °API). A viscosidade do óleo μ_o assumiu três valores 0,01, 0,005 e 0,002 kg/ms. A água é injetada na entrada do capilar com velocidade média $\bar{v} = 10^{-5}$ m/s.

A forma e posição da interface óleo/água é determinada pela junção dos métodos VOF - *Volume of Fluid* e *Level-set*. O coeficiente da tensão interfacial (σ) é constante entre as fases primária (água) e secundária (óleo). Esta propriedade assumiu os valores mostrados na Tabela 2, juntamente com outras propriedades do problema.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no problema.

Parâmetro	Valor
R_1 , mm	0,5
R_2 , mm	4,55 2,10 1,32 0,95 0,84 0 (capilar reto)
d_{garg} , mm	0,8 0,6 0,4 0,2 0,1 1,0 (capilar reto)
d_{gota} , mm	0,8 0,6 0,4
ρ_w / ρ_o , kg/m ³	1000 / 950
μ_w / μ_o , kg/ms	0,001 / 0,01 0,005 0,002
\bar{v} , m/s	10^{-5}
σ , N/m	$7,6 \times 10^{-8}$ $9,5 \times 10^{-8}$ $1,9 \times 10^{-7}$ $3,85 \times 10^{-7}$ $1,0 \times 10^{-6}$

4.3 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

Durante o decorrer deste trabalho, algumas variáveis serão tratadas na sua forma adimensional, permitindo que os resultados possam ser melhor visualizados e compreendidos. Ainda, com a adimensionalização, busca-se generalizar os casos em que a solução seja aplicada. O escoamento é governado por parâmetros adimensionais, que relacionam as forças atuantes no fluido, e parâmetros geométricos, são eles:

1) Razão de viscosidades, μ_R :

$$\mu_R = \frac{\mu_o}{\mu_w}, \quad (22)$$

em que μ_o é a viscosidade do óleo (kg/ms) e μ_w é a viscosidade da água (kg/ms). Este parâmetro representa uma medida simplificada da razão de mobilidades, que mede a facilidade de deslocamento de um fluido em relação ao outro, quando as permeabilidades são consideradas constantes.

2) Número de capilaridade, C_a :

$$C_a = \frac{\mu_w \bar{v}}{\sigma}, \quad (23)$$

em que μ_w é a viscosidade da água (kg/ms), \bar{v} é a velocidade média (m/s) na entrada do capilar e σ é a tensão interfacial (N/m).

3) Número de Reynolds, Re :

$$Re = \frac{\rho_w \bar{v} D}{\mu_w}, \quad (24)$$

em que ρ_w a densidade da água (kg/m³), \bar{v} é a velocidade média (m/s) na entrada do capilar, D é o diâmetro do capilar (em m) e μ_w é a viscosidade da água (kg/ms). Representa o quociente entre as forças de inércia e as forças viscosas que determina se um escoamento é laminar ou turbulento. Substituindo os valores das propriedades, tem-se um Re da ordem 10^{-4} para todos os casos de simulação.

4) Número de Courant, C_o :

$$C_o = \frac{\bar{v} \Delta t}{\Delta x}, \quad (25)$$

em que Δt é o passo de tempo (s), Δx é o tamanho de um elemento representativo da malha (m) e \bar{v} é a velocidade média (m/s) na entrada do capilar. É um parâmetro importante para obter convergência mediante a abordagem explícita da solução. Rezende (2009) recomenda a utilização de um passo de tempo que garanta o número de Courant abaixo de 0,5. Nas simulações foi definido $C_o = 0,25$.

5) Razão de diâmetros, D_{gota} :

$$D_{gota} = \frac{d_{gota}}{D}, \quad (26)$$

em que d_{gota} é o diâmetro da gota de óleo e D é o diâmetro do capilar.

6) Razão de diâmetros, D_{garg} :

$$D_{garg} = \frac{d_{garg}}{D}, \quad (27)$$

em que d_{garg} é a abertura da garganta e D é o diâmetro do capilar. Este parâmetro é igual a um para o capilar reto.

7) Fator de bloqueio, f :

$$f = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{gota_max}}, \quad (28)$$

em que ΔP_c é a diferença de pressão entre a entrada e saída do capilar para a fase contínua e ΔP_{gota_max} é a diferença de pressão máxima obtida durante o escoamento da gota no capilar, para uma mesma vazão.

8) Pressão adimensional, P :

$$P = \frac{\Delta P_{gota}}{\Delta P_c}, \quad (29)$$

em que ΔP_{gota} é a diferença de pressão obtida com o escoamento da gota no capilar. A pressão adimensional é definida como o número de vezes que a variação de pressão ΔP_c é aumentada, em relação ao escoamento da fase contínua, devido a presença da gota e da garganta. A Tabela 2 apresenta os parâmetros adimensionais utilizados no problema.

Tabela 2 - Parâmetros adimensionais utilizados no problema.

Parâmetro	Valor
D_{garg} , mm	0,8 0,6 0,4 0,2 0,1 1,0 (capilar reto)
D_{gota} , mm	0,8 0,6 0,4
μ_R	10 5 2
C_a	0,132 0,106 0,053 0,026 0,01
R_e	10^{-4}
C_o	0,25

4.4 CASOS SIMULADOS

Na Tabela 3 estão relacionados os parâmetros adimensionais dos casos simulados. São utilizados três diâmetros de gota (d_{gota}) que geraram três razões de diâmetros D_{gota} , 0,8, 0,6 e 0,4. Os casos 1-10 são referentes ao capilar reto, enquanto que os casos 11-33 ao capilar com garganta. O parâmetro D_{garg} , que traduz a severidade da garganta, é 1,0 para o capilar reto ($d_{garg} = 1,0$ mm), e 0,1 para o capilar com garganta ($d_{garg} = 0,1$ mm).

Os casos 1 e 11 permitem determinar o ΔP_c sem a gota de óleo, ou seja, a variação de pressão ocasionada pelo escoamento monofásico. O escoamento da água é empregado como base para mensurar o efeito da gota no escoamento traduzido por meio do fator de bloqueio. Desta forma, as primeiras simulações são realizadas somente para o escoamento da fase contínua, sendo mostradas no Tópico

6.2. Os casos 21-24 são aplicados para verificar o comportamento da queda de pressão para diferentes diâmetros de gargantas sem a presença da gota de óleo. Os casos 12-20 são aplicados para verificar a influência da razão de viscosidades (μ_R) e D_{gota} , para um mesmo número de capilaridade (C_a), no fator de bloqueio. Os casos 25-33 são aplicados para verificar a influência do C_a e D_{gota} , para uma mesma μ_R , no fator de bloqueio (Tópico 6.3). Já o caso 34 foi definido para verificar a estabilidade da interface da gota para um baixo número de capilaridade.

Tabela 3 - Casos simulados.

	Casos	μ_R	C_a	D_{gota}	D_{garg}		
Monofásico	1	-	-	-	1	Capilar reto	
	2	10	0,132	0,8	1		
	3	10	0,132	0,6	1		
	4	10	0,132	0,4	1		
	5	5	0,132	0,8	1		
	6	5	0,132	0,6	1		
	7	5	0,132	0,4	1		
	8	2	0,132	0,8	1		
	9	2	0,132	0,6	1		
	10	2	0,132	0,4	1		
Monofásico	11	-	-	-	0,1	Capilar com garganta	
	12	10	0,132	0,8	0,1		
	13	10	0,132	0,6	0,1		
	14	10	0,132	0,4	0,1		
	Influência da razão de viscosidade e D_{gota}	15	5	0,132	0,8		0,1
		16	5	0,132	0,6		0,1
		17	5	0,132	0,4		0,1
		18	2	0,132	0,8		0,1
		19	2	0,132	0,6		0,1
		20	2	0,132	0,4		0,1
Monofásico	21	-	-	-	0,8		
	22	-	-	-	0,6		
	23	-	-	-	0,4		
	24	-	-	-	0,2		
Influência do número de capilaridade e D_{gota}	25	10	0,106	0,8	0,1		
	26	10	0,106	0,6	0,1		
	27	10	0,106	0,4	0,1		
	28	10	0,053	0,8	0,1		
	29	10	0,053	0,6	0,1		
	30	10	0,053	0,4	0,1		
	31	10	0,026	0,8	0,1		
	32	10	0,026	0,6	0,1		
	33	10	0,026	0,4	0,1		
	34	10	0,01	0,8	0,1		

5 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DA GOTA DE ÓLEO

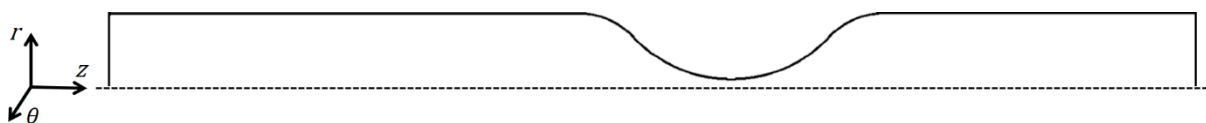
Ao longo deste capítulo serão apresentadas as equações governantes dos fenômenos físicos a serem estudados e as condições de contorno utilizadas para definir o problema. Também é descrita uma estrutura numérica básica utilizada pelo *software* ANSYS® Fluent® e as etapas de geração das malhas.

As equações a serem resolvidas nesse problema de escoamento de um fluido imerso em outro são habitualmente as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, acrescidas de um conjunto de equações constitutivas que representam as forças interfaciais entre os fluidos. Hipóteses simplificadoras serão feitas permitindo desconsiderar termos nas equações, desta forma, a complexidade pode ser reduzida sem que o problema seja descaracterizado.

5.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES

O primeiro passo a ser considerado é o sistema de coordenadas utilizado. Como o trabalho está voltado ao escoamento de uma gota de óleo imersa em água será considerada a simulação do fluxo através de capilares axissimétricos. Assim, o sistema de coordenadas a ser utilizado é o cilíndrico, o qual apresenta as direções r , θ e z nos eixos coordenados. A componente r está relacionada com a posição ao longo do raio da geometria, θ com a posição angular e z indica a posição da gota de óleo ao longo da linha axial. Na Figura 31, pode-se visualizar o sistema de coordenadas para um capilar com garganta, o qual possui origem no início do capilar.

Figura 31 - Geometria para um capilar com garganta com simetria axissimétrica.



As hipóteses a serem utilizadas neste trabalho serão enumeradas e comentadas a seguir:

1) Escoamento isotérmico: a temperatura não varia ao longo de todo o domínio. Será desprezada qualquer troca de calor.

2) Escoamento transiente: as propriedades do fluido em um ponto do domínio variam com o tempo, como a velocidade e a pressão, logo o problema será tratado como dependente do tempo.

$$\frac{\partial(\)}{\partial t} \neq 0 . \quad (30)$$

3) Escoamento axissimétrico: devido à geometria do problema, a consideração de escoamento axissimétrico será realizada em relação à linha de centro dos capilares. Além de simplificar as equações, busca-se reduzir o tempo e o esforço computacional na resolução do problema, uma vez que a malha gerada é bidimensional ao invés de ser tridimensional.

$$\frac{\partial(\)}{\partial \theta} = v_{\theta} = 0 . \quad (31)$$

4) Escoamento laminar:

5) Escoamento incompressível: os efeitos da compressão do fluido serão desprezados. Desta forma, a massa específica de uma partícula de fluido não muda conforme segue sua trajetória.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 . \quad (32)$$

6) Gravidade nula: os efeitos devido à força gravitacional serão desconsiderados.

$$\vec{g} = g_r = g_{\theta} = g_z = 0 . \quad (33)$$

Aplicando a lei da conservação da massa a um volume de controle diferencial, ou seja, fazendo com que a variação da massa nesse volume seja igual ao balanço da massa que entra e que sai do volume, a equação da conservação da massa, segundo Bird et al. (1987) assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = -(\nabla \cdot \rho \vec{v}). \quad (34)$$

onde ρ é a massa específica e \vec{v} é o vetor velocidade.

Desenvolvendo o operador gradiente na Equação (34), a equação da conservação da massa em coordenadas cilíndricas torna-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0. \quad (35)$$

Aplicando as hipóteses simplificadoras na Equação (35), tem-se que a equação da conservação da massa para o problema proposto é dada pela Equação (36) ou pela Equação (37):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z) = \frac{1}{r} \left(v_r + r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z) = \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (36)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0. \quad (37)$$

A segunda lei de Newton enuncia que a força resultante em um sistema é igual a taxa da variação da quantidade de movimento no tempo. Aplicando essa lei a um volume de controle diferencial, pode-se determinar a equação da conservação da quantidade de movimento conforme a Equação (38), equação de Navier-Stokes (BIRD et al., 1987):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{f}, \text{ onde} \quad (38)$$

$$\bar{\tau} = \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T), \quad (39)$$

em que ρ é a massa específica, μ é a viscosidade, p representa a pressão, \vec{g} e \vec{f} são os vetores gravidade e força respectivamente, o sobrescrito T denota a transposta da matriz e $\bar{\tau}$ é o tensor de tensão. O campo de velocidade de cada fase é calculado pela aproximação do campo determinado pela Equação (38). Para simulações onde a diferença de velocidade entre as fases é muito grande, a precisão do cálculo próximo da interface pode ser afetada (BUSON, 2013).

O primeiro termo da Equação (38) representa a taxa de aumento de

movimento por unidade de volume, o segundo termo representa o movimento adquirido pela convecção por unidade de volume, o terceiro a pressão no elemento por unidade de volume, o quarto a taxa de movimento ganho pelas forças viscosas por unidade de volume, o quinto termo a força gravitacional no elemento por unidade de volume e, o ultimo termo representa a força provocada pela tensão interfacial.

Para o sistema de coordenadas cilíndricas, a Equação (38) pode ser decomposta em três componentes, uma para cada direção, com ρ e μ constantes. Desta forma, obtêm-se as Equações (40), (41) e (42) nas direções r , θ e z , respectivamente.

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} \\ + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] + \rho g_r + f_r . \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \\ + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] + \rho g_\theta + f_\theta . \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} \\ + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z + f_z . \end{aligned} \quad (42)$$

Após considerar as hipóteses simplificadoras, as Equações (40), (41) e (42) são reduzidas para as Equações (43) e (44), nas direções r e z , respectivamente. A equação (41) é anulada após a aplicação das hipóteses.

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] + f_r . \quad (43)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + f_z . \quad (44)$$

5.2 ACOPLAMENTO DOS MÉTODOS VOF E LEVEL-SET

Em um escoamento multifásico, com dois fluidos separados por uma interface nítida, existe uma dificuldade adicional para simular com acurácia a interação entre as fases. Isso deve-se à necessidade de acompanhar a interface de separação ao longo do escoamento, sem introdução de esforços computacionais excessivos. Assim, entre os principais métodos de modelagem/rastreamento da interface, o método de volume VOF (*Volume of Fluid*), desenvolvido por Hirt e Nichols (1981), e o método de superfície *Level-Set*, desenvolvido por Osher e Sethian (1988), são provavelmente os mais utilizados nas literaturas (SUSSMAN e PUCKETT, 2000).

Cada método tem suas próprias vantagens e desvantagens. Uma vantagem do método VOF é o fato de que algoritmos precisos podem ser usados para a função da fração volumétrica de modo que a massa é conservada, mantendo uma representação acentuada das interfaces. No entanto, é difícil de obter a curvatura de modo precisa e suavizar as propriedades físicas descontínuas perto da interface. As vantagens do método *Level-Set* são o fato de que a curvatura pode ser calculada com precisão e a suavidade de quantidades físicas descontínuas perto da interface é muito boa. No entanto o método produz mais erros numéricos do que o VOF, especialmente quando as interfaces sofrem grandes esticamentos, provocando perda ou ganho de massa (SUSSMAN e PUCKETT, 2000; OLSSON et al., 2007; FLUENT, 2014).

Os métodos VOF e *Level-Set* são utilizados neste trabalho de forma acoplada, *Coupled Level-set Volume of Fluid* (CLSVOF), para a modelagem da interface entre as fases, água (w) e óleo (o), combinando suas vantagens e superando as deficiências de cada método (SUSSMAN e PUCKETT, 2000).

5.2.1 Método *Volume of Fluid* (VOF)

No método VOF um único conjunto de equações de quantidade de movimento é compartilhado pelos fluidos, e a fração volumétrica de cada um dos fluidos em cada volume de controle é rastreada ao longo do domínio. Se a fração volumétrica da fase secundária óleo (o) na célula é denotado como α_o , então três condições são possíveis:

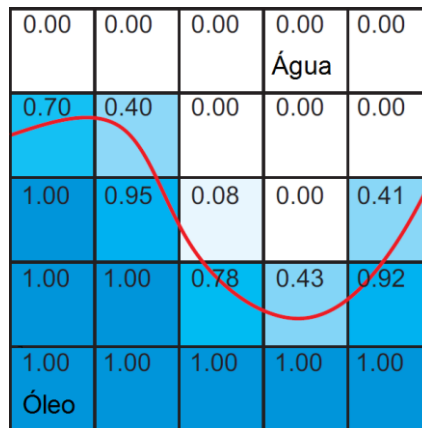
- 1) $\alpha_o = 0$, quando o volume de controle não possui óleo;

2) $0 < \alpha_o < 1$, quando o volume de controle contém a interface entre óleo e a água;

3) $\alpha_o = 1$, quando o volume de controle está completamente cheio de óleo.

Com base no valor local de α_o , as propriedades e as variáveis apropriadas serão atribuídas para cada volume de controle dentro do domínio. A Figura 32 ilustra as situações descritas, onde a fração volumétrica de óleo (α_o) é mostrada para cada volume de controle, em que quanto maior o tom da cor azul maior é a fração volumétrica de óleo no volume de controle. A interface entre o óleo e a água (tons mais brancos) é representada pela linha vermelha.

Figura 32 - Representação da fração volumétrica do óleo (α_o) em cada volume de controle no domínio computacional.



Fonte: CERQUEIRA (2015) (adaptado).

Todos os volumes de controle devem estar preenchidos com uma única ou uma combinação de fases. O modelo não permite regiões sem a presença de qualquer tipo de fluido.

Para rastrear a interface é preciso resolver a equação da continuidade para a fração volumétrica do óleo (fase secundária). A equação tem a seguinte forma (FLUENT, 2014):

$$\frac{1}{\rho_o} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_o \rho_o) + \nabla \cdot (\alpha_o \rho_o \vec{v}_o) \right] = S_{\alpha_o} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{wo} - \dot{m}_{ow}) \quad (45)$$

onde α_o é a fração volumétrica do óleo, \dot{m}_{wo} é a transferência de massa da água para o óleo, \dot{m}_{ow} é a transferência de massa do óleo para a água, S_{α_o} é o termo fonte do óleo, ρ_o é a massa específica do óleo e \vec{v}_o é o vetor velocidade do óleo.

No presente trabalho é considerado que as fases envolvidas são incompressíveis e newtonianas, o termo fonte é zero e que não existe transferência de massa entre as fases. Assim a Equação (45) pode ser rescrita conforme a Equação (46).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_o) + \nabla \cdot (\alpha_o \vec{v}) = 0 . \quad (46)$$

A equação da fração volumétrica, Equação (46), só é resolvida para a fase secundária, o óleo. Em cada volume de controle as frações volumétricas de todas as fases somam uma unidade. Para a fase primária, a água, a fração volumétrica (α_w) é calculada como constante, conforme Equação (47).

$$\alpha_w + \alpha_o = 1 . \quad (47)$$

Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam uma média volumétrica. Para um sistema de duas fases, sendo a água (w) a fase primária e o óleo (o) a fase secundária, o cálculo da massa específica do sistema é estabelecido pela Equação (48), e a viscosidade do sistema é estabelecida pela Equação (49). Todas as outras propriedades são calculadas da mesma forma.

$$\rho = \alpha_o \rho_o + \alpha_w \rho_w . \quad (48)$$

$$\mu = \alpha_o \mu_o + \alpha_w \mu_w . \quad (49)$$

O método necessita de um esquema para reconstrução geométrica da interface e funções de interpolação que tratem de maneira adequada o transporte (advecção) do escalar α_o , evitando oscilações e difusões numéricas. Ubbink (1997) comenta sobre tais tópicos, demonstrando alguns esquemas de reconstrução de interface utilizados e funções de interpolação que modelam o campo escalar de α_o de modo a contornar os problemas inerentes à sua natureza.

Juntamente com as equações da continuidade e da quantidade de movimento nas direções r e z , Equações (37), (43) e (44) respectivamente, as duas equações para o rastreamento da interface, provindas da Equação (46) e (47), completam o sistema de equações a ser resolvido.

5.2.2 Método *Level-set*

Uma função contínua, conhecida como *Level-set*, φ , é definida em todo domínio computacional (OSHER e SETHIAN, 1988). O valor de φ representa uma função qualquer, sendo ela:

$$\varphi(\vec{x}, t) = \begin{cases} +|d| & \text{se } \vec{x} \in \text{a fase primária (água)} \\ 0 & \text{se } \vec{x} \in \Gamma \text{ (interface)} \\ -|d| & \text{se } \vec{x} \in \text{a fase secundária (óleo)} \end{cases}, \quad (50)$$

onde a interface é o *Level-set* zero $\varphi(\vec{x}, t) = 0$, d é a distância da interface, Γ representa a interface entre as duas fases, $\varphi(\vec{x}, t) > 0$ representa um lado da interface (fase primária) e $\varphi(\vec{x}, t) < 0$ o outro (fase secundária).

A evolução da função *Level-set* pode ser dada de uma forma semelhante como para o modelo VOF, Equação (46), sendo mostrada na Equação (51).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi) + \nabla \cdot (\varphi \vec{v}) = 0. \quad (51)$$

5.3 MODELOS DE TENSÃO INTERFACIAL

O método VOF também pode incluir os efeitos da tensão interfacial ao longo da interface entre as fases. Pode ser acrescido ainda no método a especificação dos ângulos de contato entre as fases e as paredes. Pode-se especificar um coeficiente de tensão interfacial como uma constante ou como uma função de qualquer variável. Existem dois modelos de tensão interfacial: de força de superfície contínua (*Continuum Surface Force* - CSF) e o de tensão de superfície contínua (*Continuum Surface Stress* - CSS).

Segundo o manual do Fluent® (2014), CSS fornece algumas vantagens sobre o modelo CSF para casos envolvendo tensão superficial variável, não necessitando de termos adicionais em tais situações devido à sua formulação conservativa, ao contrário do CSF. Entretanto, o manual reporta que geralmente o efeito da tensão

superficial variável afeta apenas condições de baixa influência gravitacional, conduzindo, portanto, à utilização do método CSF para a maioria dos problemas de engenharia. Para o acoplamento VOF e *Level-set*, estudo do presente trabalho, o modelo usado é o de força de tensão superficial.

5.3.1 Força de superfície contínua (*Continuum Surface Force - CSF*)

O modelo CSF proposto por Brackbill et al. (1992) foi implementado de tal forma que a adição da tensão interfacial para cálculos VOF resulta em um termo fonte na equação da quantidade de movimento, termo de força \vec{f} da Equação (38). Para compreender a origem do termo fonte, deve-se considerar o caso em que a tensão interfacial é constante ao longo da interface, em que apenas a força normal atua sobre a interface. Pode ser mostrado que a queda de pressão através da interface depende do coeficiente de tensão interfacial, σ , e dos raios de curvatura, R' e R'' , conforme Equação (52):

$$\Delta P_{vol} = 2\sigma \left[\frac{1}{R'} + \frac{1}{R''} \right], \quad (52)$$

onde ΔP_{vol} é o gradiente de pressão através da interface entre o óleo e a água.

O modelo CSF é aplicado na curvatura superficial calculada a partir do gradiente na superfície normal a interface. A curvatura, k , é definida em termos do divergente da unidade normal, \hat{n} :

$$k = \nabla \cdot \hat{n}, \quad (53)$$

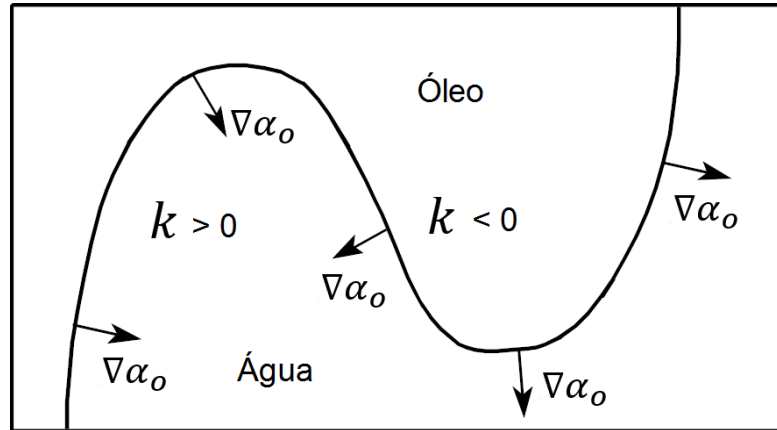
em que

$$\hat{n} = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} = \frac{\nabla \alpha_o}{|\nabla \alpha_o|}, \quad (54)$$

onde \vec{n} representa a superfície normal calculada por meio do gradiente da fração volumétrica do óleo (α_o) e \hat{n} é o vetor unitário paralelo a \vec{n} . A definição da curvatura acima é tal que para $k > 0$ a água está situada sobre o lado côncavo da interface, e para $k < 0$ é o óleo que se encontra no lado côncavo. O vetor $k\nabla\alpha_o$, no entanto,

sempre aponta para o fluido que se encontra no lado côncavo da interface. Uma representação esquemática das relações entre os diferentes vetores, as posições dos fluidos e a curvatura da interface é dada na Figura 33.

Figura 33 - Arranjo dos fluidos (óleo e água) e o sinal de curvatura.



Fonte: UBBINK (1997) (adaptado).

A tensão interfacial pode ser escrita em termos do salto de pressão através da interface. A força na interface pode ser expressa como uma força volumétrica usando o teorema de divergência, como mostrada na Equação (55). Essa força volumétrica que é o termo fonte (\vec{f}) adicionado a equação da quantidade de movimento, Equação (38).

$$\vec{f}_{vol} = \sigma_{wo} \frac{\alpha_w \rho_w k_o \nabla \alpha_o + \alpha_o \rho_o k_w \nabla \alpha_w}{\frac{1}{2}(\rho_w + \rho_o)} . \quad (55)$$

A Equação (55) permite uma sobreposição suave das forças próximas aos volumes de controle onde as fases óleo e água estão presentes, então $k_o = -k_w$ e $\nabla \alpha_o = -\nabla \alpha_w$, a Equação (55) pode ser reescrita conforme Equação (56):

$$\vec{f}_{vol} = \sigma_{wo} \frac{\rho k_w \nabla \alpha_w}{\frac{1}{2}(\rho_w + \rho_o)} , \quad (56)$$

onde ρ é a massa específica do sistema calculada usando a Equação (48).

Por meio da Equação (56) fica claro que o termo fonte da tensão interfacial é proporcional uma média de massa específica no volume de controle.

5.3.2 Tensão de superfície contínua (*Continuum Surface Stress - CSS*)

O modelo CSS proposto por Lafaurie et al. (1994) é uma forma alternativa de modelar a tensão interfacial de forma conservadora, ao contrário da formulação não conservadora do modelo CSF. No modelo CSS, o tensor tensão interfacial, \bar{T} , é representado pela Equação (57).

$$\bar{T} = \sigma(\bar{I} - \hat{n} \otimes \hat{n})|\vec{n}|, \text{ onde} \quad (57)$$

$$\hat{n} = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} = \frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|}, \quad (58)$$

sendo \bar{I} o tensor unitário (matriz identidade), σ a tensão interfacial, \otimes o produto vetorial, α a fração volumétrica, \vec{n} o gradiente da fração volumétrica e \hat{n} o vetor unitário paralelo a \vec{n} . Associando a Equação (57) e (58), tem-se o tensor tensão interfacial expresso pela Equação (59):

$$\bar{T} = \sigma \left(|\nabla\alpha| \bar{I} - \frac{\nabla\alpha \otimes \nabla\alpha}{|\nabla\alpha|} \right). \quad (59)$$

Para finalizar, a força resultante da tensão interfacial é dada pela Equação (60). Essa força é o termo fonte (\vec{f}) adicionado a equação da quantidade de movimento, Equação (38).

$$\vec{f}_{vol} = \nabla \cdot \bar{T}. \quad (60)$$

5.3.3 Adesão na parede

No modelo VOF existe a possibilidade de especificar um ângulo de adesão na parede em conjunto com o modelo de tensão interfacial (BRACKBILL et al., 1992). Em vez de aplicar esta condição de contorno na própria parede, o ângulo de contato entre o fluido e a parede é usada para ajustar a normal da superfície em células perto da parede. Isto, assim chamado de condição de contorno dinâmico, resulta em um ajuste da curvatura da superfície perto da parede.

Se θ_c é o ângulo de contato na parede, então a superfície normal das células próxima da parede é dada pela Equação (61):

$$\hat{n} = \hat{n}_c \cos \theta_c + \hat{t}_c \sin \theta_c , \quad (61)$$

onde \hat{n}_c e \hat{t}_c são vetores unitários normal e tangencial a parede, respectivamente. A combinação deste ângulo de contato com a superfície normal calculada a uma célula de distância da parede determina a curvatura local da superfície, e esta curvatura é utilizada para ajustar o termo de força no cálculo da tensão interfacial.

5.3.4 Força de tensão superficial

Quando utilizado o método *Level-set*, a força resultante dos efeitos de tensão superficial (\vec{f}_{sf}) é dada pela Equação (62).

$$\vec{f}_{sf} = \sigma k \delta(\varphi) \vec{n} , \quad (62)$$

em que:

$$k = \nabla \cdot \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \Big|_{\varphi=0} , \quad (63)$$

$$\delta(\varphi) = \begin{cases} 0 & |\varphi| \geq \varepsilon \\ \frac{1 + \cos(\pi\varphi/\varepsilon)}{2\varepsilon} & |\varphi| < \varepsilon \end{cases} , e \quad (64)$$

$$\vec{n} = \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \Big|_{\varphi=0} , \quad (65)$$

onde ε representa a espessura da interface (sem volume e massa) e k a curvatura. Essa força de superfície (\vec{f}_{sf}) que é o termo fonte (\vec{f}) adicionado a equação da quantidade de movimento, Equação (38).

Existem duas correções que redistribuem a força para a fase mais densa nas células da interface para mitigar erros na solução, a correção de densidade e a

correção de Heaviside.

Na correção de densidade, a Equação (62) é modificada introduzindo a razão de densidades:

$$\vec{f}_{sf} = \frac{\rho}{0,5(\rho_o + \rho_w)} \sigma k \delta(\varphi) \vec{n} , \quad (66)$$

onde ρ é massa específica do sistema calculada usando a Equação (48).

Na correção de Heaviside, a Equação (62) é modificada introduzindo a função de Heaviside (H_φ):

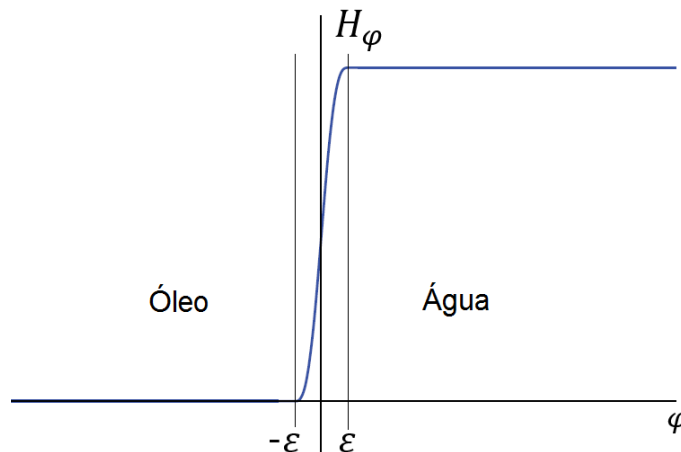
$$\vec{f}_{sf} = 2H_\varphi \sigma k \delta(\varphi) \vec{n} , \quad (67)$$

onde,

$$H_\varphi = \begin{cases} 0 & \varphi < -\varepsilon \text{ (fase primária, água)} \\ \frac{\varphi + \varepsilon}{2\varepsilon} + \frac{1}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{\pi\varphi}{\varepsilon} \right) & -\varepsilon \leq \varphi \leq \varepsilon \text{ (interface)} \\ 1 & \varphi > \varepsilon \text{ (fase secundária, óleo)} \end{cases} . \quad (68)$$

H_φ é uma função contínua da função degrau que ajuda a melhorar a estabilidade numérica quando as propriedades dos fluidos são interpoladas ao longo da interface e é mostrada na Figura 34.

Figura 34 - Função Heaviside suavizada.



Fonte: ROCA REYES (2011) (Adaptado).

A implementação atual do modelo é adequada apenas para regimes de fluxo bifásicos, em que dois fluidos são imiscíveis e não ocorre nenhuma transferência de massa.

5.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno estabelecidas para a resolução do problema são enumeradas abaixo:

1) Condição de entrada: perfil de velocidade uniforme na entrada.

$$v_z = \bar{v} . \quad (69)$$

2) Condição de saída: pressão de referência nula na saída.

$$p_{ref} = 0 . \quad (70)$$

3) Condição de parede: velocidades nulas nas paredes.

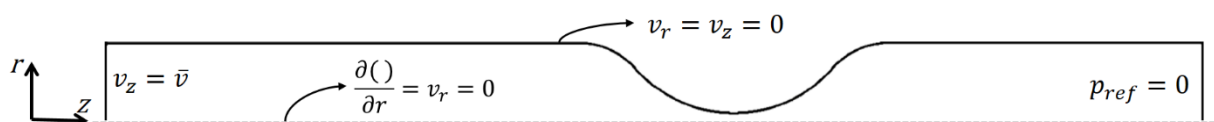
$$v_r = v_z = 0 . \quad (71)$$

4) Condição de simetria: derivadas em relação à r e a componente da velocidade v_r são feitas nulas

$$\frac{\partial(\)}{\partial r} = v_r = 0 . \quad (72)$$

As condições de contorno aplicadas ao problema podem ser visualizadas por meio da análise da Figura 35.

Figura 35 - Condições de contorno para o capilar com garganta, válido para o capilar reto, com simetria axissimétrica.



5.5 DISCRETIZAÇÃO E SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO GERAL DE TRANSPORTE

O Fluent® utiliza método de volumes finitos para converter uma equação geral de transporte escalar a uma equação algébrica que pode ser resolvida numericamente. A discretização das equações governantes do escoamento pode ser gerada empregando-se a equação transiente de conservação para o transporte de uma variável escalar ϕ . Isto é demonstrado pela Equação (73) escrita na forma integral para um volume controle arbitrário \forall :

$$\int_{\forall} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \cdot d\forall + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_{\forall} S_{\phi} \cdot d\forall . \quad (73)$$

sendo Γ_{ϕ} o coeficiente de difusão para ϕ , S_{ϕ} é o termo de geração de ϕ por unidade de volume e $\nabla \phi$ é o gradiente de ϕ . O 1º termo do lado esquerdo da equação (73) é a componente transiente, que descreve a variação de ϕ ao longo do tempo. O segundo termo representa o componente convectivo que traduz o transporte da grandeza escalar ϕ no campo de velocidades. No lado direito da equação (73), o primeiro termo designa o transporte de ϕ causado por difusão e o último termo representa a fonte. Entende-se por fonte, todas as forças que possam atuar no fluido que está confinado a um volume de controle, sejam estas, forças de superfície (tensão superficial, tensões de corte, pressão) ou de campo (gravidade, forças eletromagnéticas) (CUNHA, 2014). Para todos os volumes de controle no domínio computacional a Equação (73) é resolvida. A Figura 36 mostra uma célula triangular bidimensional como exemplo de volume de controle (com centro c_0) (FLUENT, 2014).

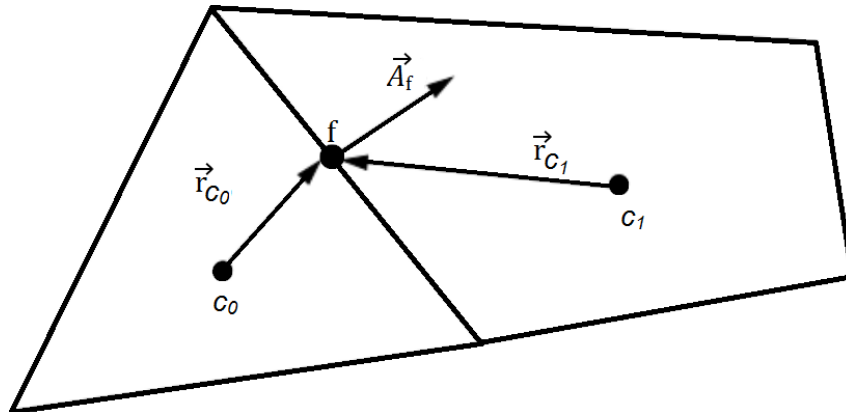
A discretização da Equação (73) para um dado volume de controle e suas fronteiras é expressa por:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \forall + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_{\phi} \nabla \phi_f \vec{A}_f + S_{\phi} \forall , \quad (74)$$

onde N_f é o número de faces que delimitam o volume de controle, ϕ_f é o valor de ϕ convectada (ou advectada) através da face f , $\rho_f \vec{v}_f \vec{A}_f$ é o fluxo de massa através da face, \vec{A}_f é igual a área da face e $\nabla \phi_f$ é o gradiente de ϕ na face. A discretização do

termo temporal, $\partial\phi/\partial t$, é mostrada no Tópico 5.5.2. As equações resolvidas pelo *software* Fluent® possuem a mesma forma geral da Equação (74), podendo ser aplicada para casos multidimensionais, com malhas estruturadas ou não-estruturadas podendo apresentar células com geometrias diversas.

Figura 36 - Exemplo de volume de controle para mostrar a discretização da equação de transporte de um escalar.



Fonte: FLUENT (2014) (adaptado).

A equação geral de transporte de um escalar discretizada, Equação (74), possui a variável escalar ϕ não conhecida, localizada no centro do volume de controle, e da mesma forma, os valores de ϕ também são desconhecidos nas células adjacentes a esse volume de controle. As equações de transporte frequentemente são não-lineares. Uma forma linearizada da Equação (74) pode ser definida por:

$$a_p\phi = \sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} + b , \quad (75)$$

sendo a_p e a_{nb} o coeficiente principal e vizinho, respectivamente, linearizados para resolução de ϕ , e o índice nb faz referência às células vizinhas ou adjacentes. O número de células vizinhas para cada volume de controle depende da malha construída, sendo igual ao número de faces que forma o volume de controle (com exceção das células de contorno). Portanto, para todas as células na malha empregada, podem ser definidas equações análogas a Equação (75).

5.5.1 Discretização espacial

Por padrão, o Fluent® armazena os valores discretos do escalar ϕ no centro das células (c_0 e c_1 da Figura 36). Contudo, os valores nas interfaces ϕ_f são necessários para os termos convectivos da Equação (74) e devem ser interpolados a partir dos valores do centro das células. Isto é conseguido usando o esquema *Upwind* (PATANKAR, 1980). Os termos difusivos da Equação (74) são resolvidos por diferenças centrais de segunda ordem.

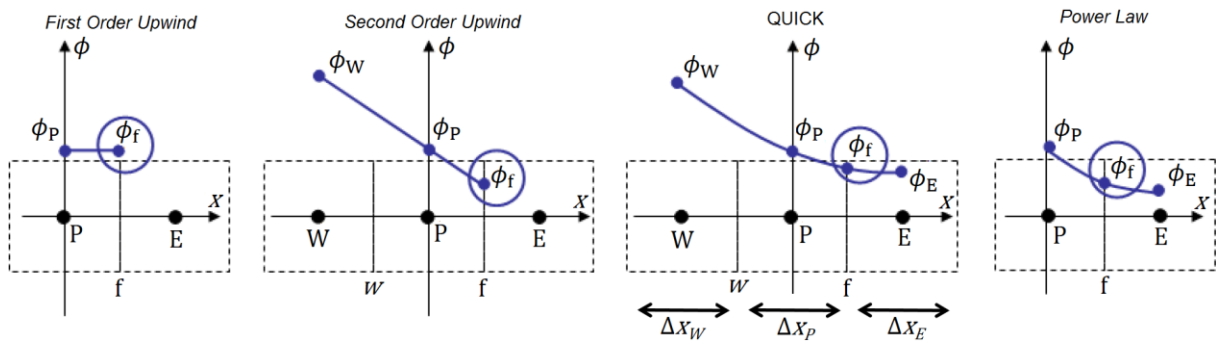
No esquema *Upwind* o valor na interface ϕ_f é derivado dos valores na célula a montante, relativa à direção da velocidade normal (sentido do escoamento) na Equação (74). Quatro métodos de interpolação espacial com esquemas *Upwind* estão disponíveis no Fluent®:

- *First Order Upwind*: é o mais simples dentre os esquemas indicado para situações em que o escoamento está alinhado com a malha. Nele, considera-se que o valor de ϕ_f é o mesmo do valor de ϕ no centro da célula adjacente a montante da face (de acordo com a direção do fluxo), conforme apresentado na Figura 37;

- *Second Order Upwind*: quando a malha não está alinhada com o escoamento e este atravessa as linhas ou faces da malha de forma oblíqua, o esquema de primeira ordem (*First Order*) perde rigor numérico, sendo mais apropriado a discretização de segunda ordem (*Second Order*). Nele, o valor de ϕ_f é obtido pela linearização dos valores de ϕ no centro das duas células vizinhas a montante da face (BARTH e JESPERSEN, 1989);

- *Power Law*: alternativa que oferece níveis de precisão semelhantes ao *First Order Upwind*, porém, é utilizado quando envolve transferência de calor. O valor de ϕ_f é encontrado pela aplicação dessa equação com os valores de ϕ no centro das células adjacentes a face;

- *QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics)*: é utilizado em malhas estruturadas e este esquema pode permitir melhorar a precisão na presença de rotação no escoamento. Este esquema fornece o valor de ϕ_f pela função quadrática gerada pelos valores de ϕ no centro das duas células vizinhas a montante da face e pelo valor dessa variável no centro da célula imediatamente a jusante.

Figura 37 - Esquemas *Upwind*.

Fonte: LIMA (2016) (adaptado)

Outros esquemas disponíveis:

- *Third-Order MUSCL (Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws)*: semelhante ao QUICK, o esquema desenvolvido por Van Leer (1979) pode permitir melhorar a precisão na presença de rotação e opera em qualquer tipo de elemento da malha reduzindo a difusão numérica;
- *Bounded Central Differencing* e *Central Differencing* (ativados pelo código *solve set expert* no Fluent®).

Embora o esquema *First Order Upwind* gere boa estabilidade dos cálculos, este pode desenvolver falsa difusão pela suavização dos gradientes no domínio do escoamento, sendo utilizado frequentemente apenas nas primeiras iterações como forma de facilitar a convergência dos cálculos. Por outro lado, *Second Order Upwind* apresenta maior precisão que o esquema de primeira ordem, porém é suscetível a instabilidades em regiões de forte gradiente. Dessa forma, recomenda-se a utilização do primeiro esquema para as iterações iniciais seguida do segundo esquema, garantindo assim a convergência dos cálculos com boa precisão (FLUENT, 2014; LIMA, 2016).

No presente trabalho, a discretização espacial foi realizada mediante o esquema QUICK. O esquema de discretização QUICK (LEONARD e MOKHTARI, 1990) é um esquema baseado na média ponderada entre o esquema *Upwind* de segunda ordem (*Second Order Upwind*) e diferenças centrais (*Central Differencing*), isto é, utiliza uma interpolação polinomial em três volumes de controle da malha computacional, constituídos pelos dois nós adjacentes à face e o nó a montante. Para a face f do volume de controle unidimensional apresentado na Figura 37,

considerando que a direção do escoamento é da esquerda para a direita, o valor da variável convectada, ϕ_f , será dado por:

$$\phi_f = \theta \left[\frac{\Delta x_E}{\Delta x_P + \Delta x_E} \phi_P + \frac{\Delta x_P}{\Delta x_P + \Delta x_E} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{\Delta x_W + 2\Delta x_P}{\Delta x_W + \Delta x_P} \phi_P - \frac{\Delta x_P}{\Delta x_W + \Delta x_P} \phi_W \right], \quad (76)$$

onde Δx_W , Δx_P e Δx_E são distâncias entre as fronteiras do volume de controle W, P e E respectivamente; f e w são as faces leste e oeste do volume de controle principal e θ é uma variável do esquema QUICK.

Um valor de $\theta = 0$ fornece o esquema *Upwind* de segunda ordem (*Second Order Upwind*) e um valor de $\theta = 1$ fornece um esquema diferenças centrais (*Central Differencing*). O esquema QUICK tradicional é obtido substituindo-se o valor de 1/8 para θ (LEONARD, 1979). A implementação no Fluent® utiliza uma variável que é o valor de θ dependente da solução, escolhido de forma a não introduzir novos pontos limites na solução.

5.5.2 Discretização dos termos temporais

Para simulações transientes, as equações governantes devem ser discretizadas no espaço e no tempo. A discretização espacial para equações transientes é idêntica ao caso permanente (ou estacionário). Todavia, a discretização temporal envolve a integração de cada termo das equações diferenciais sobre um passo de tempo Δt . Seja a Equação (77) uma expressão genérica para a evolução de uma grandeza escalar qualquer ϕ no tempo:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) . \quad (77)$$

Com base na Equação (74), a função F corresponde a parte convectiva e difusiva do fluxo através da face do volume de controle, além do termo de geração, cuja discretização espacial foi apresentada na seção anterior. A discretização temporal empregada neste trabalho consiste numa aproximação conhecida como diferenças regressivas (*Backward Differences*) (VAN DER WEIDE et al., 1999). O

termo de primeira ordem para a discretização temporal é dada por:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) , \quad (78)$$

e o termo de segunda ordem é dado por:

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi) , \quad (79)$$

onde $n + 1$ é o valor no próximo passo tempo, $t + \Delta t$; n é o valor no passo de tempo atual, t ; e $n - 1$ é o valor do passo tempo anterior, $t - \Delta t$.

Há dois métodos para avaliar $\partial\phi/\partial t$ em um passo de tempo futuro: implícito e explícito. A discretização implícita considera que ϕ^{n+1} (em uma dada célula) relaciona-se com ϕ^{n+1} (nas células vizinhas), através da função F . Todavia, a discretização explícita considera que ϕ^{n+1} (em uma dada célula) relaciona-se com o valor existente de ϕ^n (nas células vizinhas), através de outra função. A discretização explícita é bastante restritiva e não é disponível para o *solver* baseado na pressão e para escoamento incompressível, sendo utilizada principalmente para capturar o comportamento transiente de ondas em movimento (FLUENT, 2014).

Desta forma, considerando o esquema *Backward Differences* e a formulação totalmente implícita, a discretização temporal de primeira ordem (*First Order Implicit*) é apresentada como:

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^{n+1}) , \quad (80)$$

e a discretização temporal de segunda ordem (*Second Order Implicit*) é:

$$\phi^{n+1} = \frac{4}{3}\phi^n - \frac{1}{3}\phi^{n-1} + \frac{2}{3}\Delta t F(\phi^{n+1}) . \quad (81)$$

No presente trabalho utilizou-se integração implícita de primeira ordem (*First Order Implicit*) para a formulação transiente. Dependendo da escolha da precisão desejada para a integração temporal, resolve-se a Equação (80) ou a Equação (81) sucessivamente para uma sequência de instantes de tempo, fornecendo a evolução

de ϕ no tempo. A Equação (80) deve ser resolvida iterativamente em cada intervalo de tempo antes de passar para o seguinte. O método totalmente implícito tem a vantagem que é sempre estável, independentemente do tamanho do passo de tempo. O Fluent® disponibiliza mais duas formulações temporais: *Second Order Implicit* e *Bounded Second Order Implicit*.

5.5.3 Discretização dos termos temporais da equação da interface

A discretização temporal do método VOF é baseada no método explícito, ou seja, não é necessário efetuar iterações em cada passo de tempo porque a fração volumétrica de óleo no passo de tempo atual é determinada baseada somente em dados já conhecido do passo de tempo anterior. A formulação explícita toma a seguinte forma:

$$\frac{\alpha_o^{n+1}\rho_o^{n+1}-\alpha_o^n\rho_o^n}{\Delta t}\nabla + \sum_f \rho_o U_f^n \alpha_{o,f}^n = 0 , \quad (82)$$

com $n + 1$ sendo o valor no seguinte intervalo de tempo $t + \Delta t$ e n é o valor no tempo atual t , ∇ é o volume da célula, $\alpha_{o,f}$ é a fração volumétrica do óleo na face e U_f é o fluxo volumétrico através da face, baseado na velocidade normal.

A solução do esquema explícito é dependente do tempo e quando aplicada permite que o fluxo através das faces seja interpolado usando uma reconstrução da interface entre as fases ou usando volumes finitos.

5.5.4 Avaliação dos gradientes

Gradientes são necessários não só para a determinação dos valores de um escalar nas faces de células, mas também para a computação de termos de difusão secundárias e derivadas da velocidade. O gradiente $\nabla\phi$ de uma determinada variável ϕ é usado para discretizar os termos convectivos e difusivos nas equações de conservação regentes do escoamento.

O Fluent® disponibiliza três métodos para a análise dos gradientes: *Green-*

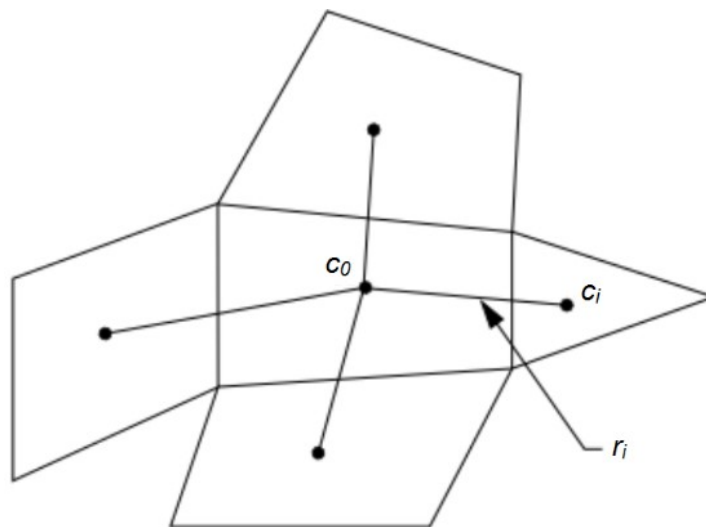
Gauss Cell Based, *Green-Gauss Node Based* e *Least Squares Cell-Based*. O primeiro gradiente requer menos esforço computacional, porém, a solução pode apresentar difusão numérica. O segundo é mais preciso, minimizando a falsa difusão, o que requer mais esforço computacional, sendo recomendada para malhas não estruturadas. O terceiro gradiente é definido por padrão e possui a mesma precisão e propriedades do que o gradiente anterior, mas com a vantagem de exigir menos esforço computacional (FLUENT, 2014). O método *Least Squares Cell-Based* foi escolhido neste trabalho.

Os dois primeiros métodos utilizam o teorema de Green-Gauss, enquanto o terceiro considera uma variação linear da variável ϕ entre duas células, conforme apresentado na Equação (83):

$$(\nabla\phi)_{c_0} \cdot \Delta r_i = (\phi_{c_i} - \phi_{c_0}) , \quad (83)$$

em que $(\nabla\phi)_{c_0}$ indica o gradiente de ϕ no centro de uma célula (c_0) e Δr_i é o vetor desde c_0 até o ponto c_i (centro da célula adjacente), como pode ser visualizada na Figura 38.

Figura 38 - Avaliação do gradiente para um volume de controle.

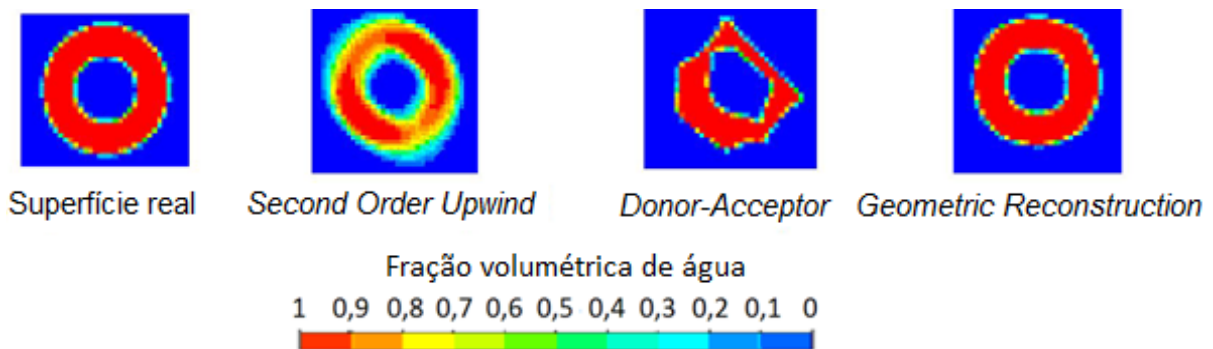


Fonte: FLUENT (2014).

5.5.5 Discretização dos termos espaciais da equação da interface

Embora as frações volumétricas α de cada fase nos diferentes volumes de controle da malha sejam úteis na identificação das regiões de encontro das fases do escoamento multifásico, seus valores não são suficientes para a determinação da forma geométrica da interface de separação. Adicionalmente, a utilização de métodos de discretização espacial convencionais (*Upwind*) nas células cujos valores de α se encontram entre 0 e 1 tende a provocar uma gradativa redução do gradiente da fração volumétrica nas regiões de encontro das fases, em outras palavras, ocorre dissipação da interface de separação, impedindo a sua identificação precisa. A Figura 39 apresenta um exemplo de atenuação do gradiente da interface para o esquema *Upwind* à medida que as iterações são realizadas (FLUENT, 2014; LIMA, 2016).

Figura 39 - Esquemas de discretização da interface.



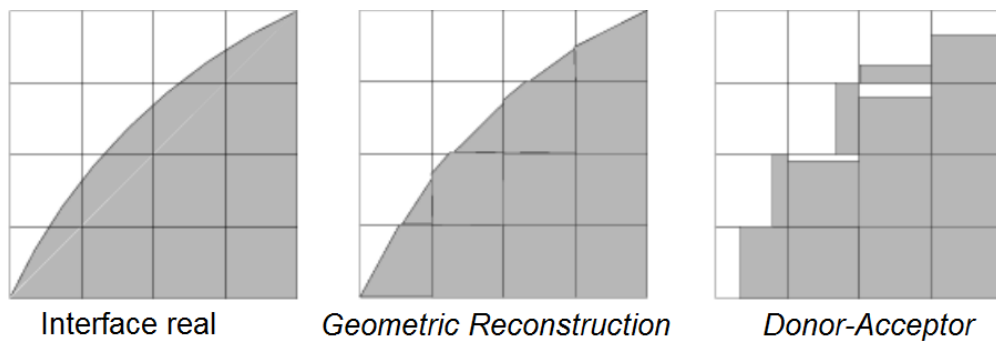
Fonte: FLUENT (2014) (adaptado).

O Fluent[®] possui cinco esquemas de interpolação disponíveis para determinação da interface dentro do volume de controle: *Geo-Reconstruct* (ou *Geometric Reconstruction*), CICSAM (*Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes*), *Donor-Acceptor* (é considerado obsoleto e não aparece na lista de esquemas, mas pode ser ativada pelo código *solve set expert* no Fluent[®]), *Compressive* e *Modified HRIC* (*High Resolution Interface Capturing*). Nesse trabalho foi utilizado o CICSAM.

O esquema CICSAM (UBBINK, 1997) é diferenciado pela alta resolução e baixo custo computacional. O esquema é adequado para os fluxos com altas razões de viscosidades entre as fases e oferece a vantagem de produzir uma interface que é

quase tão nítida quanto o esquema *Geometric Reconstruction*. Um esquema representativo da interface calculada é mostrado na Figura 40. Neste esquema, considera-se que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear na célula, gerada a partir de uma interpolação linear. Essa inclinação é usada para o cálculo do fluxo convectivo de fluido através das faces das células (FLUENT, 2014).

Figura 40 - Representação da interface por diferentes esquemas.



Fonte: FLUENT (2014) (adaptado).

5.6 SOLVER BASEADO NA PRESSÃO SEGREGADO

Para a discretização das equações da continuidade, Equação (34), e da quantidade de movimento, Equação (38), através do algoritmo baseado na equação de correção à pressão, será vantajoso começar por considerar estas equações em regime estacionário na sua forma integral como:

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0, \text{ e} \quad (84)$$

$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \oint p \vec{I} \cdot d\vec{A} + \oint \vec{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{f} \cdot dV. \quad (85)$$

Portanto, o objetivo desta seção é detalhar a discretização das equações de quantidade de movimento e continuidade, além de mostrar as técnicas empregadas para as suas soluções neste trabalho.

5.6.1 Discretização da equação de movimento

Os esquemas propostos nas seções 5.5 para a equação de transporte escalar podem ser aplicados para discretizar a equação de quantidade de movimento, Equação (85). Por exemplo, a equação para o componente x pode ser obtida fazendo $\phi = v$ na Equação (75) e obtendo:

$$a_p v_{c_0} = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S . \quad (86)$$

Se o campo de pressão e o fluxo de massa na face são conhecidos, a Equação (86) pode ser resolvida da maneira descrita nas seções 5.5 e o campo de velocidade é obtido. No entanto, o campo de pressão e o fluxo de massa na face não são conhecidos e devem ser obtidos como parte da solução.

Analisando a Equação (86) verifica-se que há necessidade do valor da pressão na face, entre as células c_0 e c_1 da Figura 36. O Fluent® utiliza esquemas co-localizados, onde os valores de pressão e velocidade estão ambos armazenados no centro do volume de controle. A pressão na face é interpolada por meio de cinco esquemas:

- *Linear*: este esquema calcula a pressão da face como uma média dos valores de pressão para as células adjacentes;
- *Standard*: este esquema interpola os valores de pressão para as faces usando coeficientes da equação de movimento discretizada (RHIE e CHOW, 1983):

$$p_f = \left(\frac{p_{c_0}}{a_{p,c_0}} + \frac{p_{c_1}}{a_{p,c_1}} \right) / \left(\frac{1}{a_{p,c_0}} + \frac{1}{a_{p,c_1}} \right) . \quad (87)$$

Para este esquema funcionar bem, a variação de pressão entre os volumes de controles deve ser suave para evitar discrepâncias na velocidade na célula;

- *Second Order*: este esquema reconstrói a pressão na face usando um esquema de diferenciação central. Os valores de pressão nas faces são dados por:

$$p_f = \frac{1}{2} (p_{c_0} + p_{c_1}) + \frac{1}{2} (\nabla p_{c_0} \cdot \vec{r}_{c_0} + \nabla p_{c_1} \cdot \vec{r}_{c_1}) ; \quad (88)$$

- *Body Force Weighted*: este esquema calcula a pressão na face assumindo

que o gradiente normal da diferença entre a pressão e as forças de corpo seja constante. É indicado para escoamentos que envolvam forças elevadas sobre um corpo.

- PRESTO! (*PREssure STaggering Option*): este esquema usa um balanço de continuidade discretizado num volume de controle deslocado com relação à face para encontrar a pressão, de forma semelhante ao empregado com malhas deslocadas para resolver os campos de escoamento (PATANKAR, 2980). É indicado para escoamentos com rotação, convecção natural com elevado número de Reynolds, escoamentos rotacionais de alta velocidade, escoamento através de meios porosos ou escoamentos através de domínios muito curvilíneos.

Por padrão, o esquema de segunda ordem (*Second Order*) é usado, exceto em casos de misturas ou VOF, cujo esquema padrão é o PRESTO!. Os esquemas *Linear*, *Standard* e *Second Order* não estão disponíveis por padrão, podendo ser utilizados por meio do comando 'solve set expert' no Fluent®. No presente trabalho foi utilizado o esquema PRESTO! para discretização espacial da pressão.

5.6.2 Discretização da equação da continuidade

A equação da continuidade, Equação (84), quando integrada sobre o volume de controle da Figura 36, gera a seguinte equação discretizada:

$$\sum_f^{N_{faces}} j_f A_f = 0 , \quad (89)$$

onde j_f representa o fluxo mássico através da face f , $\rho \vec{v}_n$.

Para satisfazer a Equação (89) é necessário relacionar a velocidade normal à face do volume de controle, \vec{v}_n , com as velocidades armazenadas no seu centro. Para isso, \vec{v}_n é interpolado através de uma expressão (RHIE e CHOW, 1983) que utiliza os coeficientes a_p da equação de quantidade de movimento, Equação (86), como fatores de ajuste. Por meio deste procedimento, o fluxo mássico j_f na face f , pode ser reescrito como:

$$j_f = \rho_f \frac{a_{p,c_0} v_{n,c_0} + a_{p,c_1} v_{n,c_1}}{a_{p,c_0} + a_{p,c_1}} + d_f \left((p_{c_0} + (\nabla p)_{c_0} \cdot \vec{r}_0) - (p_{c_1} + (\nabla p)_{c_1} \cdot \vec{r}_1) \right) \quad (90)$$

$$j_f = \hat{j}_f + d_f (p_{c_0} - p_{c_1}), \text{ em que}$$

$$d_f = \frac{A_f}{(a_{p,c_0} + a_{p,c_1})/2}, \quad (91)$$

onde p_{c_0} , p_{c_1} e v_{n,c_0} , v_{n,c_1} são, respectivamente, as pressões e as velocidades normais dentro dos volumes de controle que estão de cada lado da face f (Figura 36). O termo \hat{j}_f contém influência de velocidades de ambas as células vizinhas e o termo d_f é função dos coeficientes a_{p,c_0} e a_{p,c_1} para cada volume de controle entre a face f (ANDRADE, 2009). Para escoamentos incompressíveis o Fluent® usa a média aritmética para a massa específica.

As Equações (89) e (90) propostas por Rhie e Chow (1983) evitam o indesejado efeito *checkerboard* ou *zig-zag* do campo de pressão (PATANKAR, 1980; DATE, 2003) existente nos arranjos co-localizados. O arranjo é denominado co-localizado quando são utilizados os mesmos volumes de controle para todas as variáveis.

5.6.3 Acoplamento pressão-velocidade

Em simulações de escoamento, são resolvidas essencialmente as equações de conservação da quantidade de movimento e da massa envolvendo as variáveis de pressão e velocidade. Visto que os gradientes de pressão no domínio do escoamento influenciarão no equacionamento da quantidade de movimento e são, conseqüentemente, indispensáveis para a determinação do campo de velocidade, a distribuição da pressão no fluido precisa ser determinada. Sabendo-se que o sistema de equações formado pelas equações de Navier-Stokes e da continuidade ainda não apresentam solução analítica, a determinação do campo de velocidade também se torna necessário para o cálculo do mapa de pressão. A essa relação de dependência entre tais variáveis, dá-se o nome de acoplamento pressão-velocidade.

O acoplamento pressão-velocidade é alcançado usando a Equação (90) para derivar uma condição adicional para a pressão reformulando a equação da continuidade, Equação (89). O Fluent® fornece quatro tipos de algoritmos segregados

para o acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), SIMPLEConsistent, PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) e o FSM (*Fractional Step Method*); e um algoritmo acoplado: *Coupled*. Os algoritmos SIMPLE, SIMPLEC e *Coupled* são indicados para escoamento em regime permanente e os outros, para escoamentos transientes.

- SIMPLE: é o algoritmo padrão no Fluent®. Desenvolvido por Patankar (1980), o algoritmo SIMPLE usa uma relação entre velocidade e correções de pressão para reforçar a conservação de massa e obter o campo de pressão. Se a equação do movimento é resolvida para um suposto campo de pressão p^* , o fluxo mássico resultante na face f , j_f^* , calculado a partir da Equação (90),

$$j_f^* = \hat{j}_f^* + d_f(p_{c_0}^* - p_{c_1}^*) , \quad (92)$$

não satisfaz a equação da continuidade. Consequentemente, a correção j_f' é adicionada ao fluxo na face j_f^* de modo que o fluxo na face corrigido, j_f ,

$$j_f = j_f^* + j_f' , \quad (93)$$

satisfaça a equação da continuidade. O algoritmo SIMPLE postula que j_f' seja escrito como:

$$j_f' = d_f(p'_{c_0} - p'_{c_1}) , \quad (94)$$

onde p' é a correção de pressão no volume de controle. A correção de pressão é obtida de forma a garantir conservação de massa. Desta forma, o algoritmo SIMPLE substitui as equações de correção de fluxo, Equações (93) e (94), na equação da continuidade discretizada, Equação (89), para obter a equação discreta para a correção de pressão no volume de controle:

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b . \quad (95)$$

onde o termo fonte b é a taxa de fluxo de líquido para dentro do volume de controle:

$$b = \sum_f^{N_{faces}} j_f^* A_f . \quad (96)$$

A equação de correção de pressão, Equação (95), pode ser resolvida usando o algoritmo algébrico AMG (*Algebraic Multigrid*) de HUTCHINSON e RAITHBY (1986), mostrado no Tópico 5.7. Uma vez que a solução é obtida, a pressão no volume de controle e o fluxo na face são corrigidos usando as Equações (97) e (98).

$$p = p^* + p' . \quad (97)$$

$$j_f = j_f^* + d_f(p'_{c_0} - p'_{c_1}) . \quad (98)$$

O fluxo na face corrigido, j_f , satisfaz a equação da continuidade discreta durante cada iteração.

- SIMPLEC: este algoritmo variante do SIMPLE, desenvolvido por Vandoormaal e Raithby (1984), permite a convergência da solução mais rápida para casos menos complicados, como por exemplo escoamentos em regime laminar sem modelos adicionais ativados. A diferença entre os métodos SIMPLE e SIMPLEC está apenas na expressão do termo d_f , em cujo denominador, agora, aparece uma diferença, como mostrada na Equação (99) (ANDRADE, 2009; FLUENT, 2014).

$$d_f = \frac{A_f}{(a_{p,c_0} + a_{p,c_1})/2 - \sum_{nb} a_{nb}} ; \quad (99)$$

- PISO: Uma limitação dos algoritmos SIMPLE e SIMPLEC é que novas velocidades e seus fluxos correspondentes não satisfazem os balanços de quantidade de movimento após a equação de correção da pressão ser resolvida. Como resultado, o cálculo tem de ser repetido até o balanço ser satisfeito. Desenvolvido por Issa (1986), o PISO consiste em gerar uma solução mais aproximada da correção da pressão e da velocidade do que o algoritmo SIMPLE ao empregar dois níveis de correção (correção de assimetria, *Skewness Correction*, e correção de vizinhança, *Neighbor Correction*), podendo manter um cálculo estável para um passo de tempo elevado. A vantagem dele em relação aos algoritmos SIMPLE e SIMPLEC é baseada no fato de a convergência por passo de tempo ser alcançada com um número consideravelmente menor de iterações, apesar de o tempo requerido para uma iteração ser maior;

- FSM: disponível apenas quando NITA for usado, Tópico 5.6.4. Neste algoritmo

as equações de movimento são desacopladas da equação da continuidade com o objetivo de reduzir o número de iterações. Nele, iterações intermediárias são introduzidas nos passos do processo de acoplamento pressão-velocidade. Dessa forma, um único processo é efetuado para cada passo de tempo, reduzindo de maneira considerável o esforço computacional em problemas transientes. Simulações que utilizam modelos multifásicos, entretanto, tendem a apresentar instabilidades quando realizadas com o algoritmo FSM. Nesse caso, o algoritmo PISO torna-se mais indicado.

- *Coupled*: a vantagem do algoritmo acoplado em relação ao segregado é a obtenção de uma implementação monofásica mais robusta e eficiente para escoamentos em regime permanente.

No presente trabalho o algoritmo PISO foi escolhido.

5.6.4 Algoritmo de avanço temporal

Para escoamentos transientes a forma discretizada das equações genéricas de transporte foi dada pela Equação (73). A discretização temporal da derivada transiente, $\partial\phi/\partial t$, foi mostrada no Tópico 5.5.2, incluindo os esquemas de primeira e segunda ordem no tempo. O *solver* baseado na pressão no Fluent® utiliza a discretização implícita da equação de transporte. Como padrão, todos os termos convectivos, difusivos e fonte são avaliados no nível de tempo $n + 1$, como mostrado na Equação (100).

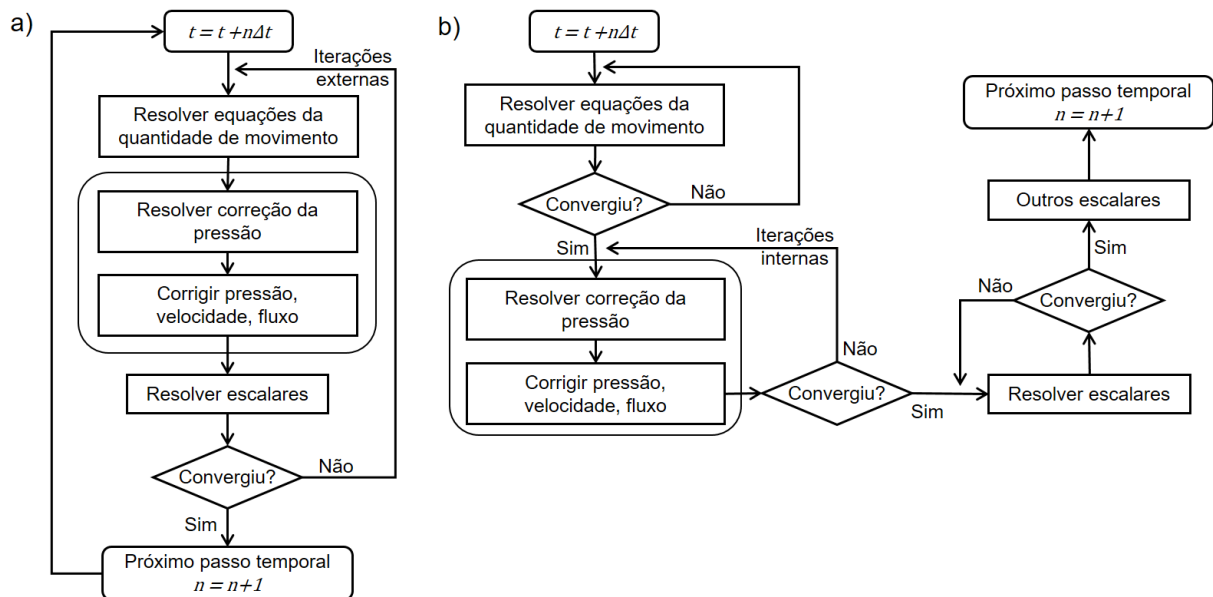
$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \cdot dV + \oint \rho^{n+1} \phi^{n+1} \vec{v}^{n+1} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi^{n+1} \nabla \phi^{n+1} \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi^{n+1} \cdot dV . \quad (100)$$

No *solver* baseado na pressão, o erro global da discretização temporal é determinado pela escolha do esquema de discretização (primeira ordem ou segunda ordem) e pela maneira em que as soluções avançam no tempo (algoritmo de avanço temporal). A discretização temporal introduz o erro de truncamento correspondente a $O(\Delta t)$ e $O[(\Delta t)^2]$ para a primeira e a segunda ordem, respectivamente. Há duas aproximações para o algoritmo de avanço temporal: iterativo e não iterativo.

No algoritmo de avanço temporal iterativo, todas as equações são resolvidas

iterativamente, para um dado passo de tempo, até que os critérios de convergência sejam atendidos. Porém, avançar as soluções em um passo de tempo normalmente requer um número de iterações externas, como mostrado na Figura 29 e na Figura 41a. Com este algoritmo iterativo, a não-linearidade das equações individuais e acoplamentos entre equações são totalmente contabilizados, eliminando o erro. O algoritmo iterativo é o padrão no Fluent®.

Figura 41 - Algoritmos a) iterativo, e b) não-iterativo.



Fonte: FLUENT (2014) (adaptado).

No algoritmo de avanço temporal iterativo exige-se um esforço computacional devido a um grande número de iterações externas executadas para cada passo de tempo. A ideia do algoritmo de avanço temporal não iterativo (NITA - *Non-Iterative Time-Advancement*) é que, a fim de preservar a precisão geral do tempo, não é necessário reduzir o erro a zero. O algoritmo NITA, como visto na Figura 41b, não necessita de iterações externas, realizando apenas uma única iteração externa por passo de tempo, o que acelera significativamente simulações transientes. No entanto, o algoritmo NITA ainda necessita uma iteração interna para resolver o conjunto individual de equações (FLUENT, 2014).

Para escoamento monofásico o Fluent® oferece duas versões do algoritmo NITA, para o método FSM (*Fractional Step Method*) e o PISO. Em geral este algoritmo não é recomendado para escoamentos com fluidos de alta viscosidade.

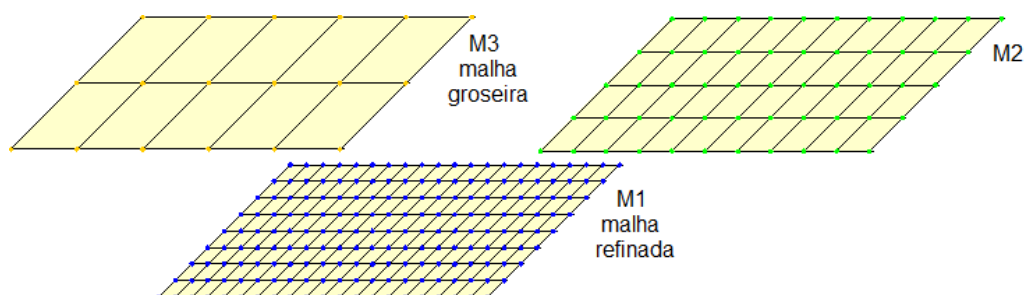
5.7 MÉTODO DE SOLUÇÃO DO SISTEMA ALGÉBRICO

Tendo como finalidade gerar a resolução do sistema algébrico o *software* Fluent® emprega o método *Multigrid* (HUTCHINSON e RAITHY, 1986). Esta técnica torna a convergência mais rápida por meio de uma sucessão de correções em uma série de graus de refinamento da malha. O uso deste método reduz o número de iterações e o tempo de processamento exigido para obter uma solução convergida, particularmente quando a malha contém um número grande de volumes de controle (REZENDE, 2009).

Ao utilizar-se um outro método iterativo (de um nível) para solução de um sistema algébrico, o método consegue rapidamente remover os erros locais (erros de alta frequência), ou seja, o efeito da solução em um volume de controle é comunicado rapidamente ao volume de controle adjacente. Entretanto, o método é menos efetivo na redução de erros globais (erros de baixa frequência), ou seja, aqueles que existem sobre um grande número de volumes de controle. Desta forma, correções globais para a solução em um elevado número de volumes de controle acontecem lentamente, necessitando de muitas repetições. Conseqüentemente, o desempenho do método diminuirá à medida que se aumenta o número de volumes de controle.

O método *Multigrid* é fundamentado na percepção de que cada faixa de frequência de erro precisa ser diminuída no espaçamento mais apropriado. Para que os componentes do erro de baixa frequência possam ser eliminados com eficiência, o método *Multigrid* procura trabalhar com uma sequência de malhas M1, M2, ..., Mn, cada vez mais grossas (Figura 42), onde então o erro pode ser rapidamente suavizado. Em cada nível de malha, os componentes do erro correspondentes são eficientemente reduzidos, acelerando o processo de convergência.

Figura 42 - Sequência de malhas para o método *Multigrid*.



Fonte: REZENDE (2009).

5.8 RESUMO DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS ESCOLHIDOS

Baseado em Morais et al. (2016) os parâmetros numéricos aplicados a este trabalho foram: modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) acoplado com o *Level-set*; modelo de viscosidade laminar; algoritmo segregado implícito; método PISO para o acoplamento pressão-velocidade; esquema *Least Squares Cell Based* para a discretização espacial do gradiente; esquema PRESTO! para a discretização espacial da pressão; esquema QUICK para a discretização espacial do momento; esquema CICSAM para a discretização espacial da fração volumétrica e *Second Order Upwind* para a função *Level-set*. Para a formulação transiente foi escolhido a opção *First Order Implicit*. Método de avanço do tempo Método iterativo.

5.9 CONVERGÊNCIA DA SOLUÇÃO NÚMERICA

Considera-se que a simulação obteve convergência quando os resíduos normalizados das variáveis decaem até uma certa ordem de grandeza. O resíduo R^ϕ da equação de transporte discretizada, Equação (75), pode ser definido, na sua forma normalizada, por meio da expressão:

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{célula}} [\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p]}{\sum_{\text{célula}} [a_p \phi_p]} . \quad (101)$$

O operador somatório usado ($\sum_{\text{célula}}$) indica que o termo entre colchetes está sendo somado para cada volume de controle da malha. Foi admitido, para todas as simulações computacionais realizadas, a convergência da solução pelo critério $R^\phi < 10^{-5}$. No caso de uma divergência na simulação os valores dos resíduos aumentam ao invés de diminuírem. Quanto menor o critério definido mais iterações serão necessárias para atingir a precisão desejada para um mesmo passo de tempo o que aumenta o tempo computacional.

5.10 ESCOLHA DO PASSO DE TEMPO

A análise do passo de tempo foi baseada em Bohacek (2010), em que três condições restritivas devem ser seguidas para a seleção do passo de tempo. A primeira condição é a CFL (*Courant Friedrichs Lewy*), que resulta dos termos convectivos das equações de transporte:

$$\Delta t_{CFL} = \frac{C_o \Delta x}{\bar{v}} . \quad (102)$$

A segunda condição se refere a discretização explícita da tensão superficial. Utiliza-se o passo de tempo proposto por Brackbill (1992):

$$\Delta t_B = \left(\frac{\rho_w \Delta x^3}{2\pi \sigma_{wo}} \right)^{0,5} . \quad (103)$$

Por último, uma condição para escoamentos com número de Reynolds baixos e médios proposta por Galusinski e Vigneaux (2008):

$$\Delta t_V = \frac{\mu_w \Delta x}{\sigma_{wo}} . \quad (104)$$

Assumindo os seguintes parâmetros: $C_o = 0,25$, $\Delta x = 2 \times 10^{-5} \text{m}$, $v = 10^{-5} \text{m/s}$, $\rho_w = 1000 \text{kg/m}^3$, $\mu_w = 0,001 \text{kg/ms}$ e $\sigma_{wo} = 7,6 \times 10^{-8} \text{N/m}$, os valores calculados para Δt_{CFL} , Δt_B e Δt_V foram, respectivamente, 0,5; 0,0041 e 0,26 s. O passo de tempo utilizado foi o maior calculado para evitar grandes tempos de simulação, $\Delta t = 0,5$ segundos. O tempo de simulação (t , em segundos) pode ser calculado para qualquer número de passos de tempo, $N_{\Delta t}$, pela simples relação:

$$t = N_{\Delta t} \Delta t . \quad (105)$$

5.11 RECURSO COMPUTACIONAL

As simulações foram realizadas com o seguinte *hardware* disponível:

- Processador Intel® Core™ i7-4810MQ 2.80Ghz (Turbo 3.8Ghz);
- Memória RAM Corsair Vengeance® 2x4GB 1600MHz DDR3 SODIMM;
- Placa de vídeo NVIDIA GeForce® GTX 850M;
- SSD Samsung® 840 EVO 250GB mSATA;
- Disco rígido SSHD ST1000LM14 Seagate® 1TB;
- Windows® 10 Pro 64 bits versão 1511 Build 10586.

O *software* Fluent® apresenta dois tipos de processamento, o serial e o paralelo. O processamento serial significa o uso de apenas um processo para gerenciar os arquivos de entrada e saída, o gerenciamento dos dados e os cálculos da solução do escoamento em apenas um computador. Já o processamento paralelo permite a divisão das tarefas em dois ou mais processos sendo executados simultaneamente no mesmo computador, ou em vários computadores da rede, com o objetivo de reduzir o tempo computacional. A princípio foi utilizado o processamento serial.

5.12 TESTE DE INDEPENDENCIA DE MALHA

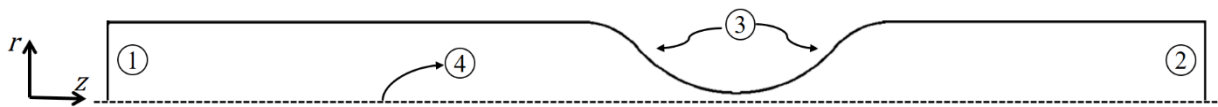
A escolha da malha computacional adequada para a solução do escoamento é de suma importância para a confiabilidade dos resultados numéricos. A precisão da solução em um problema de CFD depende do número de elementos e como estes estão distribuídos na malha. Em geral, à medida que a malha é refinada, a solução numérica na maioria das vezes se aproxima de uma solução mais exata, porém, o esforço computacional é cada vez maior. A qualidade da malha possui um papel direto na qualidade da análise tornando a etapa da sua geração mais importante e que demanda mais tempo no problema de CFD. Assim, a malha ideal deve apresentar um compromisso entre o tempo de processamento e a precisão dos resultados.

Após a criação das geometrias passou-se para o próximo passo, a criação das malhas, no ambiente *Meshing*. Primeiramente foram nomeadas 4 zonas (*Named Selections*) que serão utilizadas no ambiente Fluent® como condições de contorno

onde são identificadas por números na Figura 43, e são válidas para todas geometrias utilizadas, sendo:

- 1) Entrada: a entrada de água, onde é definido a velocidade média de injeção de água de $\bar{v} = 10^{-5}$ m/s;
- 2) Saída: a saída de água e a gota de óleo, onde pressão zero é prescrita;
- 3) Parede: é a parede do capilar, onde é utilizado a condição de não deslizamento e ângulo de contato de 180° com o fluido;
- 4) Simetria: é a linha de simetria (caso axissimétrico).

Figura 43 - Condições de contorno para o capilar com garganta (equivalente para o reto).



O próximo passo para a criação da malha foi utilizar o *Face Meshing* na geometria, uma ferramenta que permite que o domínio seja discretizado apenas com volumes de controle quadriláteros. Outra ferramenta utilizada para criação da malha foi o *Refinement* que disponibiliza três graus de refinamento, de 1 a 3, sendo esta opção a que gera um maior grau de refinamento. Foram utilizados os três níveis de refinamento para o capilar reto ($D_{garg} = 1,0$) e também para o capilar com garganta ($D_{garg} = 0,1$). A Tabela 4 mostra o número de elementos e nós das malhas criadas e suas respectivas qualidades ortogonais, no qual valores próximos de 1 (um) representa uma malha de ótima qualidade. A ocorrência de não-ortogonalidade afeta a acurácia da aproximação numérica causando erros na solução do problema. Os detalhes da discretização do domínio do capilar reto são mostrados na Figura 44 e para o capilar com garganta são mostrados na Figura 45.

Tabela 4 - Características das malhas no teste.

Capilar	Opção de refinamento	Número de elementos	Número de nós	Qualidade ortogonal
Reto	1 Grosseira	2.800	3.015	1,0000
"	2 Média	6.300	6.622	1,0000
"	3 Refinada	11.200	11.629	1,0000
Garganta	1 Grosseira	2.856	3.075	0,9574
"	2 Média	6.426	6.754	0,9582
"	3 Refinada	11.424	11.861	0,9584

Figura 44 - Detalhe das malhas para o capilar reto.

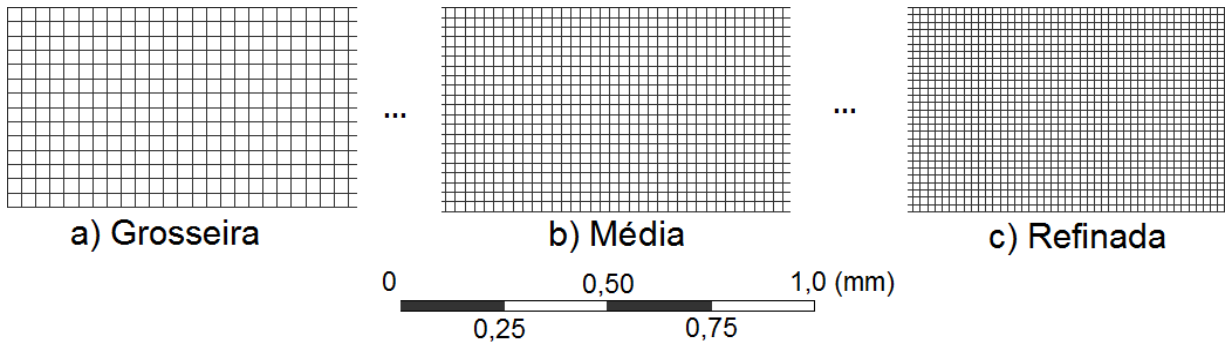
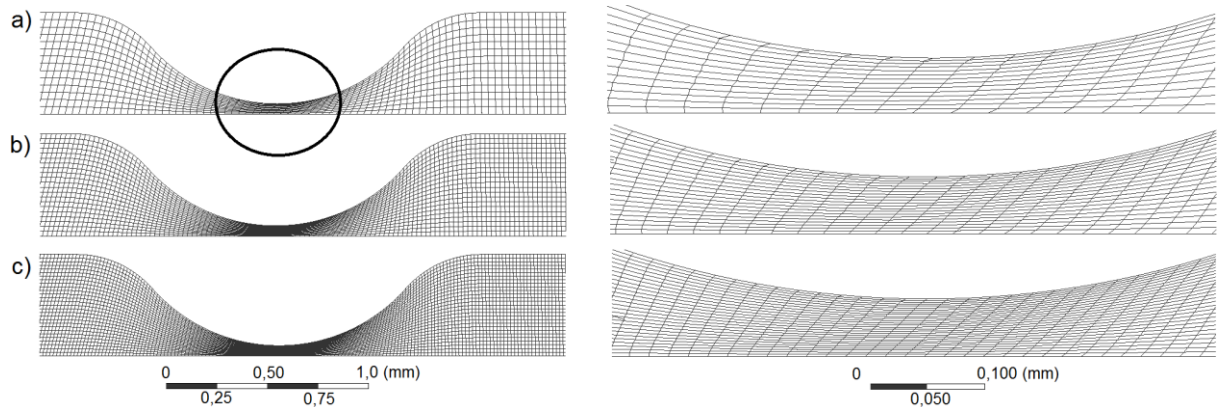


Figura 45 - Detalhe das malhas para o capilar com garganta. a) malha grosseira, b) malha média e c) malha refinada.



A Tabela 5 mostra os resultados obtidos com o teste de malha (simulação) para o caso 2 (capilar reto com: $\mu_R = 10$; $C_a = 0,132$; $D_{gota} = 0,8$ e $D_{garg} = 1,0$) e para o caso 12 (capilar com garganta com: $\mu_R = 10$; $C_a = 0,132$; $D_{gota} = 0,8$ e $D_{garg} = 0,1$). O teste foi realizado monitorando a posição da interface e a variação de pressão (somente para o capilar com garganta) para escolher a discretização do domínio computacional mais apropriada. A Figura 46 mostra a posição da interface da gota para o capilar reto e a Figura 47 mostra a posição da interface para o capilar com garganta para alguns passos de tempo. As linhas de cores vermelha, azul e preta representam, respectivamente, a posição das interfaces para a opção de refinamento 1, 2 e 3. Para o capilar reto é escolhida a malha média, devido a um tempo computacional médio aceitável, enquanto que para o capilar com garganta é escolhida a malha refinada pelo fato da obtenção de valores mais precisos de pressão, como pode ser visto na Figura 48. As malhas escolhidas garantiram uma melhor representação da interface principalmente na zona com garganta. Na Figura 47 está mostrada o último passo de tempo ($N_{\Delta t} = 27$) em que a solução não convergiu com a

malha média para o capilar com garganta. Para as outras malhas testadas a solução atingiu, para cada passo de tempo, o critério de convergência de $R\phi < 10^{-5}$.

Tabela 5 - Resultados das malhas nos testes.

Capilar	Opção de refinamento	Tempo computacional, min	Iterações	Número de passos de tempo, $N_{\Delta t}$
Reto	1 Grosseira	70	66.541	650
"	2 Média	139	11.0834	650
"	3 Refinada	198	131.600	650
Garganta	1 Grosseira	40	40.170	422
"	2 Média		não convergiu	
"	3 Refinada	90	54.240	412

Figura 46 - Monitoramento da interface no capilar reto para passos de tempo: 10, 170, 395.

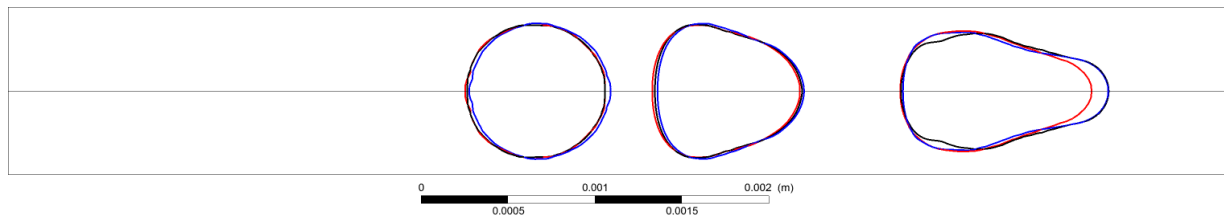


Figura 47 - Monitoramento da interface no capilar com garganta para passos de tempo: 27, 90, 110 e 290.

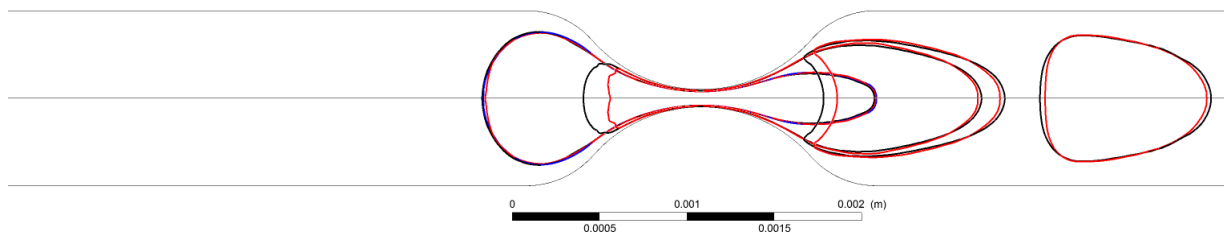
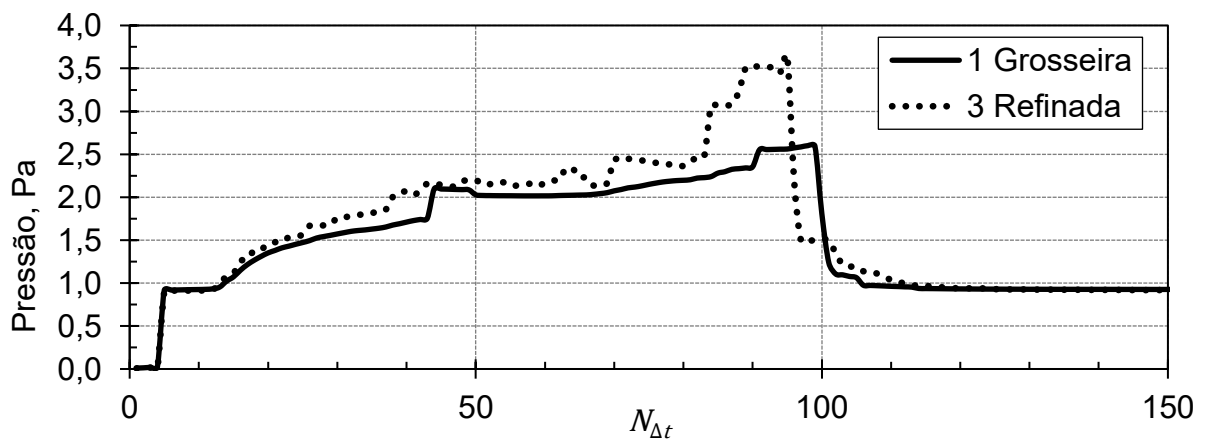


Figura 48 - Variação de pressão para o capilar com garganta para dois níveis de refinamento.



6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dedicado a apresentação e discussão dos resultados obtidos. O processo de obtenção dos resultados parciais obtidos e publicados no artigo (APÊNDICE A: Artigo publicado) foram de vital importância para o aprendizado no *software* Fluent® acerca do problema e para a melhoria da metodologia proposta. Este cenário teve como objetivo realizar uma análise qualitativa da relação entre o número de capilaridade (C_a) e a razão de viscosidades (μ_R) na estabilidade da interface de uma gota de óleo escoando em capilares molhados por água, deixando-a mais estável e rígida.

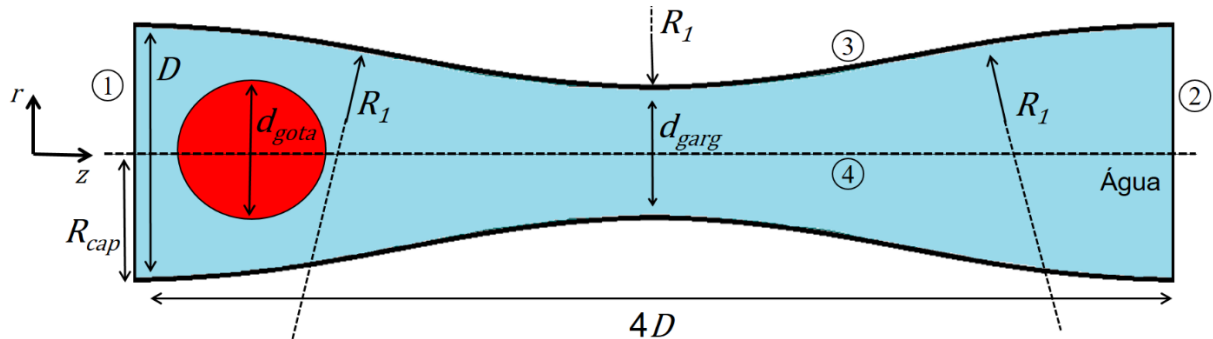
6.1 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA

Primeiramente foi realizada a simulação do problema abordado por Roca Reyes (2011), que se refere ao escoamento de uma gota de óleo imersa em água através de um capilar reto e com garganta. Esta etapa é incorporada para validar o procedimento de obtenção dos resultados expostos nos próximos tópicos. Roca Reyes (2011) utilizou o método dos elementos finitos e o método *Level-set* para captura da interface. No presente trabalho o *software* Fluent® foi utilizado, que é baseado em volumes finitos e foi escolhido os métodos VOF acoplado com *Level-set* para o problema da interface. Torquato (2015) também utilizou o trabalho de Roca Reyes (2011) como referência sendo resolvido pelo método de Lattice-Boltzmann. Apesar de utilizarem parâmetros físicos diferentes os parâmetros adimensionais foram os mesmos, os quais controlam o escoamento, obtendo resultados semelhantes.

Roca Reyes (2011) utilizou os seguintes parâmetros para a geometria do capilar com garganta: a distância entre a parede e a linha de simetria é $R_{cap} = 0,05$ mm, logo, o diâmetro do capilar é $D = 0,1$ mm e o comprimento é de $4D$, isto é, $0,4$ mm. O diâmetro da garganta é $d_{garg} = 0,05$ mm. Esta foi gerada utilizando três arcos de circunferências tangentes de raio $R_1 = 0,406$ mm. A razão de diâmetros D_{garg} , relação d_{garg}/D , é igual a $0,5$ e para a razão de diâmetros D_{gota} , relação d_{gota}/D , é igual a $0,6$, ou seja, o diâmetro da gota simulada possui $d_{gota} = 0,06$ mm. Esta

geometria é mostrada na Figura 49 sendo apenas utilizada nesta etapa de validação.

Figura 49 - Geometria do capilar com garganta utilizada por Roca Reyes (2011).



Para as condições de contorno, numeradas na Figura 49, utilizou-se: 1) entrada do capilar cuja velocidade média definida, \bar{v} , está apresentada na Tabela 6; 2) saída do capilar, na qual pressão igual a zero foi prescrita; 3) parede do capilar em que a condição de não deslizamento foi aplicada; e 4) linha de simetria.

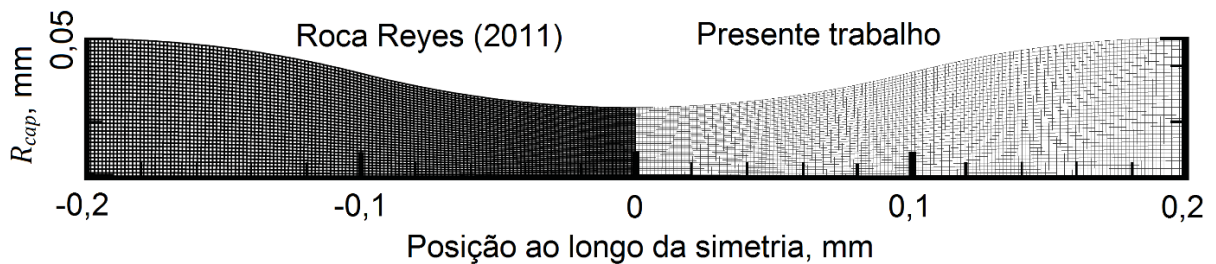
Na Tabela 6 é possível observar os parâmetros dos fluidos utilizados por Roca Reyes (2011) e Torquato (2015) para três números de capilaridade (C_a), 0,066, 0,053 e 0,026. As viscosidades da água e do óleo assumiram valores que resultaram em uma razão de viscosidades $\mu_R = 10$. O passo de tempo (Δt) utilizado por Roca Reyes (2011) foi de 3×10^{-5} s. Roca Reyes (2011) e Torquato (2015) informaram a velocidade máxima do escoamento (v_{max}), porém, para o cálculo do número de capilaridade deve-se utilizar a velocidade média (\bar{v}) em que $\bar{v} = 0,5 v_{max}$. Os parâmetros aplicados para esta validação foram referentes ao número de capilaridade $C_a = 0,066$.

Tabela 6 - Parâmetros das simulações de Roca Reyes (2011) e Torquato (2015).

Autor	$C_a = 0,066$		$C_a = 0,053$		$C_a = 0,026$	
	Roca	Torquato	Roca	Torquato	Roca	Torquato
v_{max} , m/s	0,00210	0,0010	0,00210	0,0010	0,00210	0,0010
\bar{v} , m/s	0,00105	0,0005	0,00105	0,0005	0,00105	0,0005
σ , N/m	$4,4 \times 10^{-4}$	$7,6 \times 10^{-6}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-5}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$9,5 \times 10^{-6}$
μ_w , kg/(m s)	0,0275	0,001	0,0275	0,001	0,055	0,001
μ_o , kg/(m s)	0,275	0,01	0,275	0,01	0,55	0,01
μ_R	10	10	10	10	10	10

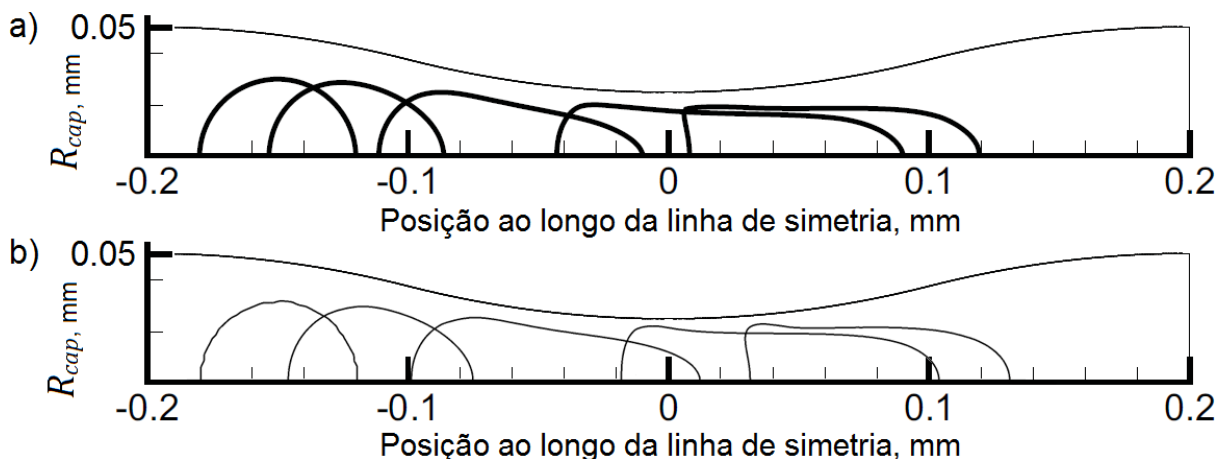
O tempo de simulação do problema de validação foi de 1 hora e 23 minutos com cerca de 36.000 iterações para a solução dos 2.100 passos de tempo. A malha utilizada por Roca Reyes (2011) e pelo presente trabalho pode ser visualizada na Figura 50, ambas com 10.368 elementos (36 divisões horizontais e 288 divisões verticais no domínio)

Figura 50 - Malha utilizada por Roca Reyes (2011) e sua reprodução na presente validação.



Na Figura 51a é possível observar a evolução da gota a medida que escoo pela garganta, para vários passos de tempo ($N_{\Delta t}$), obtida por Roca Reyes (2011) e na Figura 51b a evolução da gota obtida neste trabalho. Qualitativamente observa-se em ambos os casos a gota escoo pela garganta sofrendo esticamento e a curvatura posterior sofre uma alteração significativa.

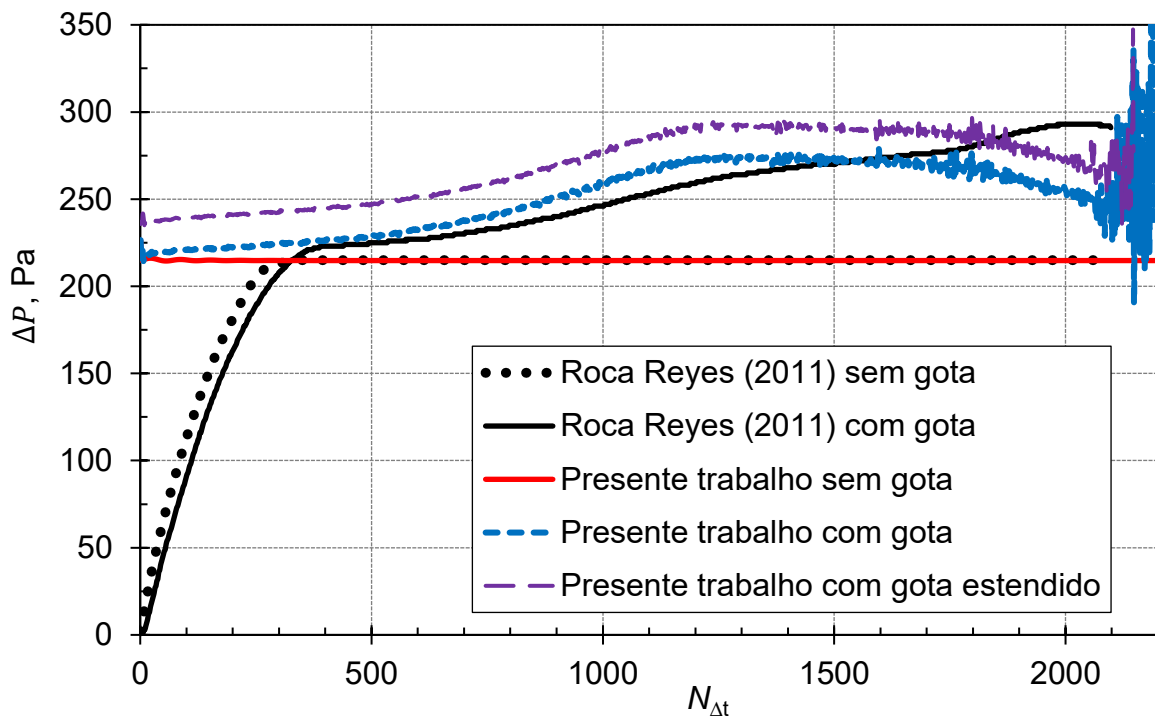
Figura 51 - Deslocamento da gota nos instantes $t = 10\Delta t$, $t = 600\Delta t$, $t = 1200\Delta t$, $t = 1800\Delta t$ e $t = 2100\Delta t$ com $\Delta t = 3 \times 10^{-5}$ s, $D_{garg} = 0,5$ e $D_{gota} = 0,6$, a) obtido por Roca Reyes (2011), b) obtido neste trabalho para as condições descritas por Roca Reyes (2011).



A Figura 52 mostra as quedas de pressões totais entre os planos de entrada e saída do capilar, provocadas sem a gota e com a presença da gota, respectivamente, para o caso de Roca Reyes (2011) e neste trabalho com as condições descritas por

Roca. Fica evidente que a presença da gota ocasiona um aumento de pressão no escoamento, apresentando um acréscimo da variação de pressão no momento em que se encontra na garganta e uma posterior queda de pressão depois da sua passagem. Em geral, o comportamento encontrado é concordante com as curvas de pressão obtidas por Roca Reyes (2011).

Figura 52 - Variação da pressão para um capilar com garganta com e sem gota obtido por Roca Reyes (2011) e neste trabalho com as condições descritas por Roca Reyes (2011).



Fonte: ROCA REYES (2011) (Adaptado).

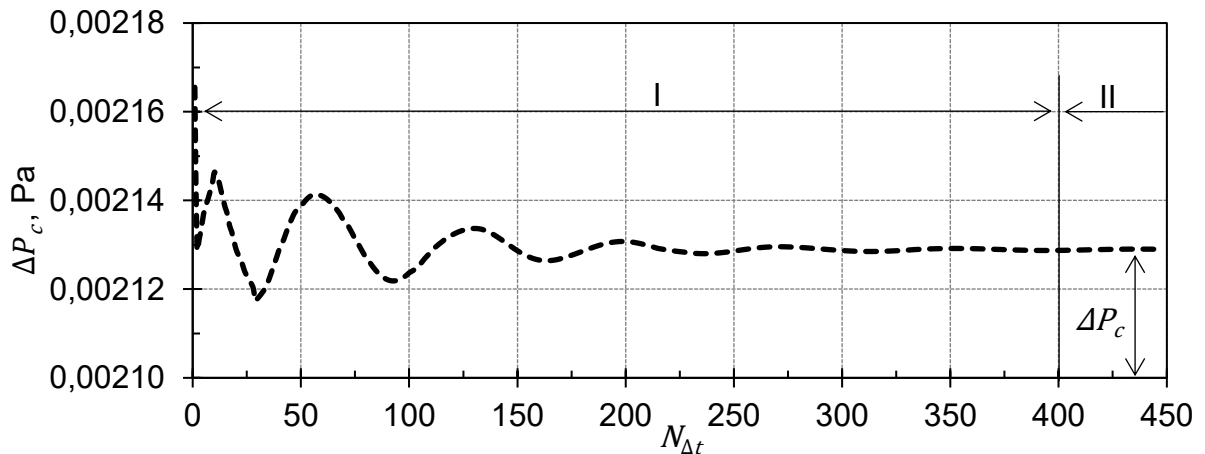
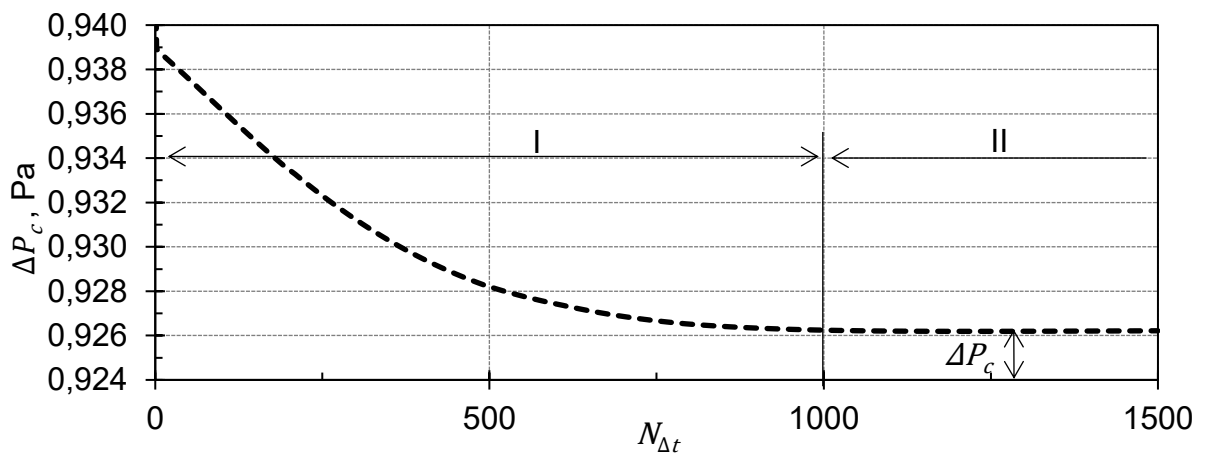
Segundo Roca Reyes (2011), após essa queda de pressão, o método numérico utilizado não conseguiu mais solucionar o problema, talvez devido ao aumento da difusão numérica do campo escalar que afetou o cálculo da curvatura da gota. O Fluent®, ao contrário de Roca, capturou oscilações na variação de pressão após a passagem da gota na garganta.

Para verificar se a geometria do capilar estava provocando essas oscilações, a mesma teve seu comprimento aumentado 0,2 mm após a garganta. Analisando as curvas de pressão obtidas com gota para a geometria normal e a estendida no presente trabalho, mostradas na Figura 52, observa-se que para ambos casos as oscilações estão presentes. Possivelmente essas oscilações são provocadas pela deformação da interface da gota.

Após esta etapa de validação do procedimento adotado neste trabalho, em que a comparação com os resultados de Roca Reyes (2011) mostra a coerência da abordagem proposta, procede-se a efetuar simulações para os escoamentos monofásico e bifásico, para o capilar reto e com garganta.

6.2 ESCOAMENTO MONOFÁSICO

Para realizar a análise qualitativa do fator de bloqueio, o primeiro passo foi calcular o diferencial de pressão da fase contínua (ΔP_c) sem a presença da gota de óleo. O caso 1 corresponde ao capilar reto e o caso 11 para o capilar com garganta, como pode ser visto na Tabela 3 da página 73, ambos sem a presença da gota no escoamento. Os diferenciais são tratados em valores positivos. As Figuras 53 e 54 mostram a variação de pressão, entre o final e a entrada do capilar, em função do número de passos de tempo $N_{\Delta t}$, para os casos 1 e 11 respectivamente. É observado que existe uma zona de oscilação para o caso 1 e de decaimento para o caso 11, zonas identificadas por I, até atingir a estabilização de ΔP_c , zona identificada por II. Este comportamento é devido a convergência dos métodos numéricos até a obtenção da solução do problema e pela transição entre o período transiente para o permanente. A estabilização para o caso 1 se inicia para o passo de tempo $N_{\Delta t} = 400$ enquanto para o caso 11 ocorre no passo de tempo $N_{\Delta t} = 1000$. A presença da garganta origina um aumento de 435 vezes do diferencial de pressão necessário para viabilizar o escoamento monofásico (de 0,00213 Pa para 0,926 Pa).

Figura 53 - Variação da pressão no capilar reto (caso 1) para diversos passos de tempo ($D_{garg} = 1,0$).Figura 54 - Variação da pressão no capilar com garganta (caso 11) para diversos passos de tempo ($D_{garg} = 0,1$).

Nestes dois passos de tempo de estabilização, $N_{\Delta t} = 400$ para o capilar reto e $N_{\Delta t} = 1000$ para o capilar com garganta, é plotado na linha de simetria a variação axial da pressão relativa, as Figuras 55 e 56, e da velocidade, as Figuras 57 e 58. Como visto, a presença da garganta altera drasticamente o perfil de pressão e de velocidade do fluido originando três regiões bem definidas: (i) um trecho inicial, à montante da garganta com pouca diminuição da pressão mas que se mantem em níveis altos e com velocidade constante; (ii) um segundo trecho na região da garganta (ao redor de $z = 0,004$ m) onde a queda de pressão é acentuada, saindo de 0,926 Pa para 0 Pa, uma variação delta quase 435 vezes superior ao maior valor obtido no capilar reto, e a velocidade tem um pico com valor de aproximadamente 100 vezes superior em relação ao capilar reto, e (iii) um terceiro trecho após a garganta onde a pressão atinge o valor zero até o final do capilar atendendo a condição de contorno definida.

Figura 55 - Variação axial da pressão no capilar reto (caso 1) para $N_{\Delta t} = 400$.

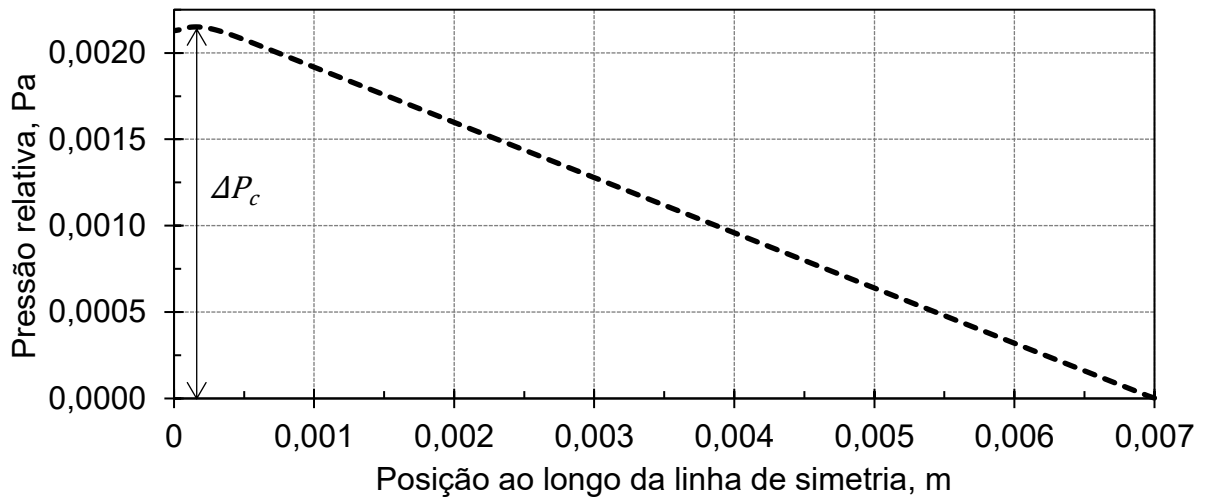


Figura 56 - Variação axial da pressão no capilar com garganta (caso 11) para $N_{\Delta t} = 1000$.

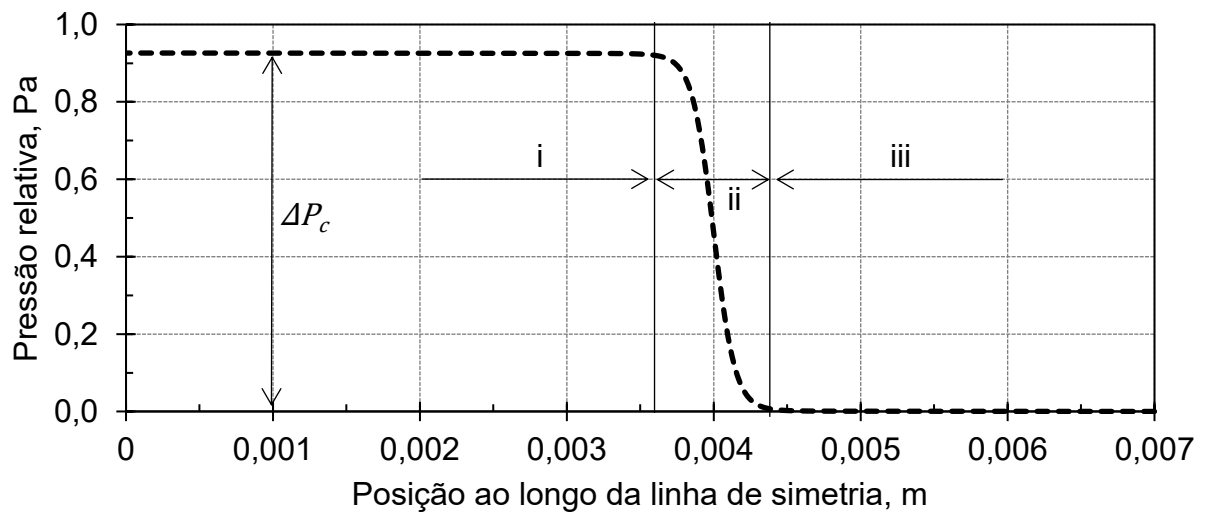


Figura 57 - Variação axial da velocidade no capilar reto (caso 1) para $N_{\Delta t} = 400$.

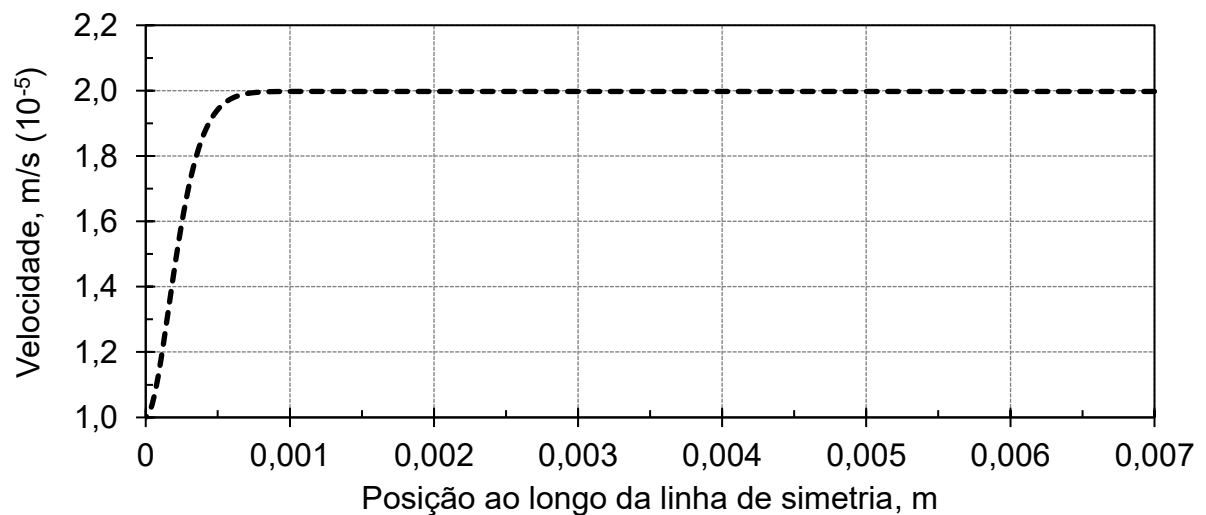
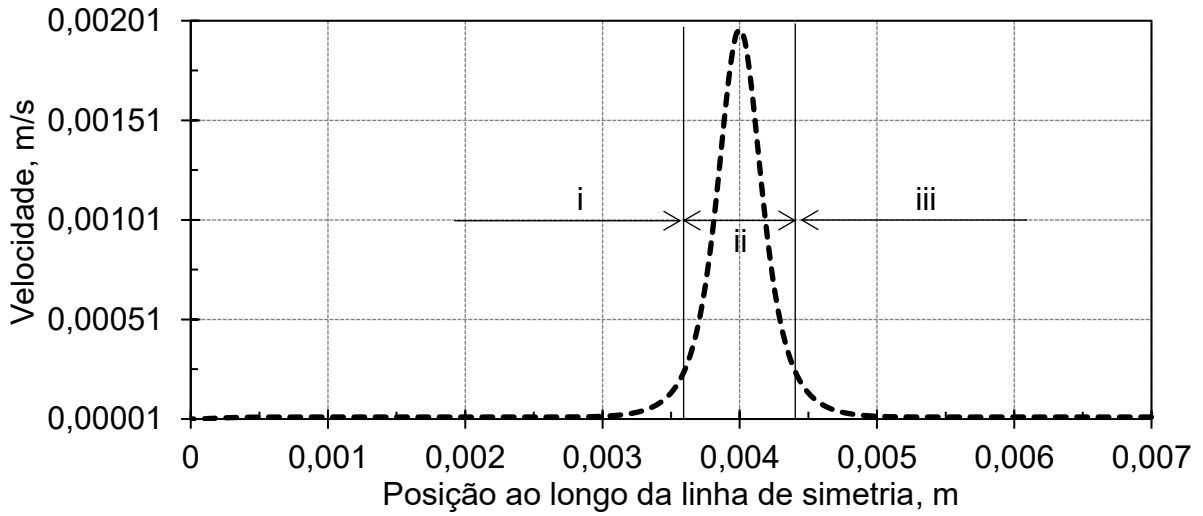


Figura 58 - Variação axial da velocidade no capilar com garganta (caso 11) para $N_{\Delta t} = 1000$.



As Figuras 59 e 60 mostram, respectivamente, a variação axial da pressão e da velocidade após a garganta (a partir de $z = 0,005$ m), para o capilar reto (caso 1 com $N_{\Delta t} = 400$) e com garganta (caso 11 com $N_{\Delta t} = 1000$). Pode-se observar que, aparentemente, somente a montante, o gradiente de pressão sofre influência da presença da garganta, e não a jusante (depois da garganta). No caso da velocidade, seu valor somente sofreu influência na parte correspondente a garganta ($0,003 \leq z \leq 0,005$ m). A mesma análise será realizada na próxima subseção para verificar a influência da gota de óleo no gradiente de pressão e velocidade a montante e a jusante da garganta.

Figura 59 - Variação axial da pressão após a garganta, comparação com o capilar reto.

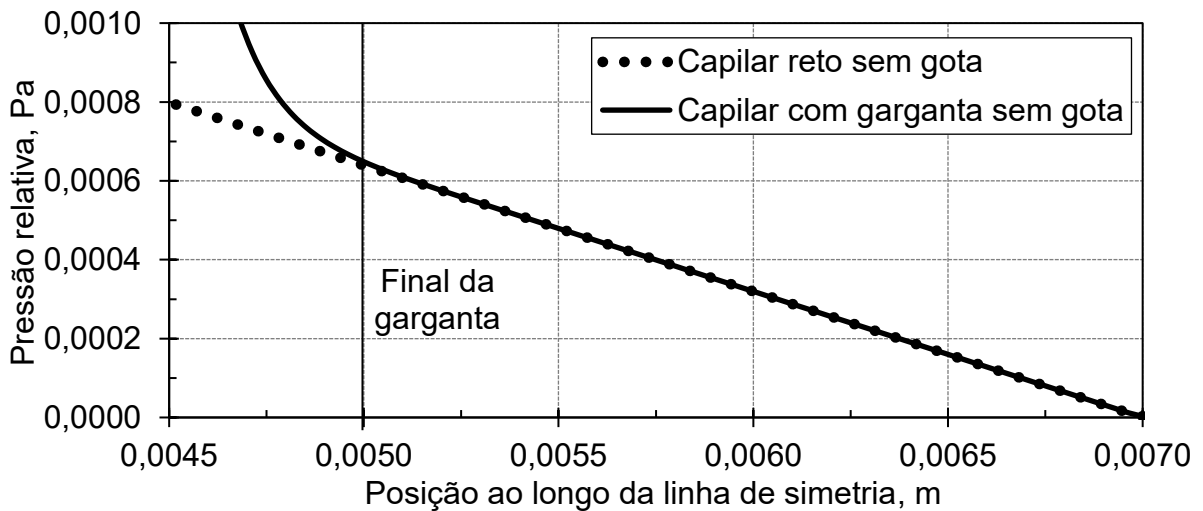
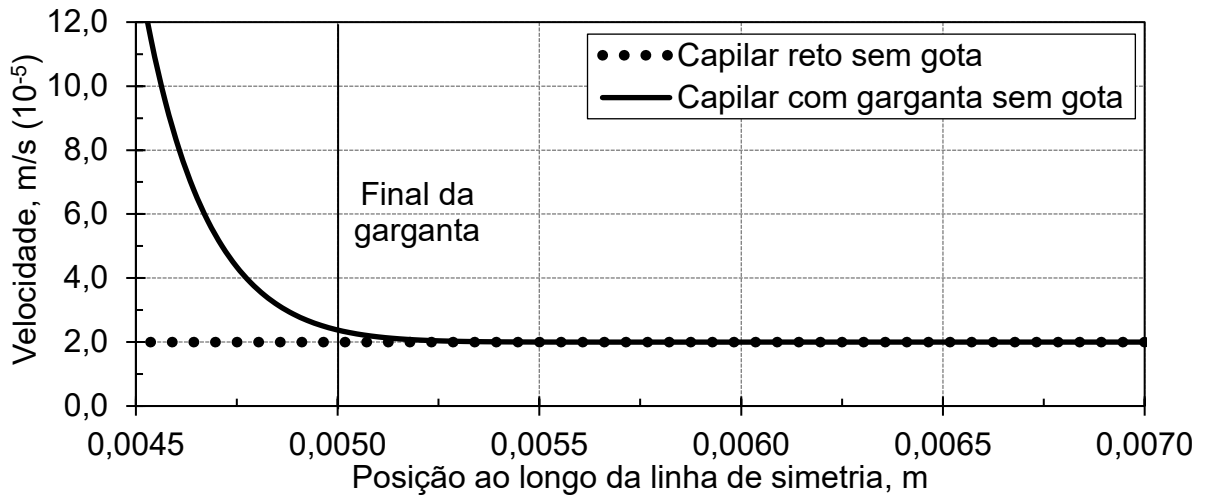


Figura 60 - Variação axial da velocidade após a garganta, comparação com o capilar reto.



As Figuras 61 e 62 representam o campo de pressão e os vetores velocidade do escoamento monofásico para o capilar reto (caso 1), e as Figuras 63 e 64 são correspondentes ao capilar com garganta (caso 11). Pode-se observar melhor, a partir das Figuras 63 e 64, a queda de pressão obtida na Figura 56 e o aumento de velocidade na região da garganta obtida na Figura 58. Destaca-se que os níveis de pressão para o capilar com garganta são bastante superiores em comparação ao capilar reto. Isto significa que as gargantas são elementos que dificultam de forma considerável o escoamento o que exige equipamentos de injeção em superfície de capacidades superiores. As Figuras 65 e 66 mostram os perfis de velocidade para algumas posições na linha de simetria para os capilares reto e com garganta, respectivamente.

Figura 61 - Campo de pressão para o caso 1 para $N_{\Delta t} = 400$ ($D_{garg} = 1,0$).

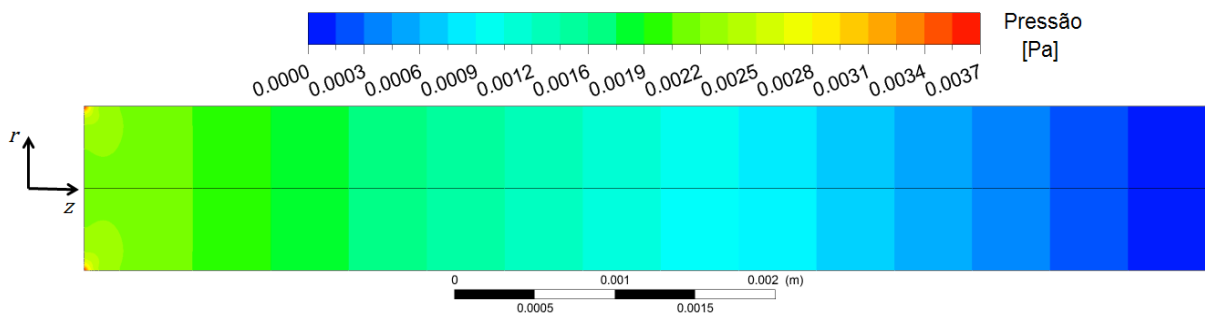


Figura 62 - Campo de vetores velocidade para o caso 1 para $N_{\Delta t} = 400$ ($D_{garg} = 1,0$).

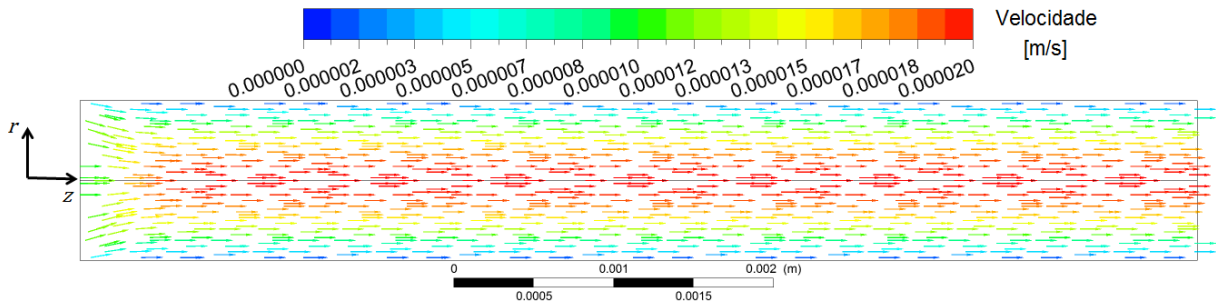


Figura 63 - Campo de pressão para o caso 11 para $N_{\Delta t} = 1000$ ($D_{garg} = 0,1$).

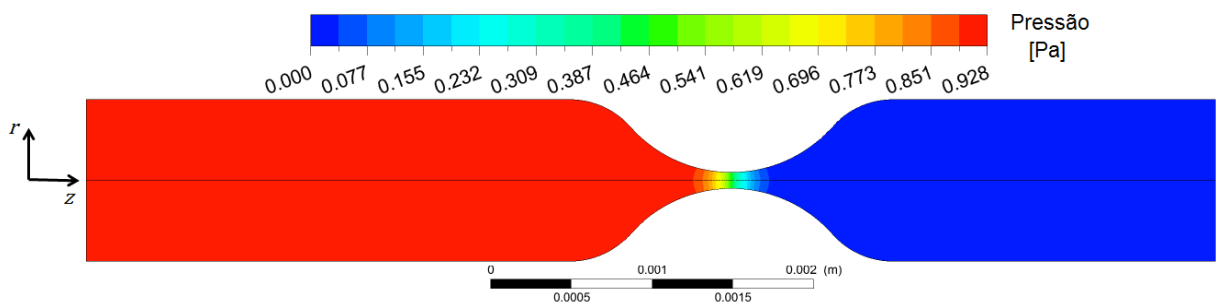


Figura 64 - Campo de vetores velocidade para o caso 11 para $N_{\Delta t} = 1000$ ($D_{garg} = 0,1$).

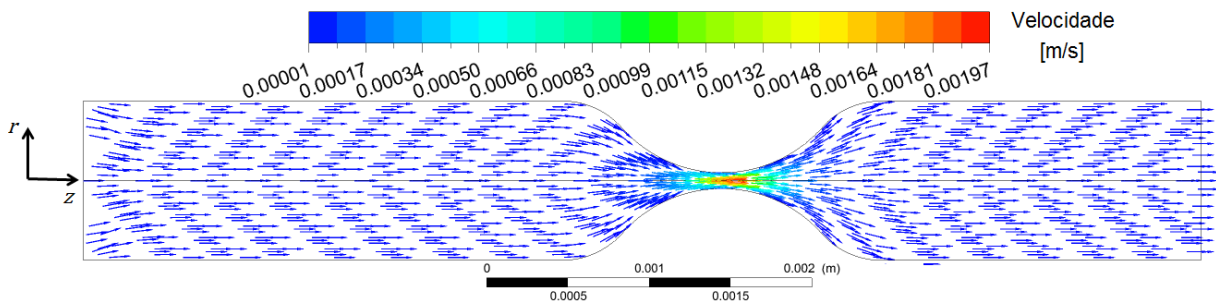


Figura 65 - Perfis de velocidade para o caso 1 na entrada do capilar (0 mm) e na posição 4 mm na linha de simetria, para $N_{\Delta t} = 400$ ($D_{garg} = 1,0$).

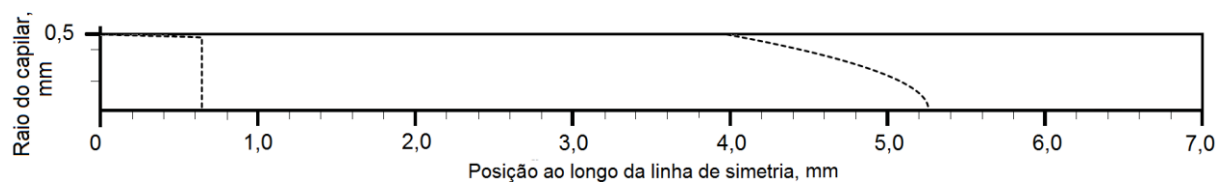
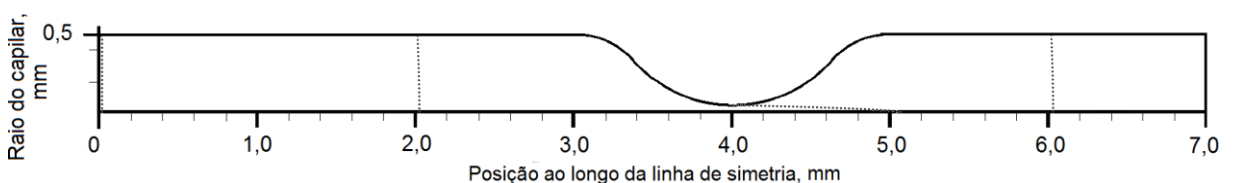


Figura 66 - Perfis de velocidade para o caso 11 na entrada do capilar (0 mm) e na posição 2, 4 e 6 mm na linha de simetria, para $N_{\Delta t} = 1000$ ($D_{garg} = 0,1$).



As Figuras 67 e 68 comparam a influência da geometria traduzido pelo parâmetro D_{garg} . É observado que, quanto menor a restrição ao fluxo maior é a variação de pressão e maior é a velocidade na garganta.

Figura 67 - Variação axial da pressão para diferentes valores de D_{garg} para $N_{\Delta t} = 1000$ (sem gota).

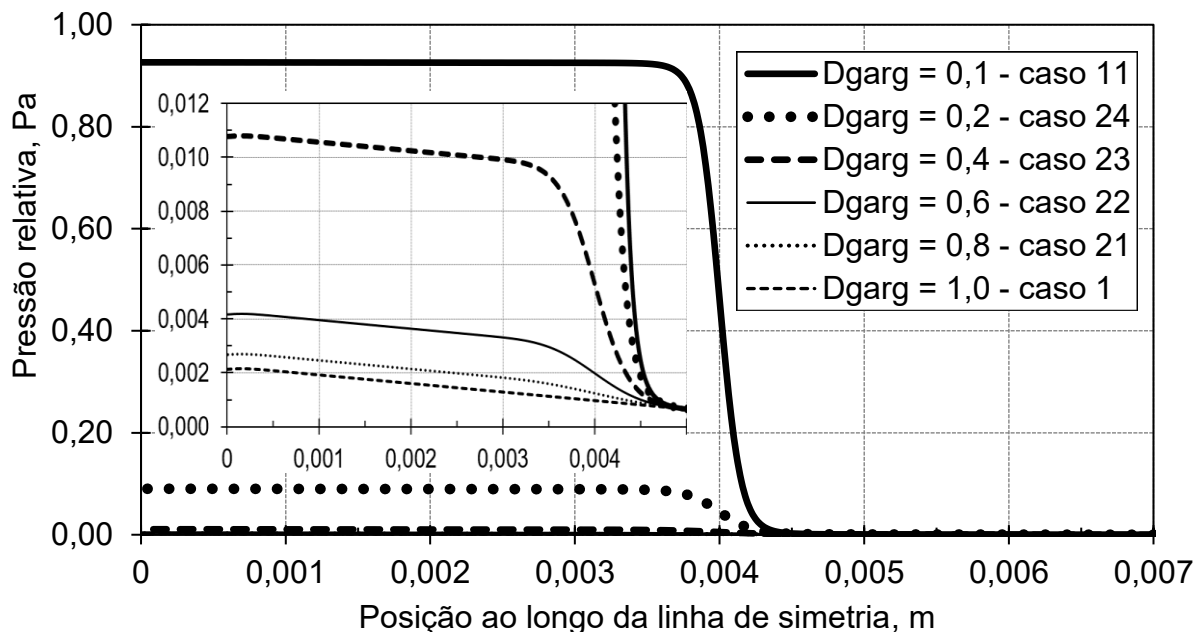
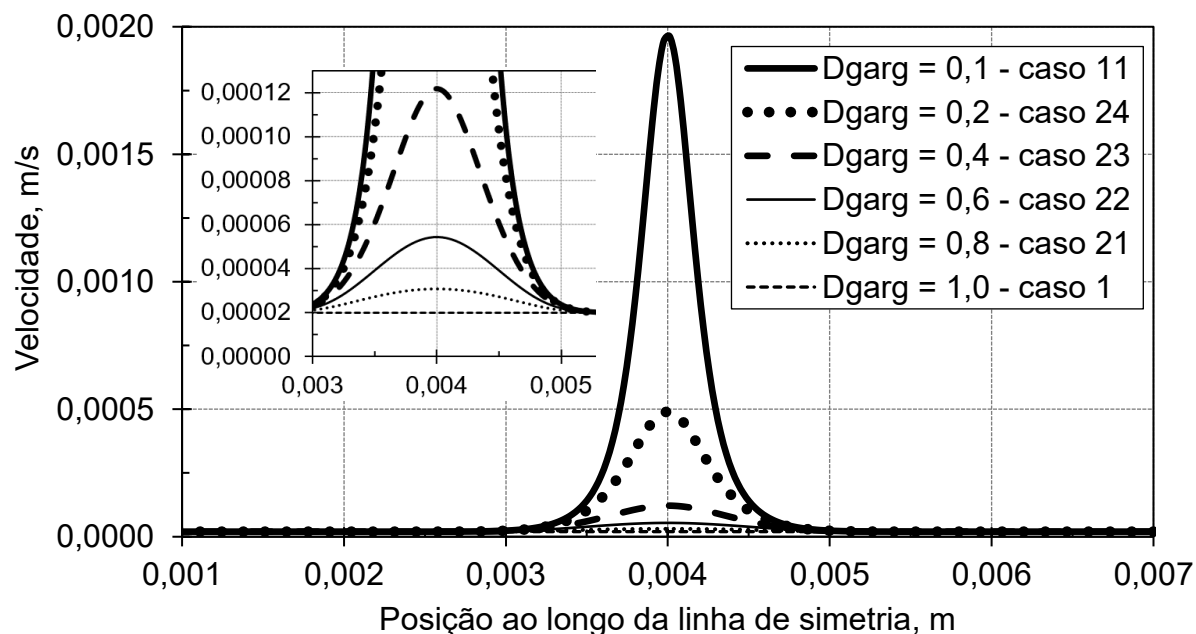


Figura 68 - Variação axial da velocidade para diferentes valores de D_{garg} para $N_{\Delta t} = 1000$ (sem gota).



A Tabela 7 apresenta os valores calculados dos gradientes de pressão (ΔP_c) e das velocidades do escoamento monofásico para diversos diâmetros de garganta (parâmetro D_{garg}), representado pelos casos 1, 11, 21, 22, 23 e 24 (casos monofásicos) da Tabela 3 (Tabela de casos simulados). Os gradientes de pressão serão usados para o cálculo do fator de bloqueio, $f = \Delta P_c / \Delta P_{gota_max}$, em que, recapitulando, ΔP_c é a diferença de pressão entre a saída e a entrada do capilar para a fase contínua e ΔP_{gota_max} é a diferença de pressão máxima obtida durante o escoamento da gota no capilar, para uma mesma vazão.

Tabela 7 - ΔP_c e velocidade calculadas para os casos 1, 11, 21, 22, 23, e 24 (casos monofásicos).

Casos	D_{garg}	ΔP_c , Pa	Velocidade, m/s
1	1,0	0,00213	0,00002
21	0,8	0,00266	0,0000307
22	0,6	0,00417	0,0000542
23	0,4	0,0108	0,000122
24	0,2	0,0901	0,000489
11	0,1	0,926	0,00196

Algumas investigações serão realizadas no próximo Tópico a fim de construir uma descrição completa de como o fator de bloqueio (f) varia com o tamanho da gota (traduzido pelo parâmetro adimensional D_{gota}), com a razão de viscosidades (μ_R), com o diâmetro da garganta (traduzido pelo parâmetro adimensional D_{garg}) e do número de capilaridade (C_a).

6.3 ESCOAMENTO DA GOTA DE ÓLEO EM ÁGUA

Para o capilar reto ($D_{garg} = 1$) foram utilizados três tamanhos de gota especificados pelo parâmetro D_{gota} (casos 2-10), que é a razão entre o diâmetro da gota (d_{gota}) e o diâmetro do capilar (D), com os valores 0,4, 0,6 e 0,8. A Figura 69 mostra a evolução pressão adimensional ($\Delta P_{gota} / \Delta P_c$) em função do número de passos de tempo ($N_{\Delta t}$) para o capilar reto para os casos 2, 5 e 8 com $C_a = 0,132$. Para o capilar reto a pressão adimensional pode ser definida como o número de vezes que a variação de pressão (ΔP_c) é aumentada, em relação ao escoamento monofásico, devido a presença da gota. Pode-se observar que a presença da gota de óleo não

gera grandes variações da pressão adimensional do escoamento resultando em fatores de bloqueio próximos do valor 1 a medida em que a razão de viscosidades decresce (valores disponíveis na Tabela 8). O mecanismo principal de redução do fator de bloqueio para o capilar reto é um mecanismo viscoso, onde o incremento de pressão produzido é devido a substituição da água (baixa viscosidade) pelo óleo (maior viscosidade). Neste tipo de mecanismo o fator de bloqueio não depende do número de capilaridade. Vale ressaltar que o gradiente da pressão adimensional visualizado a partir de $N_{\Delta t} = 500$ na Figura 69 representa a saída da gota do domínio computacional, em que o patamar $P = 1$ representa o escoamento monofásico (caso 1).

Figura 69 - Pressão adimensional em função de $N_{\Delta t}$ para os casos 2, 5 e 8 com $D_{garg} = 1$ e $C_a = 0,132$.

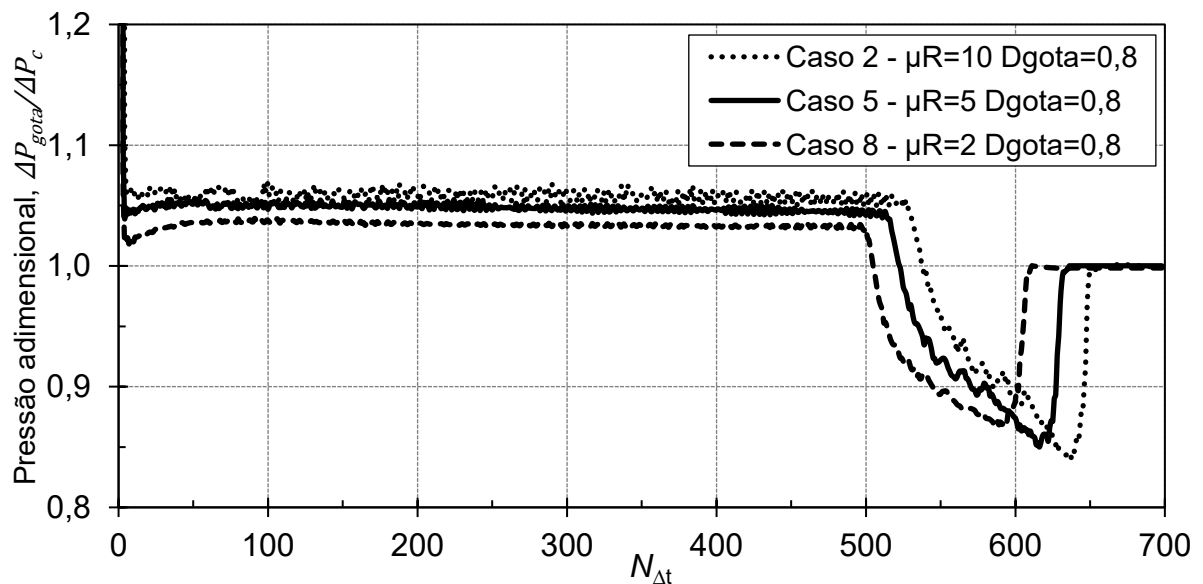


Tabela 8 - Cálculo do fator de bloqueio para o capilar reto com $D_{gota} = 0,8$ e $C_a = 0,132$.

Casos	μ_R	ΔP_c , Pa	ΔP_{gota_max} , Pa	f
2	10	0,00213	0,00228	0,934
5	5		0,00225	0,946
8	2		0,00221	0,964

A Figura 70 apresenta a variação axial da pressão ao longo da linha de simetria para o caso 1 e para o caso 2 para diversos passos de tempo ($N_{\Delta t} = 10, 100, 300$ e 500). A Figura 71 representa a posição da gota para dois passos de tempo, $N_{\Delta t} = 10$ e 300 , com seus respectivos campos de pressão. A presença da gota causa uma perturbação na curva de pressão e um aumento na pressão de entrada (ΔP_{gota_max})

em comparação ao escoamento monofásico (ΔP_c). Este aumento e queda de pressão pode ser explicada pela Equação (10) que é causada devido a tensão interfacial. O valor obtido de ΔP_{gota_max} é usado para o cálculo do fator de bloqueio (resultados apresentados na Tabela 8). Não foram simulados os casos com $D_{gota} = 0,6$ e $0,4$ pelo fato de, a partir dos resultados para $D_{gota} = 0,8$, as variações de pressões serem menores.

Figura 70 - Variação axial da pressão para o caso 1 (sem gota) e 2 (com gota), com $C_a = 0,132$.

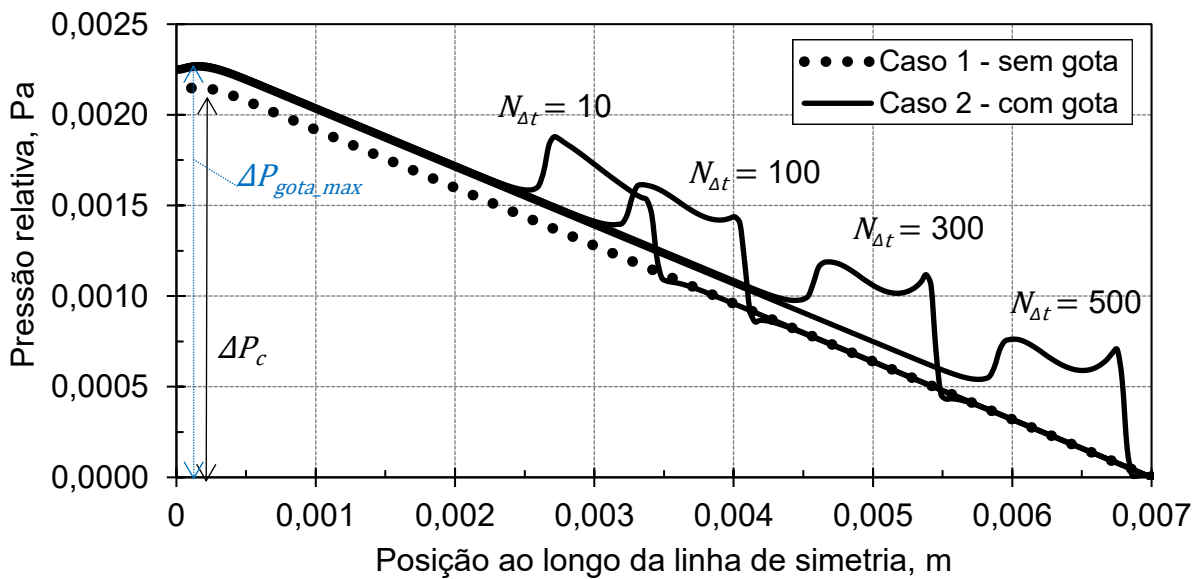
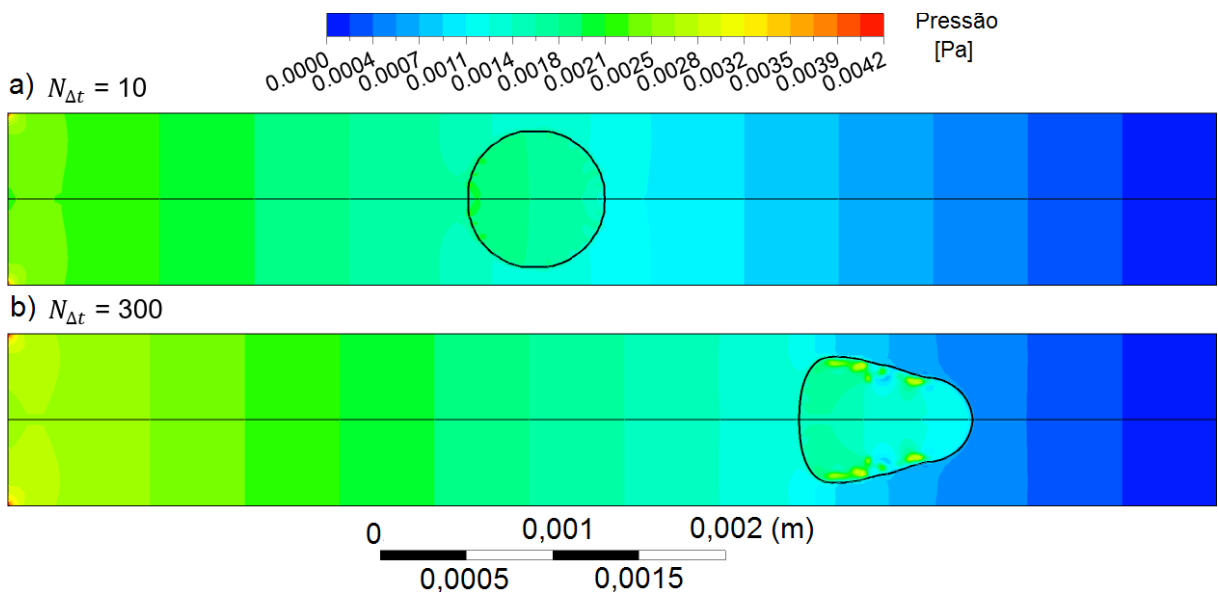


Figura 71 - Posição da gota para $N_{\Delta t} = 10$ e 300 e seus respectivos campos de pressão no capilar reto.



A Figura 72 apresenta a variação axial da velocidade ao longo da linha de simetria para os casos 1 e 2 em diversos passos de tempo ($N_{\Delta t} = 10, 100, 300$ e 500). A Figura 73 representa a posição da gota para os passos de tempo $N_{\Delta t} = 10$ e 300 com seus respectivos contornos de velocidade. Pode-se observar que a gota escoa a uma velocidade menor do que a fase contínua devido ao efeito da razão de viscosidades, experimentando uma redução de velocidade na parte traseira e um posterior aumento de velocidade na parte dianteira.

Figura 72 - Variação axial da velocidade para o caso 1 (sem gota) e 2 (com gota), com $C_a = 0,132$.

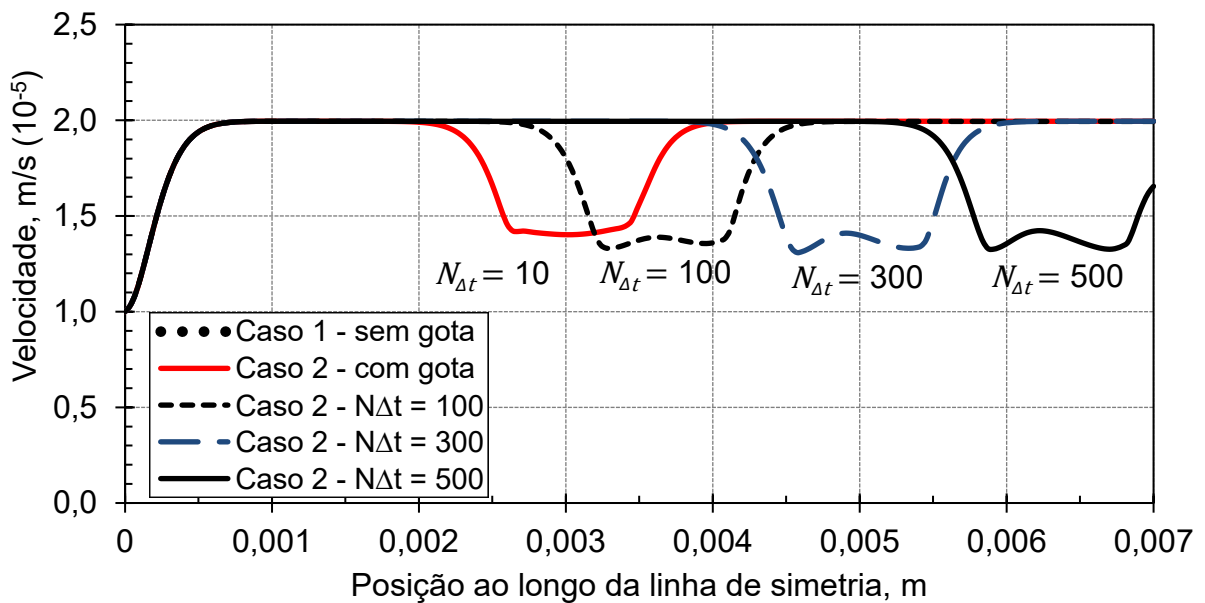
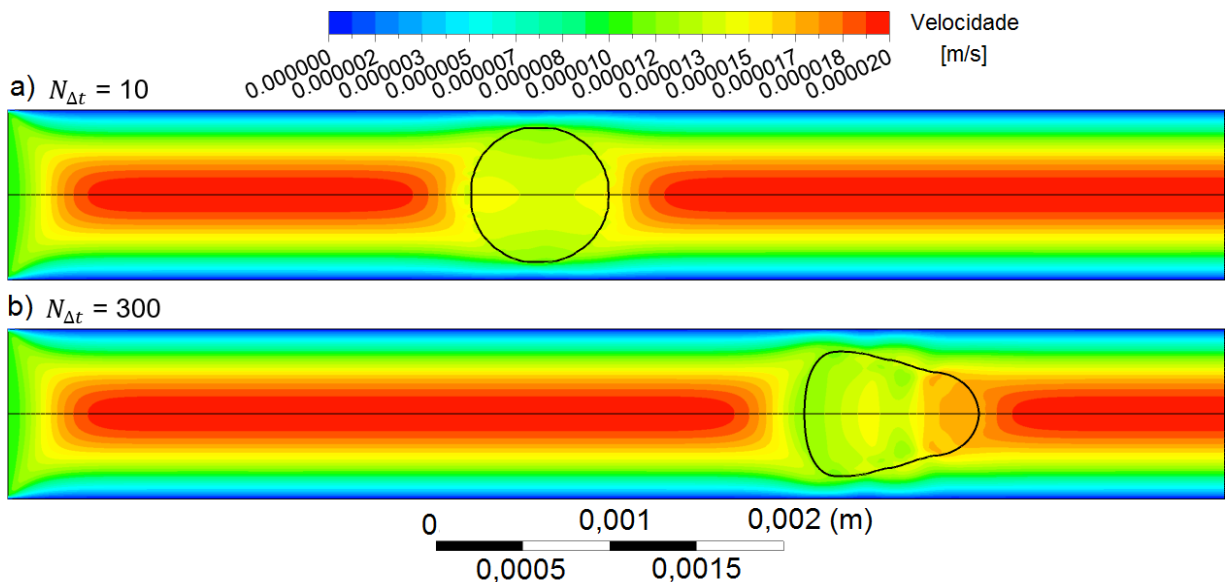
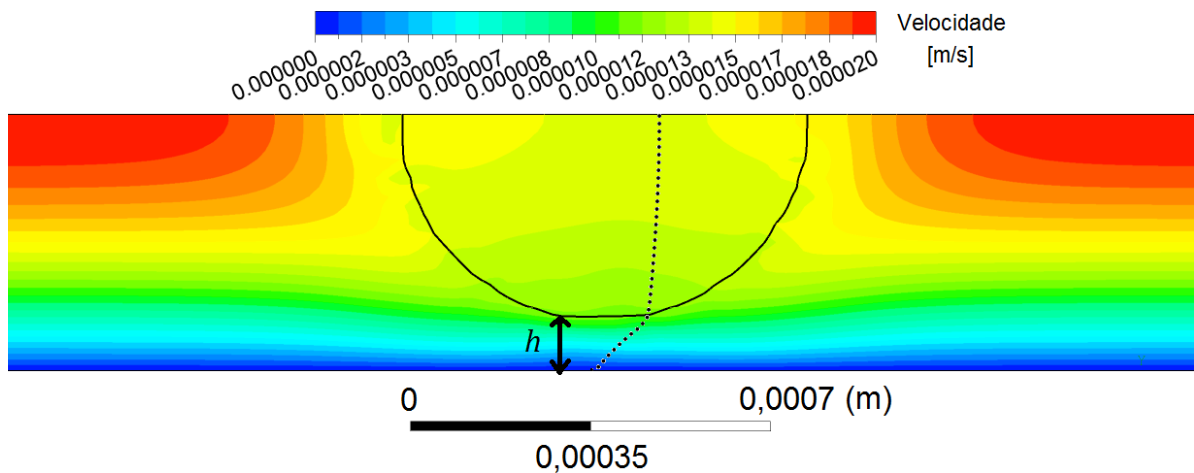


Figura 73 - Posição da gota para $N_{\Delta t} = 10$ e 300 e seus respectivos contornos de velocidade no capilar reto.



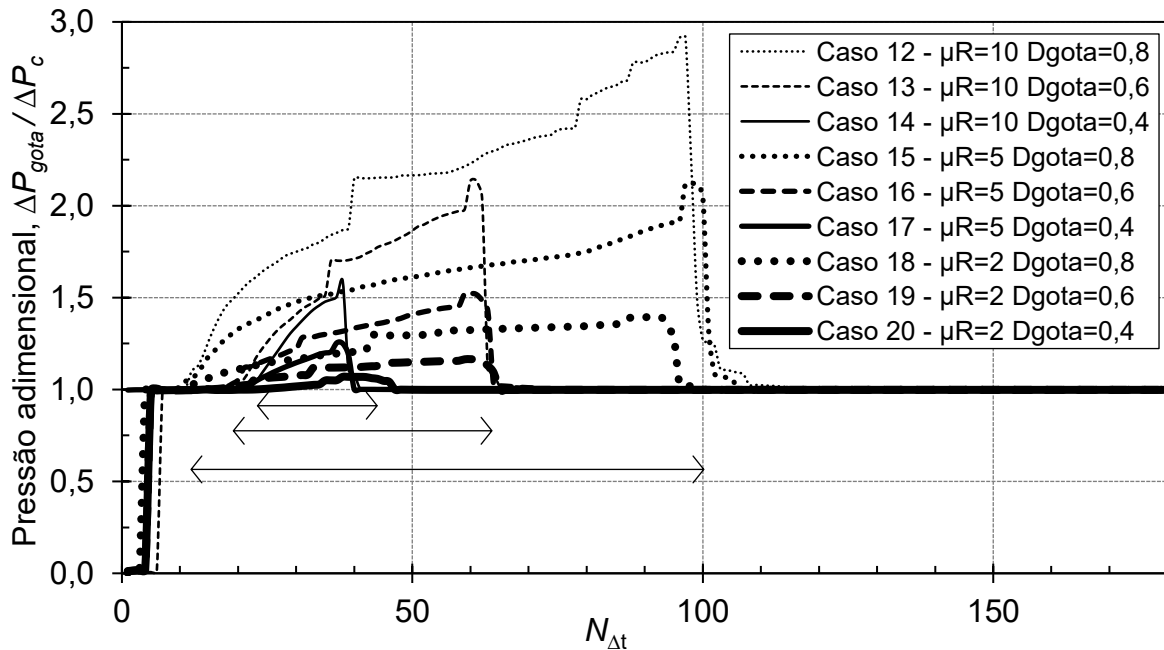
A Figura 74 mostra o perfil de velocidade com a gota na posição $z = 3 \text{ mm}$ ($N_{\Delta t} = 10$). Observa-se que o perfil de velocidade é alterado devido a presença da gota, diminuindo sua inclinação. Percebe-se também a presença da camada lubrificante de espessura $h = (D - d_{gota})/2$ entre a gota e a parede do capilar. Quanto maior é o diâmetro da gota menor será a espessura da camada, o que aumenta a resistência do fluxo da gota (fatores de bloqueio menores).

Figura 74 - Perfil de velocidade com a gota na posição $z = 3 \text{ mm}$ ($N_{\Delta t} = 10$).

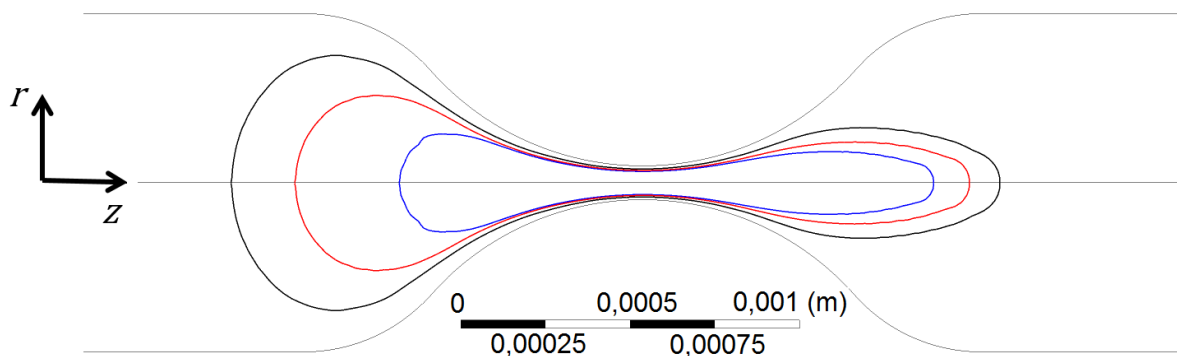


Para o capilar com garganta ($D_{garg} = 0,1$) foram utilizados três tamanhos de gota especificados pelo parâmetro adimensional D_{gota} , que é a razão entre o diâmetro da gota (d_{gota}) e o diâmetro do capilar (D), com os valores 0,4, 0,6 e 0,8. A Figura 75 mostra a evolução pressão adimensional ($\Delta P_{gota}/\Delta P_c$) em função do número de passos de tempo ($N_{\Delta t}$) para os casos 12 até 20. Para o capilar com garganta a pressão adimensional pode ser definida como o número de vezes que a variação de pressão (ΔP_c) é aumentada, em relação ao escoamento monofásico, devido a presença da garganta e da gota.

Comparando os casos na Figura 75, observa-se primeiramente que a curva da pressão adimensional apresenta maior inclinação quanto maior forem os valores dos parâmetros D_{gota} e μ_R . Por exemplo, quando a razão de diâmetros D_{gota} é 0,8 a queda de pressão é maior do que no caso 0,6, para uma mesma razão de viscosidades. A gota somente afeta os valores de pressão quando a mesma começa a escoar através da garganta provocando um pico de pressão antes da sua completa passagem.

Figura 75 - Pressão adimensional em função de $N_{\Delta t}$ para diversos casos com $D_{garg} = 0,1$ e $C_a = 0,132$.

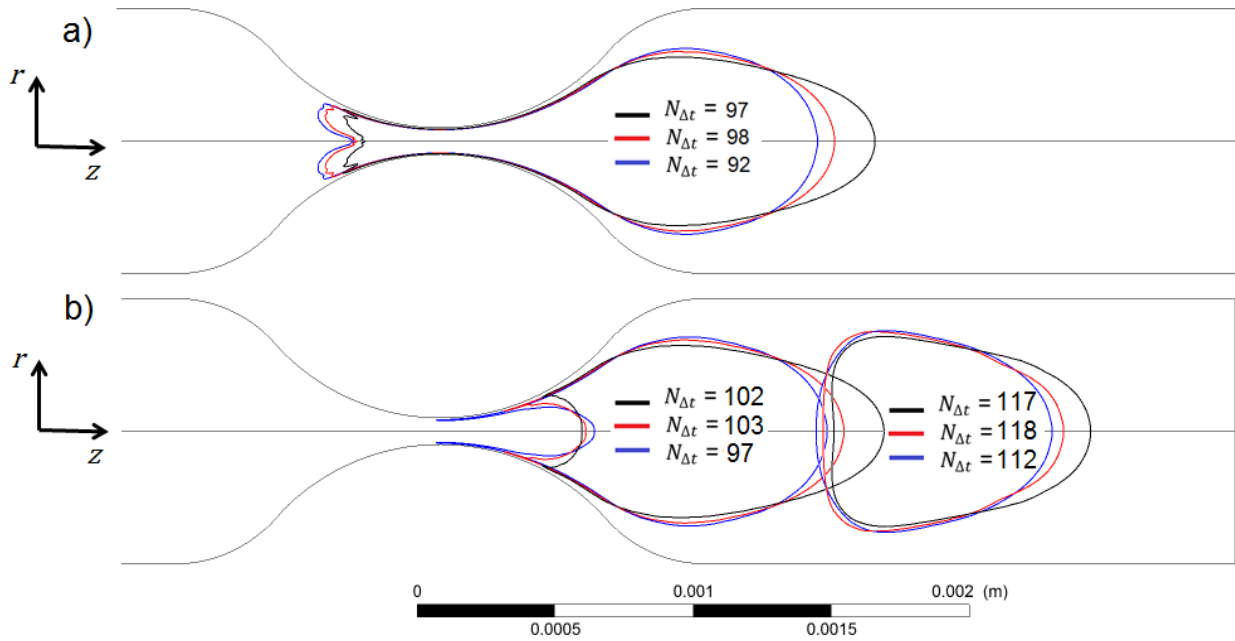
A Figura 76 mostra o grau de deformação da gota em função de D_{gota} para os casos 12 (linha preta), 13 (linha vermelha) e 14 (linha azul) para $N_{\Delta t} = 30$ com $\mu_R = 10$ e $C_a = 0,132$. O grau de deformação da gota também pode ser observado pela Figura 75, em que quanto maior o parâmetro D_{gota} maior é o número de passos de tempo ($N_{\Delta t}$) que a gota gasta para atravessar a garganta afetando diretamente curva da variação da pressão. O número de passos de tempo (variação no eixo x do gráfico) é mostrado pelos segmentos de reta na Figura 75.

Figura 76 - Deformação da gota para os casos 12 (cor preta), 13 (cor vermelha) e 14 (cor azul) para $N_{\Delta t} = 30$ com $\mu_R = 10$ e $C_a = 0,132$.

A Figura 77a mostra a forma e a posição da interface da gota para o passo de tempo que se obteve o pico de pressão adimensional máximo, na Figura 75, para os

casos com $D_{gota} = 0,8$: caso 12 (linha preta), 15 (linha vermelha) e 18 (linha azul) com, respectivamente, os passos de tempo $N_{\Delta t} = 97, 98$ e 92 .

Figura 77 - Posição da interface da gota para os casos 12 (preto, $\mu_R = 10$), 15 (vermelho, $\mu_R = 5$) e 18 (azul, $\mu_R = 2$) com $C_a = 0,132$ e $D_{gota} = 0,8$.



A presença da garganta acarreta em uma deformação acentuada na interface da gota principalmente em sua parte posterior. A medida que a gota de óleo atravessa a garganta, o fluxo da injeção de água é restringido, ocasionando em um aumento da pressão na entrada do capilar. Esse aumento de pressão empurra a gota através da garganta provocando a deformação na sua parte posterior em maior grau para razões de viscosidades menores. A Figura 77b também mostra essa deformação para os passos de tempo $N_{\Delta t} = 102, 103$ e 97 . Após a passagem da gota, as forças interfaciais agem de maneira a evitar a sua ruptura, permitindo a manutenção da interface, como pode ser visto na Figura 77b para os passos de tempo $N_{\Delta t} = 117, 118$ e 112 .

A queda de pressão produzida pela passagem da gota de óleo através da garganta do capilar é considerada como uma queda de pressão adicional à queda de pressão produzida em relação ao escoamento da fase contínua. A gota ao se aproximar da garganta exige um incremento da pressão na entrada para manter a velocidade de alimentação constante, como pode ser visto na Figura 78 para os mesmos passos de tempo da Figura 77a, e que, em alguns casos práticos valores elevados de pressão são inalcançáveis inviabilizando a operação de injeção de fluidos

no reservatório. Esses picos de pressão, apresentados na Figura 78, é o parâmetro ΔP_{gota_max} utilizado para o cálculo do fator de bloqueio, em que seus valores estão apresentados na Tabela 9. Analisando a Figura 78 observe-se que o aumento de pressão é diretamente influenciado pela razão de viscosidades, em que altas razões provocam maiores aumentos de pressão para um mesmo D_{gota} .

Figura 78 - Efeito da viscosidade da gota de óleo na variação axial da pressão. Casos 12, 15 e 18 com $C_a = 0,132$.

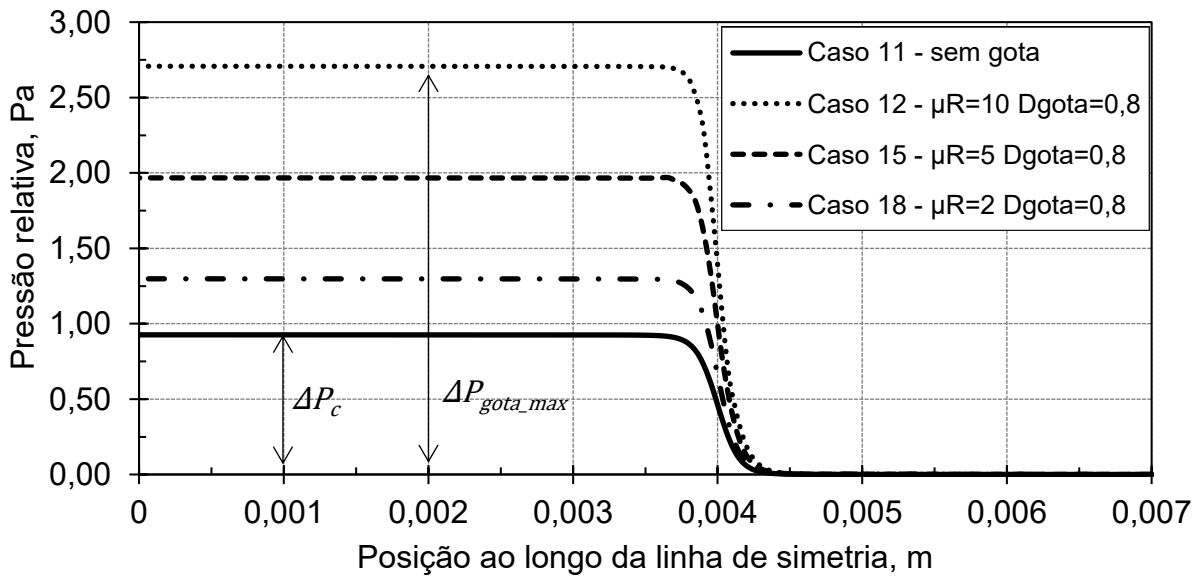
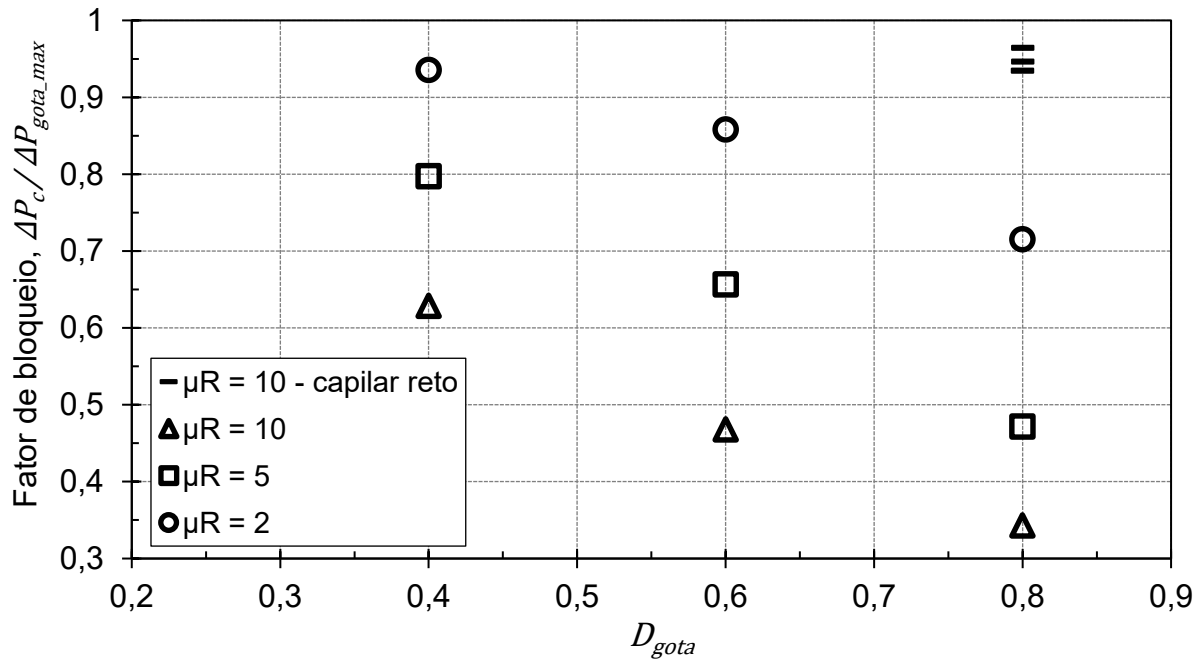


Tabela 9 - Cálculo do fator de bloqueio para o capilar com garganta com $C_a = 0,132$ (casos 12-20).

Casos	μ_R	D_{gota}	$\Delta P_c, Pa$	$\Delta P_{gota_max}, Pa$	f
12	10	0,8	0,926	2,707	0,343
13	10	0,6		1,998	0,468
14	10	0,4		1,476	0,628
15	5	0,8		1,967	0,472
16	5	0,6		1,413	0,657
17	5	0,4		1,164	0,797
18	2	0,8		1,298	0,715
19	2	0,6		1,081	0,858
20	2	0,4	0,992	0,935	

A Figura 79 mostra, para diferentes razões de viscosidades (μ_R) em função de D_{gota} , os fatores de bloqueio calculados na Tabela 8 e na Tabela 9. Pode-se observar que os valores do fator são pequenos quando a razão de viscosidades é alta e o tamanho da gota maior.

Figura 79 - Fator de bloqueio em função do tamanho de gota para o capilar com garganta com $C_a = 0,132$.

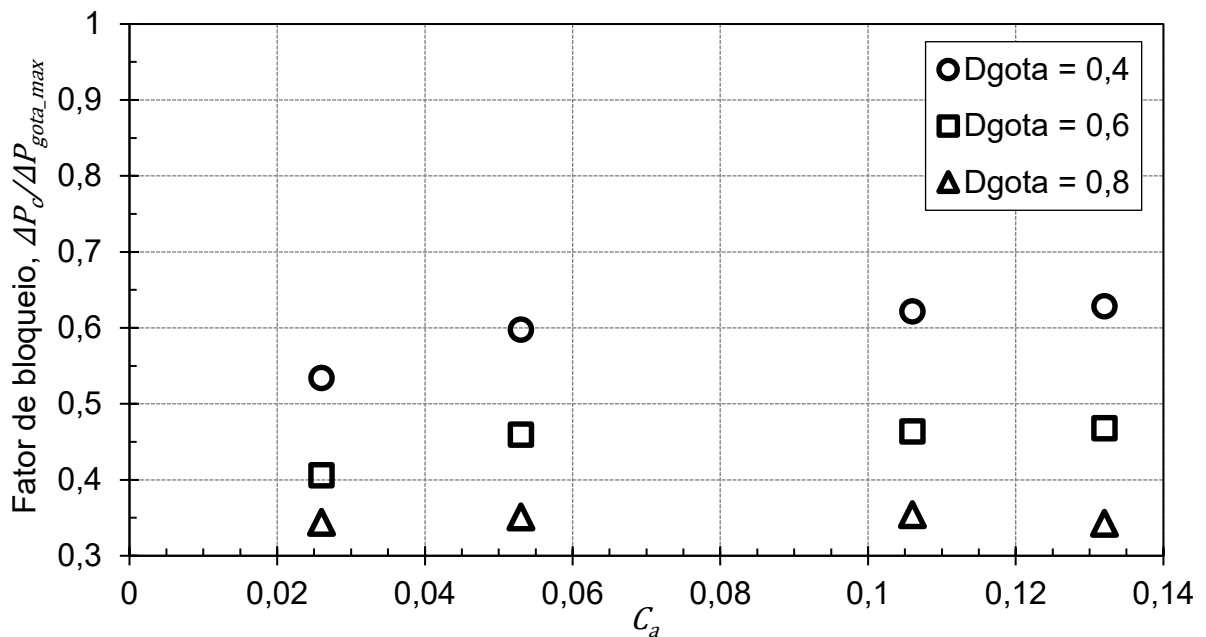


Em geral esses valores são bem menores do que no caso do capilar reto ($f \approx 1$), mostrando a grande influência da garganta no bloqueio da gota. Valores do fator de bloqueio próximos a 1 indicam que a presença da gota de óleo no escoamento não leva a incrementos consideráveis da queda de pressão. Já valores menores do que 1 indicam que a presença da gota leva a um aumento da queda de pressão do escoamento. O principal mecanismo de redução do fator de bloqueio atuante para o capilar com garganta, valores menores que 1, é o mecanismo de bloqueio capilar, em que o incremento da queda de pressão no escoamento bifásico é gerado pela elevada curvatura (deformação) da gota de óleo na sua passagem através da garganta do capilar.

A Figura 80 mostra, para diferentes razões D_{gota} em função do número de capilaridade C_a , o fator de bloqueio calculado na Tabela 10. Pode-se perceber que o fator de bloqueio diminui à medida que o número de capilaridade C_a cai e o tamanho de gota aumenta. Isto deve-se à maior variação da pressão capilar a medida que interface se deforma para passar pela garganta. O presente trabalho utilizou uma geometria com garganta mais acentuada em relação ao trabalho de Roca Reyes (2011), apesar disso, os resultados obtidos para o fator de bloqueio mostraram tendência similar.

Tabela 10 - Cálculo do fator de bloqueio para o capilar com garganta com $\mu_R = 10$.

Caso	C_a	D_{gota}	ΔP_c , Pa	ΔP_{gota_max} , Pa	f
12	0,132	0,8	0,926	2,707	0,343
13	0,132	0,6		1,998	0,468
14	0,132	0,4		1,476	0,628
25	0,106	0,8		2,622	0,354
26	0,106	0,6		2,001	0,464
27	0,106	0,4		1,493	0,622
28	0,053	0,8		2,641	0,351
29	0,053	0,6		2,019	0,459
30	0,053	0,4		1,553	0,598
31	0,026	0,8		2,699	0,344
32	0,026	0,6		2,285	0,406
33	0,026	0,4		1,738	0,534

Figura 80 - Fator de bloqueio em função do número de capilaridade para diferentes valores de D_{gota} para $\mu_R = 10$.

Como já apresentado no início deste trabalho, o aumento do número de capilaridade C_a resulta em diminuição da saturação de óleo residual devido ao menor gradiente de pressão requerido para transportar uma gota através de uma restrição. Este aumento do C_a pode ser obtido pela diminuição da tensão interfacial (σ) promovido pela injeção de surfactantes ou emulsões, por exemplo.

A Figura 81 mostra a influência da razão de viscosidades na posição da interface da gota para diversos instantes de tempo para os casos 12 (linha preta), 15 (linha vermelha) e 18 (linha azul). Já a Figura 82 mostra a influência do número de

capilaridade na posição da interface da gota para diversos instantes de tempo para os casos 12 (linha preta), 25 (linha vermelha), 28 (linha azul) e 31 (linha verde). Para ambas Figuras 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 pela garganta.

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, como pode ser visto na Figura 83 para $C_a = 0,01$. 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.

Figura 81 - Influência da razão de viscosidades na forma e posição da gota para os casos 12 ($\mu_R = 10$, linha preta), 15 ($\mu_R = 5$, linha vermelha) e 18 ($\mu_R = 2$, linha azul) para $D_{gota} = 0,8$ e $C_a = 0,132$.

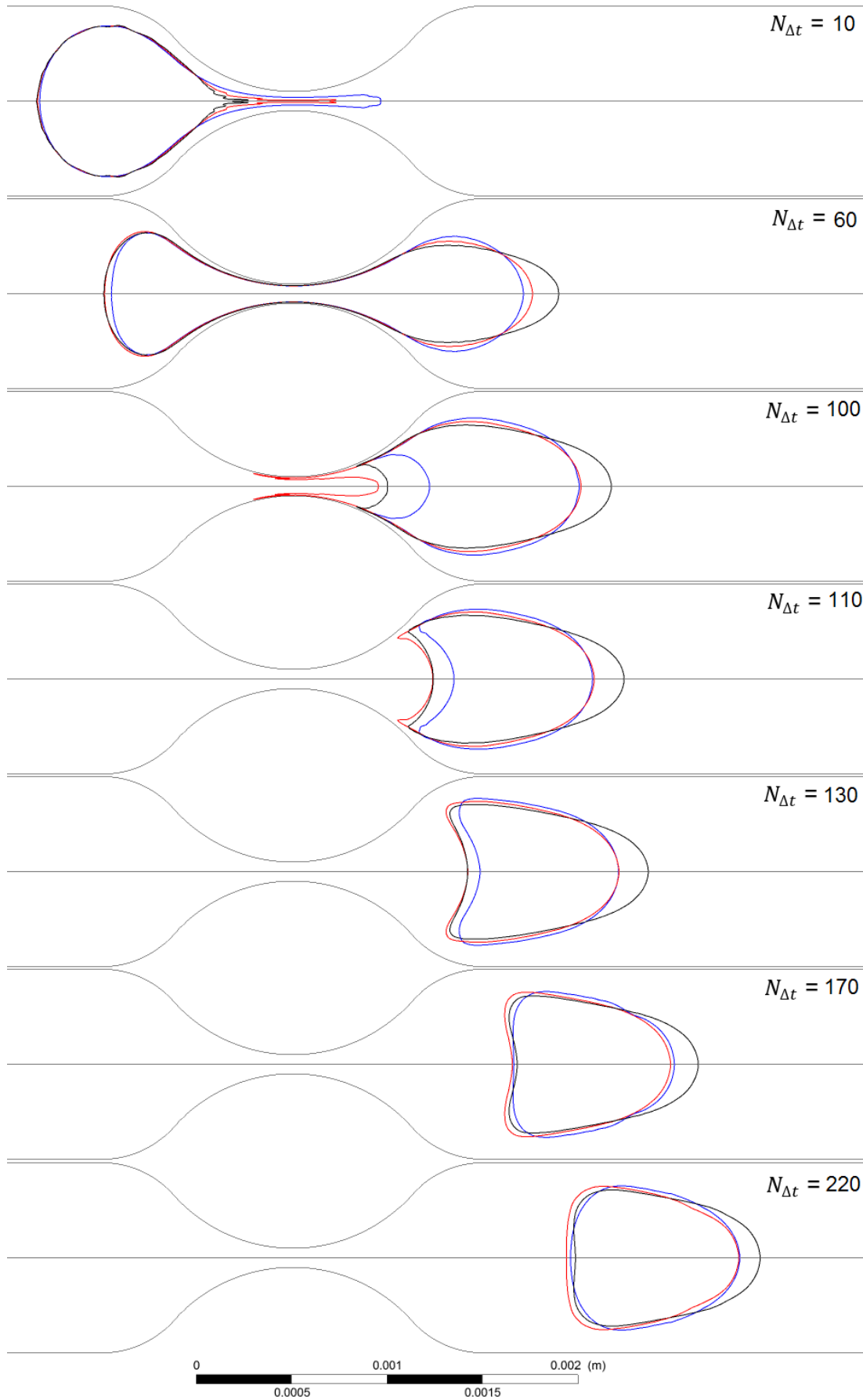


Figura 82 - Influência do número de capilaridade na forma e posição da interface da gota para os casos 12 ($C_a = 0,132$, linha preta), 25 ($C_a = 0,106$, linha vermelha), 28 ($C_a = 0,053$, linha azul) e 31 ($C_a = 0,026$, linha verde) para $D_{gota} = 0,8$ e $\mu_R = 10$.

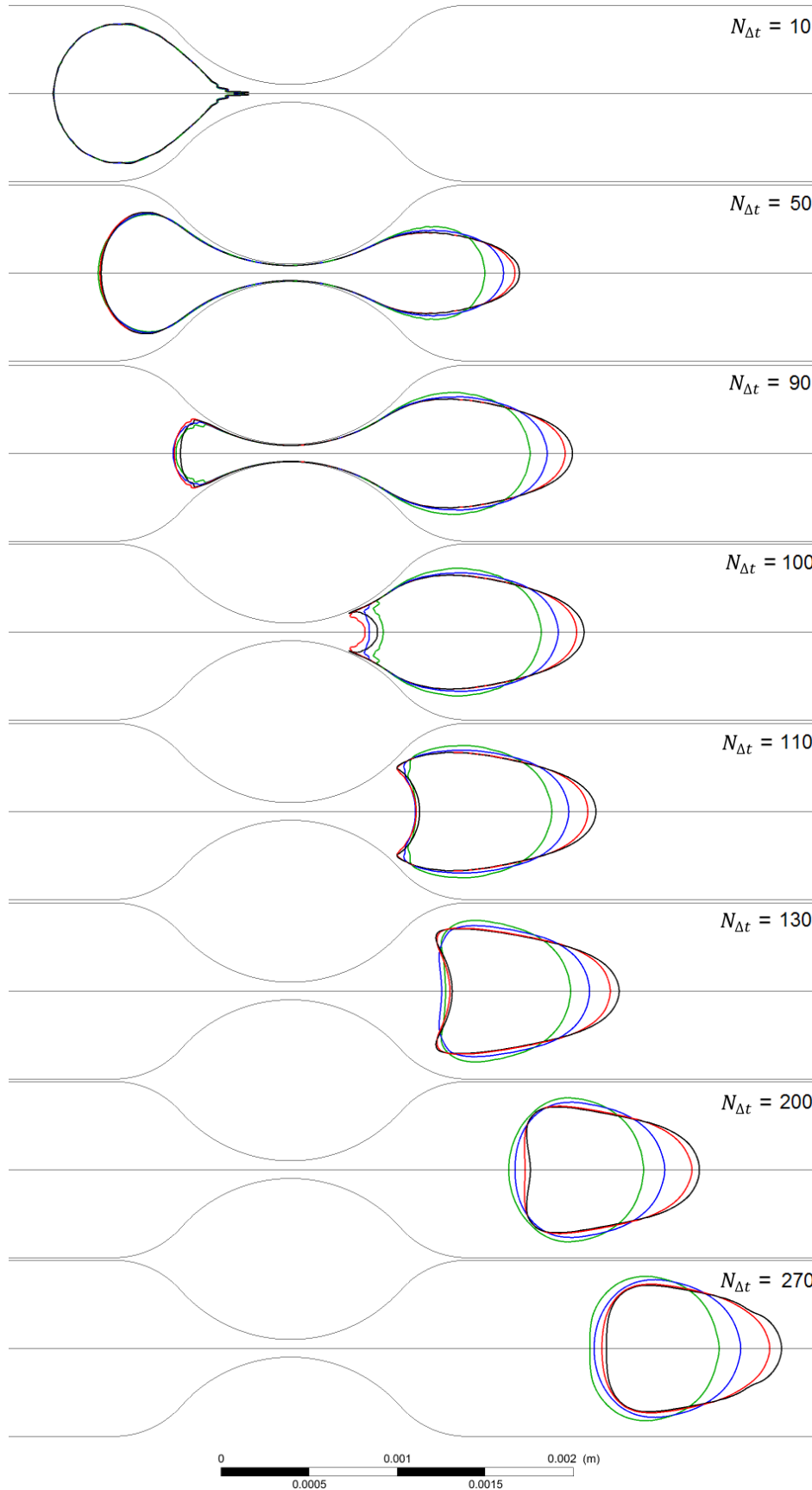
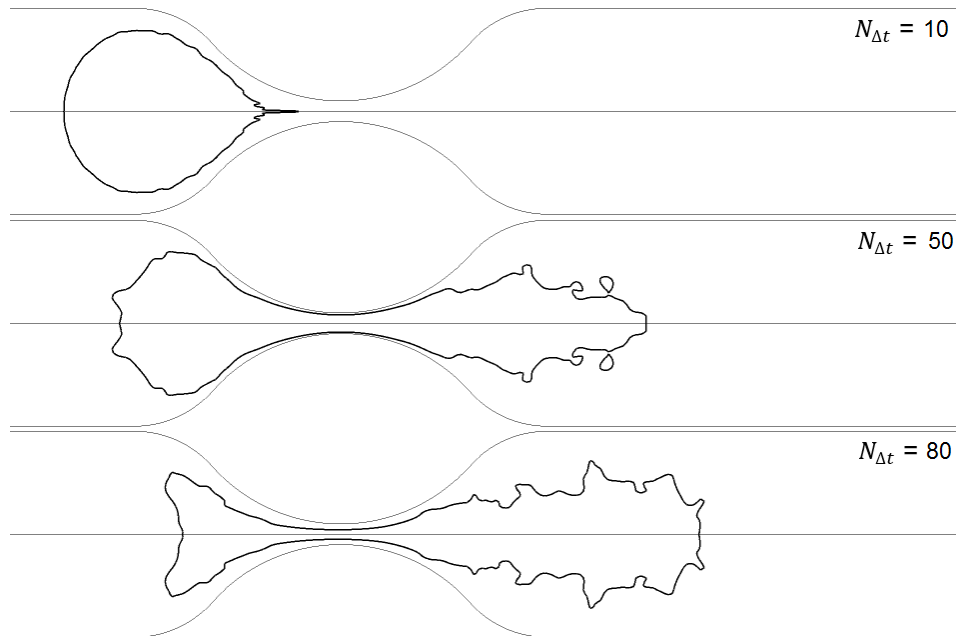
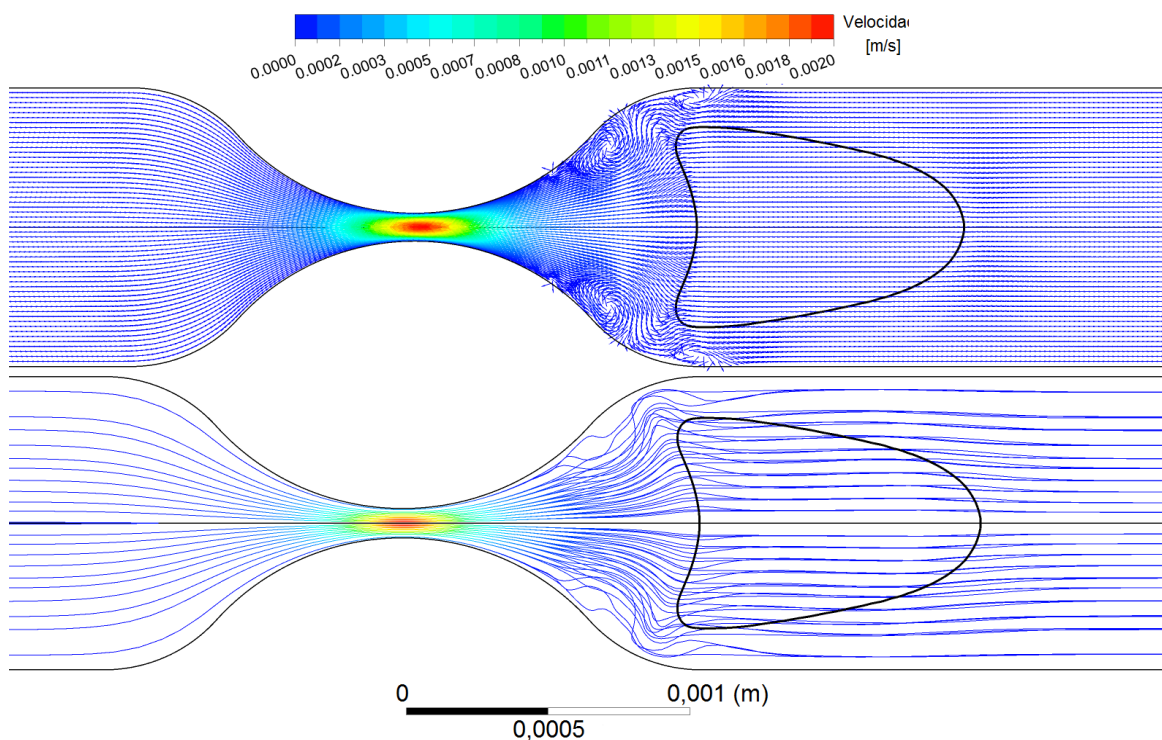


Figura 83 - Forma e posição da gota para $C_a = 0,01$ com $\mu_R = 10$ e $D_{gota} = 0,8$ (caso 34).



Durante o escoamento da gota após a saída da garganta percebe-se a formação de pequenos vórtices próximos a parede do capilar e perturbações nas linhas de corrente, como pode ser visto na Figura 84 para o caso 12. Isto acontece devido à restrição ao fluxo da fase contínua imposta pela presença da gota.

Figura 84 - Vetores velocidade e linhas de corrente na saída da garganta.



7 CONCLUSÕES

O mecanismo de bloqueio no meio poroso foi estudado por meio da simulação de uma gota de óleo em água através de capilares com garganta, utilizando resposta de um capilar reto como referência. O trabalho é baseado na proposta de Roca Reyes (2011).

Os resultados obtidos com a abordagem *Volume of Fluid* acoplado com *Level-Set* para o tratamento do problema bifásico líquido-líquido do escoamento de uma gota de óleo imerso em um meio aquoso, mostram que o número de capilaridade, a razão de viscosidade e a geometria controlam a dinâmica do escoamento da gota em capilares através da resposta dos campos de velocidade e de 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 aumentando a eficiência de recuperação. No contexto do EOR, emulsões são preparadas nas instalações de superfície e injetadas no meio poroso para reduzir a permeabilidade de zonas já varridas pelo fluido injetor com o objetivo de aumentar a eficiência de recuperação.

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

A partir dos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser citadas:

- a) A interação da gota com a geometria do capilar produz um bloqueio parcial incrementando a queda de pressão no escoamento, onde essa pressão adicional é maior para capilares com garganta, chegando a ser quase três vezes maior em relação ao escoamento monofásico;
- b) Nas simulações com geometria com garganta, confirma-se que os pontos da assinatura de pressão, como o início do aumento da queda de pressão e o pico da queda de pressão, estão associados a posições específicas com deformações da gota associadas.
- c) A gota de óleo, que tem um diâmetro maior do que a garganta, experimenta uma retenção ao se aproximar da garganta do capilar, se deforma e é acelerada na parte divergente da garganta. A queda de pressão adicional está associada

à diminuição do raio de curvatura da frente da gota e será máxima na passagem da gota através das menores seções da garganta. Nas condições necessárias, com a aplicação de um gradiente de pressão constante adequado, pode-se reter uma gota de tamanho conhecido em uma garganta de diâmetro específico;

- d) A gota de óleo ao atravessar a garganta experimenta uma deformação acentuada na curvatura posterior da gota, pelo fato de estar sendo deslocada pela água, e também experimenta um esticamento, devido a uma zona de alta velocidade formada na garganta, provocando maiores esticamentos para gotas de tamanhos maiores;
- e) Para um capilar reto a gota de óleo não afeta tão intensamente o escoamento quanto o capilar com garganta, mantendo um fator de bloqueio próximo do valor 1. O mecanismo principal de redução do fator de bloqueio é um mecanismo viscoso, já que o fator de bloqueio não depende do número de capilaridade.
- f) No caso do capilar com garganta, o fator de bloqueio diminui com a redução do número de capilaridade e o aumento do tamanho de gota. Isto deve-se a maior variação da pressão capilar a medida que interface se deforma para passar pela garganta;
- g) Quanto menor o número de capilaridade mais rígida é a interface e mais difícil a movimentação da gota, isso porque a tensão interfacial é dominante. Também, numericamente a obtenção da solução torna-se mais difícil estando a interface da gota sujeita a oscilações não físicas.
- h) A presença da gota causa perturbações nos vetores velocidade após sua completa passagem pela garganta, formando vórtices na saída da garganta na parede.

7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se:

- a) Utilizar mais de uma gota e verificar as interações e seu efeito no escoamento;
- b) Verificar o processamento paralelo do Fluent®;
- c) Critério de convergência mais rígido na ordem de 10^{-6} e verificar possíveis alterações na solução;
- d) Verificar a diferença do uso dos modelos de tensão superficial (CSF e CSS) nas simulações em comparação com o modelo de tensão utilizado no método Level-set;
- e) Verificar a diferença da aplicação dos diferentes algoritmos numéricos do Fluent® na simulação;
- f) Introduzir uma malha com elevado refinamento perto da interface e geometria cilíndrica tridimensional;
- g) Utilizar outro fluido para a fase primária;
- h) Avaliar o fator de bloqueio para outras formas e restrições de capilares com garganta.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R. M. **Desenvolvimento de código numérico para solucionar as equações bidimensionais de Navier Stokes: avaliação dos métodos SIMPLE, SIMPLEC e SIMPLER aplicados ao problema da cavidade**. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 122 f., 2009.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. 2014.

BARILLAS, J. L. M. **Estudo da recuperação de óleo por drenagem gravitacional assistida por injeção de vapor**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 184 f., 2008.

BARTH, T. J.; JESPERSEN, D. **The design and application of upwind schemes on unstructured meshes**. Technical Report AIAA-89-0366. AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1989.

BATCHELOR, G.K. **An introduction to fluid dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press. 1967.

BECHER, P. **Emulsion theory and practice**. 3th. ed. New York: Oxford University Press, 2001.

BERESNEV, I. A.; DENG, W. **Theory of breakup of core fluids surrounded by a wetting annulus in sinusoidally constricted capillary channels**. Physics of Fluids, vol. 22, 2010.

BERESNEV, I. A.; JOHNSON, P. A. **Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and results**. Geophysics, 1994.

BIRD, R.B.; ARMSTRONG, R.C.; HASSAGER, O. **Dynamics of polymeric liquids**,

fluid dynamics. 1st ed. USA: John Wiley e Sons, 1987.

BOHACEK, J. **Surface Tension Model for High Viscosity Ratios Implemented in VOF Model**. 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Brno, pag. 1-8, 2010.

BRACKBILL, J. U.; KOTHE, D. B.; ZEMACH, C. **A continuum method for modeling surface tension**. Journal of Computational Physics, vol. 100, pag. 335-354, 1992.

BRAGG, J. R. **Oil recovery method using an emulsion**. United States Patent. No. 5855243. Jan 5, 1999.

BRESSAN, L. W. **Recuperação avançada de petróleo**. Apresentação de slides. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2008.

BUSON, D. F. **Escoamento óleo-gás em equipamento submarino: influência da fração volumétrica de gás na separação de fases no módulo de bombeio**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 54 f., 2013.

CASTILLO, O. A. F. R. **Análise experimental do escoamento de emulsões óleo em água através de micro capilares com garganta**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 105 f., 2011.

CERQUEIRA, R. F. L. **Estudo computacional da transferência de calor e de massa interfacial em partículas fluidas esféricas e deformadas**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 164 f., 2015.

CHORIN, A. J. **Numerical solution of the Navier Stokes equations**. Mathematics of Computation, vol. 23, pag. 745-762, 1968.

COBOS, S.; CARVALHO, M. S.; ALVARADO, V. **Flow of oil-water emulsions**

through a constricted capillary. International Journal of Multiphase Flow, vol. 35, pag. 507-515, 2009.

CUNHA, P. X. G. **Estudo da dispersão de fumos num parque de estacionamento.** Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 152 f., 2014.

DALTIN, D. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

DALY, B. J. **Numerical study of two fluid Rayleigh-Taylor instability.** Physics of Fluids, vol. 10, pag. 297-307, 1967.

DALY, B. J. **A technique for including surface tension effects in hydrodynamic calculations.** Journal of Computational Physics, vol. 4, pag. 97-117. 1969.

DATE, A. W. **Fluid dynamical view of pressure checkerboarding problem and smoothing pressure correction on meshes with colocated variables.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 46, pag. 4885-4898, 2003.

DENG, W.; CARDENAS, M. B.; BENNETT, P. C. **Extended Roof snap-off for a continuous nonwetting fluid and an example case for supercritical CO₂.** Advances in Water Resources, vol. 64, pag. 34-46, 2014.

FARIAS, M. L. R. **Recuperação avançada de óleos pesados por injeção de emulsões diluídas de óleo em água.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 219 f., 2013.

FEJOLI, R. F. **Estudo teórico da injeção de espumas em reservatórios de petróleo.** Projeto de Graduação (Engenharia de Petróleo). Universidade Federal do Espírito Santo (UFES/CEUNES), 169 f., 2014.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational methods for fluid dynamics,** vol. 3. Springer Berlin, 1996.

FLUENT, ANSYS® Help Viewer, versão 16.0.0, 2014.

FOX, R. J.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006.

GALUSINSKI, C.; VIGNEAUX, P. **On stability condition for bifluid flows with surface tension: application to microfluidic**. Journal of Computational Physics, vol. 227, pag. 6140-6164, 2008.

GAUGLITZ, P. A.; RADKE, C. J. **The dynamics of liquid-film breakup in constricted cylindrical capillaries**. Journal of Colloid and Interface Science, vol. 134, pag. 14-40, 1990.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas**. Tese (Mestrado). Departamento de Matemática Aplicada. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 71 f., 2007.

GREEN, D. W.; WILLHITE, G. P. **Enhanced oil recovery**. Texas: SPE Textbook. 1998.

GUILLEN NÚÑEZ, V. R. **Deslocamento de óleo em um meio poroso através de injeção de emulsões óleo-em-água: análise de fluxo linear**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 89 f., 2007.

GUILLEN NÚÑEZ, V R. **Análise do processo de recuperação de óleo por injeção de emulsão**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 119 f., 2011.

GUILLEN, V. R.; ROMERO, M. I.; CARVALHO, M. S.; ALVARADO, V. A. **Capillary-driven mobility control in macro emulsion flow in porous media**. International Journal of Multiphase Flow, vol. 43, pag. 62–65, 2012.

HARLOW, F. H.; WELCH, J. E. **Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface**. Physics of fluids, v. 8, pag. 2182, 1965.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. **Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries**. Journal of Computational Physics, vol. 39, pag. 201-225, 1981.

HUSMANN, S.; ORTH, E. S. **Ensino da tensão superficial na graduação através de experimentos fáceis que não requerem Infraestrutura laboratorial**. Revista Virtual Química. ISSN 1984-6835, vol. 7, nº3, pag. 823-834, 2015.

HUTCHINSON, B. R., RAITHBY, G. D. **A multigrid method based on the additive correction strategy**. Numerical Heat Transfer, vol. 9, pag. 511-537, 1986.

IEA. **World Energy Outlook 2010**. International Energy Agency, Paris, 2010.

IMADA, F. H. J. **Estudo da estrutura multidimensional de escoamentos multifásicos em dispositivos de medição de pressão diferencial**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 151 f., 2014.

ISHII, M. **Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow**. Eyrolles. 1975.

ISSA, R. I. **Solution of implicitly discretized fluid flow equations by operator splitting**. Journal of Computational Physics, vol. 62, pag. 40-65, 1986.

JUNIOR, J. E. L. S. **Escoamento de líquido pseudoplástico através de capilar com garganta**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 97 f., 2007.

KOROTEEV, D. et al. **Direct hydrodynamic simulation of multiphase flow in porous rock**. International Symposium of the Society of Core Analysts held in Napa Valley, California, USA, pag. 16-19, 2013.

LABASTIE, Alain. **Increasing recovery factors: a necessity**. Journal of Petroleum Technology, 2011.

LAFaurie, B.; NARDONE, C.; SCARDOVELLI, R.; ZALESKI, S.; ZANETTI, G. **Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with SURFER**. Journal of Computational Physics, vol. 113, pag. 134-147, 1994.

LEONARD, B. P. **A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 19, pag. 59-98, 1979.

LEONARD, B. P.; MOKHTARI, S. **ULTRA-SHARP nonoscillatory convection schemes for high-speed steady multidimensional flow**. NASATM1-2568 (ICOMP-90-12). NASA Lewis Research Center. 1990.

LIMA, M. P. **Aferição do modelo VOF na caracterização de padrões de escoamento multifásico em tubulação horizontal e inclinada**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 113 f., 2016.

LUCZYNSKI, E. **Os condicionantes para o abandono das plataformas offshore após o encerramento da produção**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo - USP, 220 f., 2002.

McAULIFFE, C. D. **Crude oil-in-water emulsions to improve fluid flow in a reservoir**. Journal of Petroleum Technology, vol. 25, pag. 721–726, 1973.

MARIANI, V. C. **Método de otimização e técnica de modelagem de interface para análise do escoamento em difusores radiais com geometrias irregulares**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 373 f., 2002.

MONTALVO, M. E. A. **Escoamento de emulsões óleo em água através de micro capilares**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 82 f.,

2008.

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 capilar com obstruções.** Artigo aceito na revista Petro & Química, 2016.

NAVEIRA, L. P. **Simulação de reservatórios de petróleo utilizando o método de elementos finitos para recuperação de campos maduros e marginais.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 114 f., 2007.

NICHOLS, B. D.; HIRT, C. W. **Calculating three-dimensional free surface flows in the vicinity of submerged and exposed structures.** Journal of Computational Physics, vol. 12, pag. 234-246, 1973

NOH, W. F.; WOODWARD, P. **SLIC (Simple Line Interface Calculations).** Lecture Notes in Physics, vol. 59, pag. 330-340, 1976.

OLBRICHT, W. L.; LEAL, L. G. **The creeping motion of immiscible drops through a converging/diverging tube.** Journal of Fluid Mechanics. vol. 134, pag. 329-355, 1983.

OLSSON, E.; KREISS, G.; ZAHEDI, S. **A conservative Level-set method for two phase flow II.** Journal of Computational Physics, vol. 225, pag. 785-807, 2007.

OSHER, S.; SETHIAN, J. A. **Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations.** Journal of Computational Physics, vol. 79, pag. 12-49, 1988.

PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. **A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 5, pag. 1787-1806, 1972.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow.** 1st ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PAYATAKES, A. C. **Dynamics of oil ganglia during immiscible displacement in water-wet porous media.** Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 14, pag. 365-393, 1982.

PRAMIU, P. V.; RIZZI, C. B.; RIZZI, R. L. **Geração de malha não estruturada ortogonal e solução do modelo de transporte de substancias em corpos de água.** XXIV Semana Acadêmica da Matemática, 2010.

RANEY, K. **Moving chemical enhanced oil recovery offshore.** Shell International Exploration and Production, 2011.

REZENDE, A. L. T. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 263 f., 2009.

RHIE, C. M.; CHOW, W. L. **Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation.** The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, vol. 21, pag. 1525-1532, 1983.

RIDER, W. J.; KOTHE, D. B. **Stretching and tearing interface tracking methods.** Los Alamos Scientific Laboratory, 1995.

ROCA REYES, J. F. **Análise numérica do escoamento de emulsões através de capilares retos e capilares com garganta.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 72 f., 2011.

ROCA, J. F.; CARVALHO, M. S. **Flow of a drop through a constricted microcapillary.** Computers & Fluids, vol. 87, pag. 50-56, 2013.

ROMERO, M. I.; CARVALHO, M. S.; ALVARADO, V. **Network model of emulsion flow in porous media.** 20th International Congress of Mechanical Engineering,

Gramado, RS, Brasil, 2009.

ROMERO, M. I.; CARVALHO, M. S.; ALVARADO, V. **Experiments and network model of flow of oil-water emulsion in porous media**. Physical Review, American Physical Society, 2011.

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, vol. 31, pag. 218-227, 2015.

ROOF, J. G. **Snap-off of oil droplets in water-wet pores**. SPE, 1970.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de reservatórios de petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Capítulo 27 – medida da tensão superficial. CETEM-MCT Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, J. P. M. **Reservatórios e avaliação de formações**. Apresentação de slides. MBA-Executivo em Petróleo e Gás. FUNCEFET, 2010a.

SANTOS, M. M. **Simulação numérica do escoamento bifásico óleo-água em tubos**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Itajubá, 102 f., 2010b.

SANTOS, P. E. S.; ARAUJO, R. B. ; LIMA, A. M. C.; SANTANA, A. P. S. C. **Métodos de recuperação secundária convencionais**. Ciências Exatas e Tecnológicas, 2010.

SAVINO, J. **Deslocamento de fluidos em poços horizontais não retilíneos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 119 f., 2009.

SCHRAMM, L. L. **Suspensions: fundamentals and applications in the petroleum**

industry. Washington, D.C.: American Chemical Society, 1996.

SHAH, D. O. **Macro and microemulsions theory and applications.** Washington, D. C.: American Chemical Society, 1985.

SORIA, M. F. **Modelagem tridimensional de golfada unitária em tubulação horizontal com modelo VOF (Volume of Fluid).** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 106 f., 2009.

SUSSMAN, M.; PUCKETT, E. G. **A coupled Level-set and Volume of Fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows.** Journal of Computational Physics, vol. 162, pag. 301-337, 2000.

SUSSMAN, M.; SMEREKA, P.; OSHER, S. **A Level-set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow.** Journal of Computational Physics, vol. 114, pag. 146-159, 1994.

TORQUATO, M. L. L. **Escoamento de emulsões através de capilares com garganta utilizando o método de Lattice-Boltzmann.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 133 f., 2015.

THOMAS, S. **Enhanced Oil Recovery - an overview.** Oil & Gas Science and Technology, 2007.

UBBINK, O. **Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces.** PhD thesis. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, England. 1997.

UNVERDI, S. O.; TRYGGVASON, G. **A front-tracking method for viscous, incompressible multi-fluid flows.** Journal of Computational Physics, vol. 100, pag. 25-37, 1992.

VANDOORMAAL, J. P.; RAITHBY, G. D. **Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows**. Numerical Heat Transfer, vol. 7, pag. 147–163, 1984.

VAN DER WEIDE E.; DECONINCK H.; ISSMAN E.; DEGREGZ G. **A parallel, implicit, multi-dimensional Upwind, residual distribution method for the Navier Stokes equations on unstructured grids**. Computational Mechanics, vol. 23, pag. 199-208, 1999.

VAN LEER, B. **Toward the ultimate conservative difference scheme. IV. A Second Order sequel to Godunov's method**. Journal of Computational Physics, vol. 32, pag. 101–136, 1979.

VERSTEEG H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. 1st ed. England: Longman Scientific & Technical, 1995.

APÊNDICE A: ARTIGO PUBLICADO



Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 19, N.º 2, pp. 71-81, 2015

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 consequentemente 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 continua 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

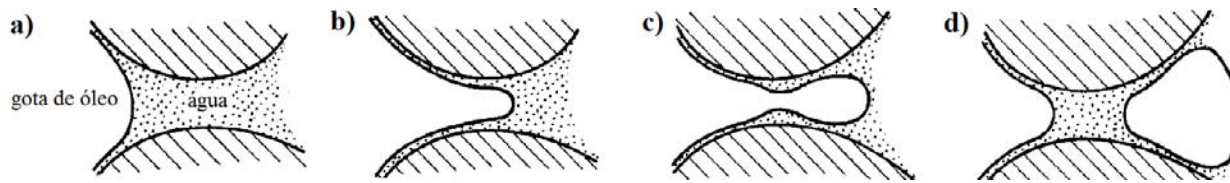


Fig. 1. Fenômeno *snap-off*: a) uma gota de óleo não molhante encontra uma constrição, b) e c) alongamento da gota através da garganta, e d) formação de outra gota de óleo (Modificado de [2]).

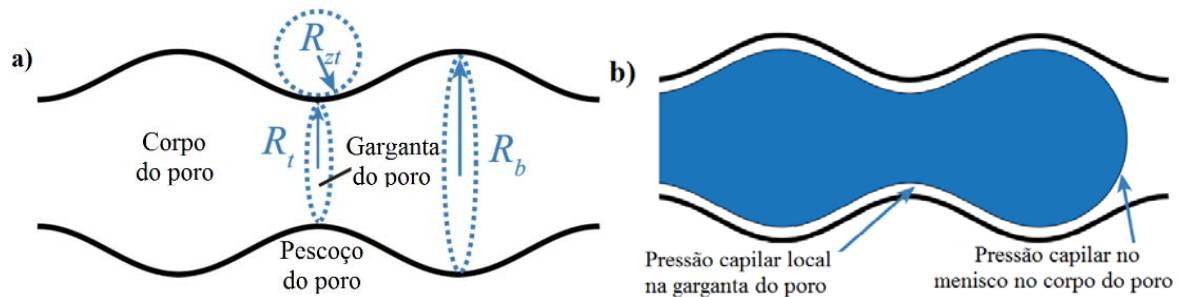


Fig. 2. a) $1/R_b$ e $1/R_t$ são as curvaturas do corpo e da garganta do poro, respectivamente. $1/R_{zt}$ é a curvatura transversal da garganta de poro. b) A pressão capilar local na garganta do poro é dada por $\sigma(1/R_t + 1/R_{zt})$; a pressão capilar através do menisco no corpo de poro é dada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

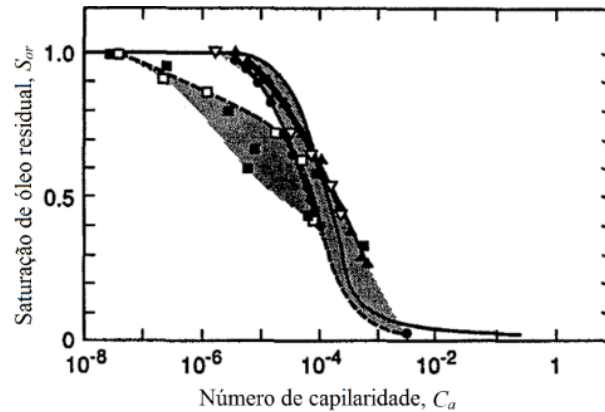


Fig. 3. Influência da variação do número de capilaridade na diminuição da saturação de óleo remanescente. Adaptado de [6].

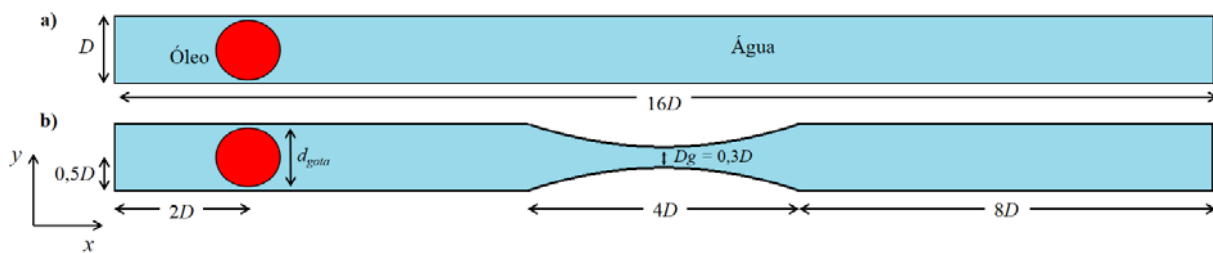


Fig. 4. Geometrias do microcanal reto (a) e do microcanal com garganta (b).

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 ρ_w e viscosidade μ_w da água, que é a fase contínua, é de 1.000 kg/m³ (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 ρ_o , que é a fase dispersa, também permaneceu constante com o valor de 950 kg/m³ (17,4 °API). A viscosidade do óleo μ_o assumiu dois valores 1 cP e 100 cP respectivamente, resultando nas razões de viscosidades (μ_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 (σ) 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 $C_a = 3,00$).

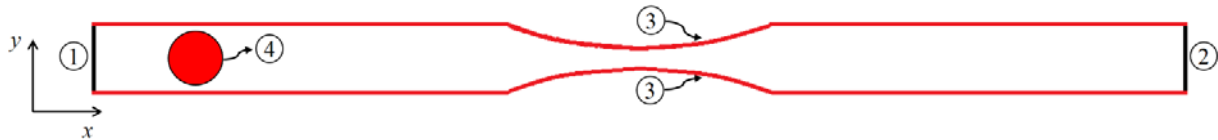


Fig. 5. Esquema identificando as condições de contorno válidas para os microcanais reto e com garganta.

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 Δt 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 Δt .

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 μ_o é a viscosidade do óleo, μ_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, ρ_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), α_o [12], válida quando não há transferência de massa entre as fases

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

ρ_o é a densidade do óleo. Em cada célula da malha a fração volumétrica de óleo α_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 (α_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 ρ e μ . 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 σ e da curvatura da interface κ , $\kappa = \nabla \cdot \vec{n}$, 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 , α_o e α_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, Δt é o passo de tempo e Δx 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	μ_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 σ 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 Δt . 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.

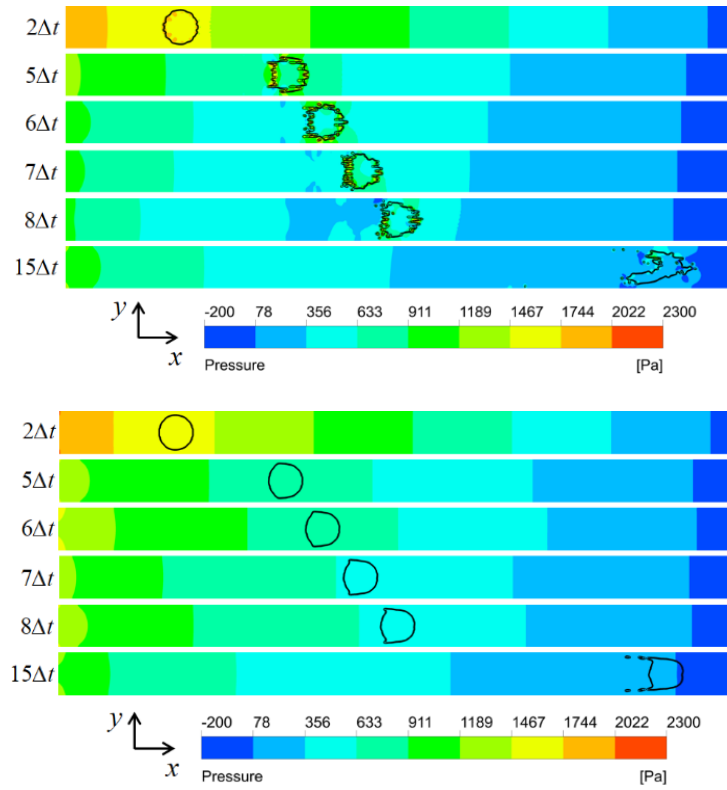


Fig. 7. Efeito do C_a no avanço da gota de óleo no microcanal reto para o caso 1 (superior) com $C_a = 0,03$ e para o caso 2 (inferior) com $C_a = 3,00$. Os outros parâmetros são mantidos constantes em $\mu_R = 1$, $D_{R1} = 0,8$ e $D_{R2} = 1,00$.

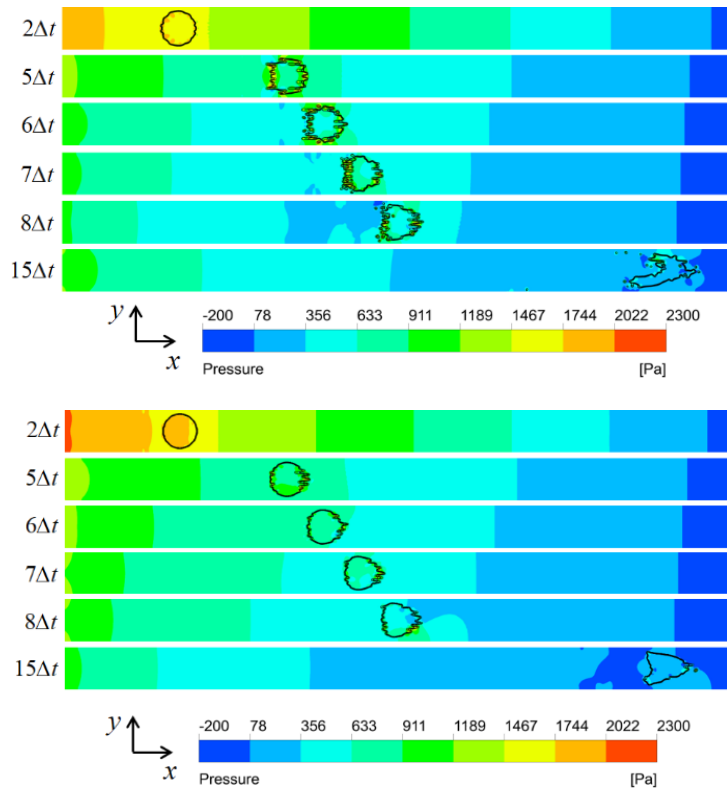


Fig. 8. Efeito da μ_R no avanço da gota de óleo no microcanal reto para o caso 1 (superior) com $\mu_R = 1$ e para o caso 3 (inferior) com $\mu_R = 100$. Os outros parâmetros são mantidos constantes em $C_a = 0,03$, $D_{R1} = 0,8$ e $D_{R2} = 1,00$.

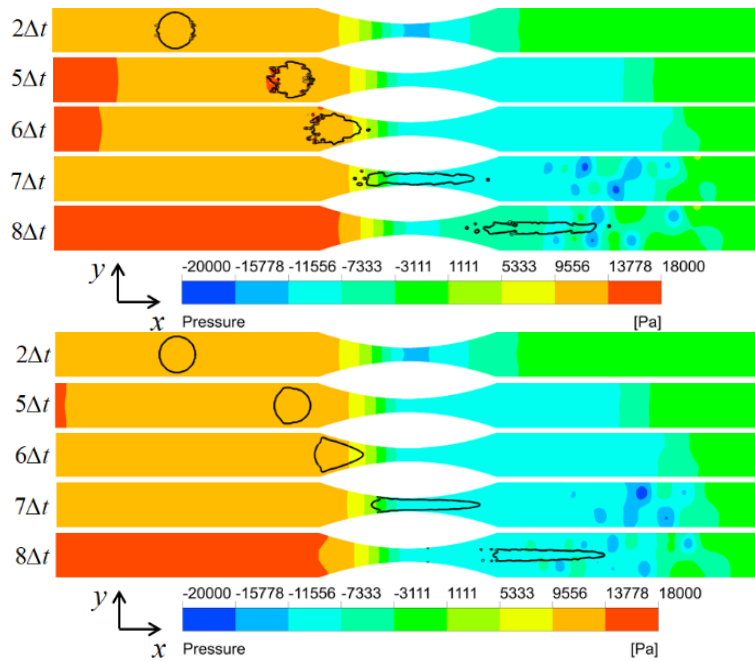


Fig. 9. Efeito do C_a no avanço da gota de óleo no microcanal com garganta para o caso 5 (superior) com $C_a = 0,03$ e para o caso 6 (inferior) com $C_a = 3,00$. Os outros parâmetros são mantidos constantes em $\mu_R = 1$, $D_{R1} = 0,8$ e $D_{R2} = 0,3$.

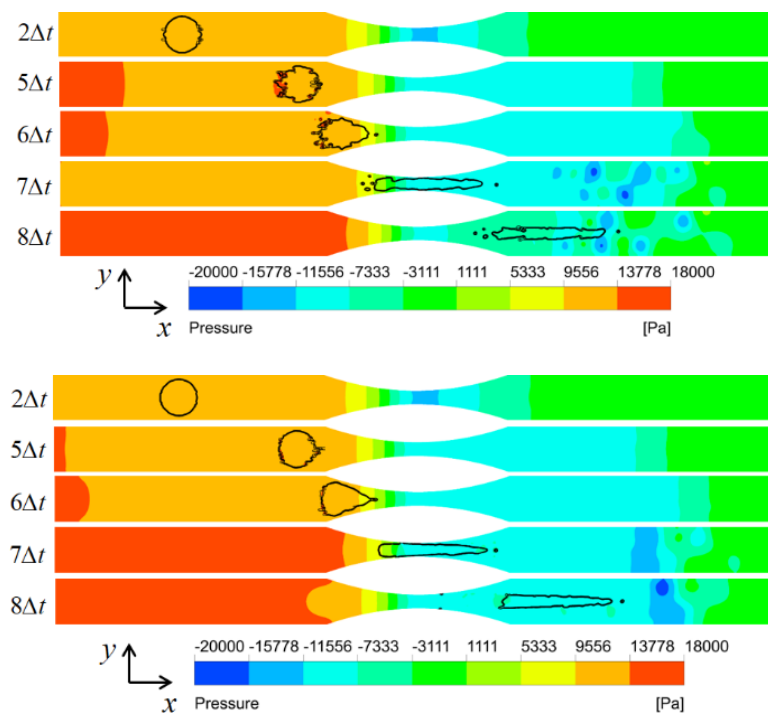


Fig. 10. Efeito da μ_R no avanço da gota de óleo no microcanal com garganta para o caso 5 (superior) com $\mu_R = 1$ e para o caso 7 (inferior) com $\mu_R = 100$. Os outros parâmetros são mantidos constantes em $C_a = 0,03$, $D_{R1} = 0,8$ e $D_{R2} = 1,00$.

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

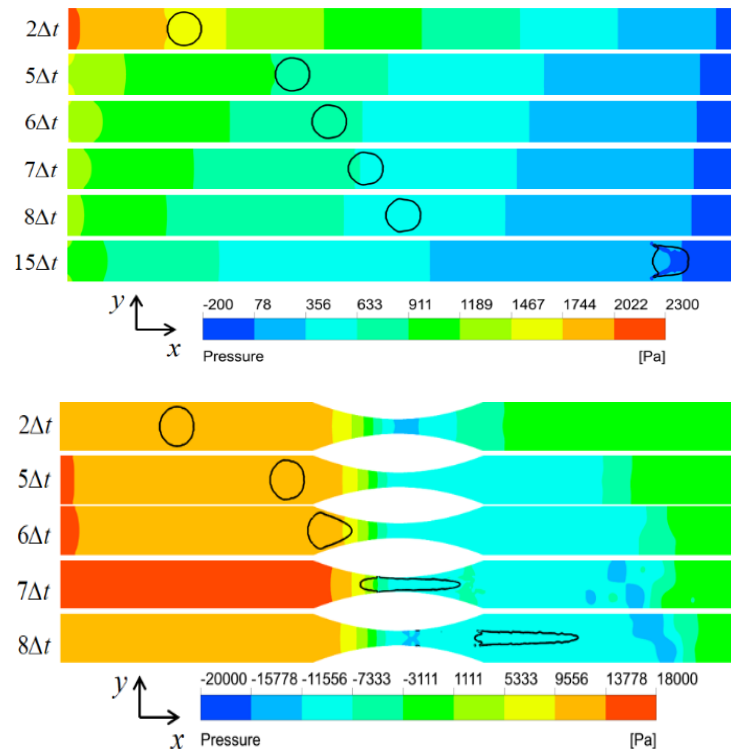


Fig. 11. Efeito da geometria no avanço da gota de óleo para o caso 4 (microcanal reto, $D_{R2} = 1,0$, superior) e para o caso 8 (microcanal com garganta, $D_{R2} = 0,3$, inferior). Os outros parâmetros são mantidos constantes em $\mu_R = 100$, $C_a = 3,00$, $D_{R1} = 0,8$.

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 Δp 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 CO₂”, *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.