André Alvarez Baranowski

Escoamento de bolhas de ar em um fluido não-Newtoniano

Flow of air bubbles in a non-Newtonian fluid

Área de Concentração: Mecânica dos Fluidos

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como parte dos
requisitos à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Mônica Feijó Naccache
Coorientadora: Aline Abdu

Rio de Janeiro

Maio de 2017

Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Mônica Feijó Naccache, e à minha coorientadora Aline Abdu pelo apoio, auxílio e dedicação ao longo de toda a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, que ao longo desses cinco anos nos proporcionaram todos os conhecimentos acadêmicos adquiridos.

Agradeço a toda minha família que sempre se dedicou com a minha formação intelectual e moral e que é a base de todas as minhas conquistas acadêmicas e profissionais e que sempre acreditaram no meu potencial e me incentivaram a enfrentar as dificuldades encontradas.

Agradeço à minha madrinha Bianca Tauil, e seu marido Castro Benedito que me hospedaram com muito carinho em sua casa durante um ano para que pudesse estar mais próximo à faculdade e me dedicar mais tempo aos estudos.

Agradeço também a todos os amigos que conheci durante a faculdade que tornaram todos esses anos de faculdade muita mais agradáveis.

RESUMO

Escoamento de bolhas de ar em um fluido não-Newtoniano

O escoamento de uma bolha em fluido não newtoniano pode ser observado em diversos processos industriais, desde a produção de alimentos, produtos químicos ou na perfuração de um poço de petróleo. O estudo desse tipo de escoamento é feito a fim de otimizar esses processos da melhor maneira possível. Em uma perfuração de um poço de petróleo, por exemplo, o entendimento do comportamento dessa mistura multifásica é de extrema importância para evitar o fenômeno chamado de *kick* (“chute”), que é um influxo de fluidos não desejados (água, gás ou óleo) presentes na formação para dentro do poço. Esse fenômeno pode provocar um fluxo descontrolado de fluido na superfície, chamado de *blowout*, que pode levar a perda de controle do poço causando acidentes como incêndios e outras perdas de todo o tipo. O estudo em geral, busca determinar parâmetros da bolha, como velocidade da bolha, formato e diâmetro da bolha ao longo do escoamento, entre outros. Nesse trabalho é apresentado um estudo numérico de um escoamento de uma única bolha em um fluido não newtoniano viscoplastico. Essa análise é realizada com o auxílio do software *FLUENT*, aplicando o método VOF – volume of fluid (Hirt e Nichols, 1981) [6] para a realização dos cálculos. Os resultados obtidos numericamente serão comparados com os resultados obtidos experimentalmente pelo William F. Lopez em seu trabalho: “*Experiments of air bubble rising in yield stress fluids*” [1]. Os resultados foram obtidos utilizando uma solução composta pelo polímero Carbopol® 980 NF dissolvido em água, para diferentes composições do polímero. Uma vez que a viscosidade de um fluido não newtoniano viscoplastico varia em função da taxa de deformação, utilizamos nesse estudo o modelo de Herschel-Bulkley para a determinação da viscosidade do fluido.

Palavras chaves: Escoamento multifásico, fluido não newtoniano viscoplástico, VOF, Herschel-Bulkley, kick, perfuração poço de petróleo

ABSTRACT

Flow of air bubbles in a non-Newtonian fluid

The flow of a bubble in non-Newtonian fluid can be observed in several industrial processes, from the production of food, chemical products or the drilling of an oil well. The study of this type of flow is done to optimize these processes in the best way possible. Drilling an oil well, for example, understanding the behavior of this multiphase mixture is extremely important to avoid the phenomenon called kick, which is an influx of unwanted fluids (water, gas, or oil) present in the formation into the well. This phenomenon can cause an uncontrolled flow of fluid on the surface, called blowout, which can lead to loss of control of the well causing accidents such as fires and other losses of all kinds. The study in general, seeks to determine bubble parameters, such as bubble velocity, bubble shape and diameter along the flow, among others. In this work, a numerical study of a single bubble flow in a non-Newtonian viscoplastic fluid is presented. This analysis is performed with the aid of FLUENT software, applying the VOF - volume of fluid method (Hirt and Nichols, 1981) [6] method to perform the calculations. The results obtained numerically will be compared with the results obtained experimentally by William F. Lopez in his work: "Experiments of air bubble rising in yield stress fluids" [1]. The results were obtained using a solution composed of the polymer Carbopol® 980 NF dissolved in water, for different compositions of the polymer. Since the viscosity of a viscoplastic non-Newtonian fluid varies as a function of strain rate, we used the Herschel-Bulkley model for the determination of fluid viscosity in this study.

Keywords: Multiphase flow, non-Newtonian viscoplastic fluid, VOF, Herschel-Bulkley, kick, oil well drilling

Sumário

1.	Introdução.....	9
1.1	Motivação	
1.2	Revisão bibliográfica	
1.3	Objetivo	
2.	Solução numérica.....	13
2.1	Software utilizado	
2.2	Abordagem multifásica	
2.3	Modelo reológico	
3.	Formulação do problema.....	20
3.1	Geometria do tanque	
3.2	Desenvolvimento da malha	
3.2.1	Velocidade das bolhas para as três malhas	
3.2.2	Formato da bolha para as três malhas	
3.2.3	Escolha da malha	
3.2.4	Verificação da malha escolhida	
4.	Resultados e discussões.....	31
5.	Conclusão.....	48
6.	Bibliografia.....	50

Lista de figuras

Figura 1: Figura esquemática do fenômeno <i>kick</i> durante a perfuração de um poço de petróleo	9
Figura 2: Explosão na plataforma Deep Water Horizon devido ao <i>blowout</i>	10
Figura 3: Relação entre a viscosidade e a tensão cisalhante	17
Figura 4: Gráficos da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para diferentes tipos de fluidos.....	18
Figura 5: Tanque utilizado pelo William F. Lopez [1] em seus estudos	20
Figura 6: Geometria criada a partir do <i>software DesignModeler</i>	21
Figura 7: Imagem com as três malhas testadas	22
Figura 8: Velocidade da Bolha no Tempo - Diâmetro da bolha: 1,0 cm - Fluido: Glicerina	23
Figura 9: Velocidade da Bolha no Tempo - Diâmetro da bolha: 2,5 cm - Fluido: Glicerina	24
Figura 10: Formato da bolha - Glicerina - Diâmetro: 1,0 cm	25
Figura 11: Formato da bolha - Glicerina - Diâmetro: 2,5 cm	25
Figura 12: Mapa com os formatos das bolhas obtidos por Abdu, Alicke, Candela, Naccache e de Souza Mendes [7].....	27
Figura 13: Formato da bolha 1 - Esférica.....	28
Figura 14: Formato da bolha 2 - Elipsoidal	29
Figura 15: Formato da bolha 3 - "meia-lua"	30
Figura 16: Empuxo e Força de Arraste na Bolha	32
Figura 17: Formato das bolhas em função do diâmetro para o fluido com 0,10%w/w de Carbopol.....	33
Figura 18: Formato das bolhas em função do diâmetro para o fluido com 0,15%w/w de Carbopol.....	34
Figura 19: Formato das bolhas em função do diâmetro para o fluido com 0,20%w/w de Carbopol.....	34
Figura 20: Escoamento de bolhas de ar na concentração de 0,10%w/w de Carbopol obtido por Lopez [1]. (a) $D_c = 0,0081$ m. (b) $D_c = 0,0118$ m. (c) $D_c = 0,0167$ m. (d) $D_c = 0,0215$ m. (e) $D_c = 0,0254$ m. (f) $D_c = 0,0293$ m. (g) $D_c = 0,0325$ m.	35

Figura 21: Escoamento de bolhas de ar na concentração de 0,20%w/w de Carbopol obtido por Lopez [1]. (a) $D_c = 0,0196$ m. (b) $D_c = 0,0227$ m. (c) $D_c = 0,0258$ m. (d) $D_c = 0,0316$ m. (e) $D_c = 0,0340$ m. (f) $D_c = 0,0349$ m. (g) $D_c = 0,0382$ m. (h) $D_c = 0,0436$ m.	35
Figura 22: Gráfico para quatro diferentes diâmetros iniciais, da Velocidade no tempo para o fluido com 0,010%w/w de Carbopol	36
Figura 23: Gráfico para quatro diferentes diâmetros iniciais, da Velocidade no tempo para o fluido com 0,015%w/w de Carbopol	37
Figura 24: Gráfico para quatro diferentes diâmetros iniciais, da Velocidade no tempo para o fluido com 0,020%w/w de Carbopol	37
Figura 25: Velocidades terminais obtidas numericamente, e experimentalmente por William F. Lopez [1]	38
Figura 26: Viscosidade característica para cada diâmetro efetivo nas três soluções simuladas	39
Figura 27: Vetores de velocidade para três diferentes diâmetros característico testados para os fluidos com 0,10%w/w, 0,15%w/w e 0,20%w/w de concentração do polímero Carbopol.	40
Figura 28: Mapas de pressão para três diâmetros característicos testados para os fluidos com 0,10%w/w, 0,15%w/w e 0,20%w/w de concentração do polímero Carbopol.	41
Figura 29: Número de Bingham para cada diâmetro efetivo nas três soluções simuladas.	43
Figura 30: Número de Reynolds para cada diâmetro efetivo nas três soluções simuladas	44
Figura 31: Número de Bond para cada diâmetro efetivo nas três soluções simuladas	45
Figura 32: Gráfico log-log do coeficiente de arrasto versus o número de Reynolds ..	47

Lista de tabelas

Tabela 1: Propriedades Reológicas	31
Tabela 2: Diâmetros Críticos	32
Tabela 3: Diâmetros Iniciais e Taxa de cisalhamento crítica.....	33
Tabela 4: Velocidade em regime permanente das bolhas para todos os diâmetros testados para os fluidos com 0,010%w/w, 0,015%w/w e 0,020%w/w de Carbopol.....	38

1. Introdução

1.1 Motivação

O surgimento de bolhas de ar ou de gás pode ocorrer em diversos processos industriais, podendo ser desejáveis ou não. Muitas vezes a presença destas bolhas pode causar sérias consequências, como por exemplo, na perfuração de poços de petróleo. O controle de um poço é de extrema importância na exploração de óleo e gás, pois envolve aspectos de segurança de pessoal, ambiental e econômico. A migração de gás na perfuração de um poço é um sério problema na indústria do petróleo. Este fenômeno ocorre quando por algum motivo, durante a perfuração ou a completação de um poço, a pressão hidrostática do fluido de perfuração se torna menor que a pressão de formação do poço, gerando assim uma migração de fluidos não desejados (água, gás ou óleo), chamado de *kick*, para o interior do poço. Se por algum motivo a equipe responsável pela perfuração não for capaz de detectar e remover o *kick* para fora do poço, esse fluxo de fluidos pode acabar escapando para a superfície, causando um *blowout*.

Figura 1: Figura esquemática do fenômeno *kick* durante a perfuração de um poço de petróleo

No ano de 2010, no Golfo do México, um *blowout* ocasionou a explosão da plataforma de petróleo Deep Water Horizon, que levou a morte de 11 tripulantes e espalhou uma grande mancha de óleo no oceano. Esta era uma das plataformas mais modernas em operação, cuja construção custou cerca de 350 milhões de dólares .

Plataformas deste tipo utilizam um sistema de posicionamento por GPS para mantê-las na mesma posição, uma vez em que trabalham em águas com até três mil metros profundidade. Sendo assim, quando algum tipo de acidente ocorre, este sistema pode ser danificado, desativando os motores que a mantém na mesma posição causando um rompimento do *riser* – cano que conecta a plataforma ao poço de petróleo. Caso isso ocorra, o petróleo oriundo do poço continua vazando diretamente para o mar causando um terrível acidente ecológico.

Figura 2: Explosão na plataforma Deep Water Horizon devido ao *blowout*

Atualmente este tema tem sido alvo de muitas pesquisas que buscam entender as causas que iniciam um *kick*, investigando como se dá o início do influxo e como é o escoamento dos fluidos ao longo do poço, além do desenvolvimento de novas técnicas para impedir um *blowout* caso o *kick* já tenha iniciado.

1.2 Revisão Bibliográfica

Uma grande variedade de pesquisas a respeito de escoamentos de bolhas em poços de petróleo, tanto experimentalmente, quanto numericamente, é existente. Embora a maior parte destas pesquisas utilizam fluidos Newtonianos para representar o problema, existem alguns artigos que utilizam fluidos não-Newtonianos.

Costa e Lopez [6] fizeram uma abordagem bem técnica dos problemas que podem surgir em uma perfuração de um poço de petróleo, onde dissertaram a respeito de técnicas utilizadas para prevenir que um *kick* se transforme em um *blowout*. Abordaram também novas tecnologias que estão sendo utilizadas para restabelecer o controle de um poço de petróleo quando o *blowout* ocorre.

Nascimento [4] apresentou em seu trabalho um simulador de escoamentos multifásicos em dutos e poços de petróleo que utiliza as propriedades de um fluido Newtoniano. Este simulador é capaz de determinar o gradiente de pressão e temperatura ao longo do escoamento.

Um estudo realizado por Tripathi, Sahu, Karapetsas e Matar [3] analisou numericamente a dinâmica do escoamento de uma bolha em um fluido de Bingham, utilizando a metodologia do *volume-of-fluid*. O fluido de Bingham é um fluido não-Newtoniano onde a viscosidade varia com a taxa de deformação e cuja principal característica é a existência de uma tensão limite de escoamento. Este fluido pode ser considerado um caso especial do fluido de Herschel-Bulkley. Neste estudo eles verificaram o impacto que o formato da bolha e a taxa de deformação possuem sobre a dinâmica do escoamento. Além disso, foi observado que para baixas tensões de cisalhamento, a bolha atinge uma velocidade terminal bem elevada e constante, e para valores menores das tensões de cisalhamento, o escoamento da bolha não é estável e as velocidades são bem menores.

A pesquisa realizada por Lopez [1] traz resultados importantes obtidos experimentalmente do escoamento de uma bolha em um fluido viscoplástico Herschel-Bulkley. O fluido usado neste experimento para representar o fluido viscoplástico Herschel-Bulkley foi uma solução de água com o polímero Carbopol. A partir de fotografias e vídeos retiradas do experimento, ele pode observar diversos parâmetros da dinâmica deste escoamento, como por exemplo o formato e velocidade final da bolha, para diferentes diâmetros da bolha e em diferentes concentrações de polímero.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é fazer uma simulação numérica de uma bolha de ar escoando em um poço de petróleo, e então determinar diversos parâmetros deste escoamento, dando enfoque maior para o formato da bolha e a dinâmica deste fluxo. Os resultados obtidos serão analisados e comparados com os resultados obtidos experimentalmente pelo William F. Lopez em seu trabalho: “*Experiments of air bubble rising in yield stress fluids*” [1], a fim de comprovar a eficiência dos dois diferentes métodos. Além disso, são apresentados neste trabalho alguns fatores que não podem ser analisados experimentalmente, como por exemplo, gráficos com os vetores da velocidade e da pressão ao longo do escoamento, que auxiliam o entendimento do escoamento. A simulação numérica permite ainda a obtenção de resultados numa faixa maior de parâmetros, aumentando assim a faixa de parâmetros estudadas anteriormente pelo William F. Lopez [1].

2 Solução Numérica

Neste capítulo, primeiramente é feita uma breve apresentação do software *FLUENT*, que foi utilizado neste trabalho. Então é apresentado o modelo de cálculo para escoamentos multifásicos VOF (*Volume of Fluid*), que foi o modelo escolhido para a realização dos cálculos numéricos das simulações. Em seguida, é apresentado o modelo de Herschel-Bulkley, usado para a representação da viscosidade do fluido não newtoniano viscoplástico.

2.1 Software utilizado

Todas as simulações realizadas neste trabalho foram realizadas com o auxílio do software comercial *Fluent* versão 17.2 produzido pela Ansys. Este software realiza simulações numéricas de diversos escoamentos de fluidos, da transferência de calor e de todos os outros fenômenos relacionados, utilizando um método conhecido como Fluidodinâmica Computacional ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*). O método é baseado em equações de conservação diferenciais que não possuem uma solução analítica, sendo assim, necessário reescrever estas equações de forma algébrica e então resolvê-las por meio de algum método de discretização. Para isso é feita uma substituição do domínio contínuo por um domínio discreto, onde um conjunto de volumes de controle é utilizado para representar o domínio original. O domínio discretizado é chamado de malha, e cada volume de controle é um elemento da malha. Quanto maior o número de subdivisões desta malha, mais precisos serão os resultados obtidos, porém maior será o tempo de processamento.

2.2 Abordagem Multifásica

Quando estamos trabalhando com um escoamento bifásico, isto é, um escoamento onde uma das fases é líquida e a outra é gasosa, podemos trabalhar com duas diferentes abordagens: Euler-Lagrange ou Euler-Euler. A primeira delas é utilizada apenas em sistemas dispersos, onde é resolvida uma equação de conservação da quantidade de movimento para cada partícula, em um sistema de referência que se movimenta junto com a partícula. Já na segunda abordagem, ambas as fases são tratadas matematicamente como meios contínuas.

Neste trabalho é utilizado o modelo VOF (*Volume of Fluid*) que foi proposto por Hirt & Nichols (1981) [2]. Este modelo utiliza a abordagem de Euler-Euler, utilizada quando temos as duas fases separadas com uma interface bem definida, e que os fluidos são imiscíveis, ou seja, não se misturam. Este modelo soluciona um único conjunto de equações de momento para frações de volume de cada um dos fluidos do domínio.

Sendo assim, para fluidos não miscíveis “**A**” e “**B**” a fração volumétrica do fluido “**A**” em uma célula é denominada de α_A , e a fração volumétrica do fluido “**B**” em uma célula é denominada de α_B , com isso existem três situações distintas:

- 1- Se $\alpha_n = 0$: esta célula não possui nenhum volume do fluido “**n**”
- 2- Se $\alpha_n = 1$: esta célula só possui o fluido “**n**”
- 3- Se $0 < \alpha_n < 1$: a célula possui a interface entre o fluido “**n**” e algum outro, ou outros fluidos.

É com base nos valores de α_n que as propriedades serão atribuídas a cada volume de controle dentro do domínio.

Para o cálculo da densidade de uma célula (ρ), por exemplo, a seguinte equação é utilizada:

$$\rho = \alpha_A \rho_A + (1 - \alpha_A) \rho_B \quad (1)$$

Todas as demais propriedades para uma determinada célula são calculadas deste mesmo modo.

A partir daí as equações de conservação de massa, e conservação da quantidade de movimento linear são aplicadas em cada célula do domínio.

Sendo:

- $\vec{u}$ = Vetor da velocidade
- $\vec{g}$ = Aceleração gravitacional
- ρ = Densidade
- μ = Viscosidade
- $\vec{F}$ Forças externas

Então:

- Equação para o cálculo da conservação de massa em cada célula:

$$\frac{1}{\rho_n} \left[\frac{\partial(\alpha_n \rho_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_n \rho_n \vec{u}_n) \right] = 0 \quad (2)$$

- Equação para o cálculo da conservação de quantidade de movimento linear:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} = 0 \quad (3)$$

Somente uma equação da conservação de quantidade de movimento linear é resolvida para todo o domínio e o campo de velocidades resultante é então compartilhado para todas as fases.

2.3 Modelo Reológico

Reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento de corpos sólidos ou fluidos submetidos a tensões em um intervalo de tempo determinado. Visando determinar propriedades como: elasticidade, viscosidade e plasticidade.

Os fluidos podem ser definidos de acordo com a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação do fluido. Sendo assim, existem dois tipos de fluidos, os fluidos newtonianos, e os fluidos não newtonianos. Os fluidos newtonianos obedecem à lei de Newton da viscosidade onde a tensão cisalhante é diretamente proporcional à taxa de deformação. Já para os fluidos não newtonianos esta lei não é válida, sendo assim para os fluidos não newtonianos a viscosidade do fluido não é constante.

Como mencionado anteriormente, o fluido escolhido para as simulações realizadas neste trabalho foi o Carbopol® 980. O Carbopol é um fluido não newtoniano do tipo Herschel-Bulkley, também chamado de Bingham generalizado. Este tipo de fluido necessita uma tensão inicial para escoar, chamada de tensão limite de escoamento. Para pequenas tensões abaixo da tensão limite de escoamento o fluido possui uma viscosidade muito alta, tendo um comportamento semelhante ao de um corpo sólido. Para tensões acima da tensão limite de escoamento o material se comporta como um líquido. A equação matemática utilizada para modelar o comportamento da viscosidade em um fluido do tipo Herschel-Bulkley é:

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} \quad , \quad \text{para: } \tau > \tau_0 \quad (4)$$
$$\eta = \infty \quad , \quad \text{para: } \tau < \tau_0$$

Onde:

- η = Viscosidade
- K = Índice de consistência
- n = Índice “*power law*”
- τ = Tensão de cisalhamento
- τ_0 = Tensão limite de escoamento
- $\dot{\gamma}$ = Taxa de deformação

A partir dessa definição pode-se definir a taxa de cisalhamento característica $\dot{\gamma}_c$, e a viscosidade característica do fluido η_c como mostrado a seguir:

$$\dot{\gamma}_c = \frac{v}{D_c} = \frac{\sqrt{g D_c}}{D_c} \quad (5)$$

$$\eta_c = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_c} + K \dot{\gamma}_c^{n-1} \quad (6)$$

Sendo D_c é o diâmetro característico da bolha definido como:

$$D_c = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (7)$$

Onde ρ é a densidade do fluido.

Assim, o modelo de Herschel-Bulkley não possui um comportamento contínuo, por isso, este modelo não pode ser utilizado em soluções numéricas. Para resolver este problema, no ano de 1987, Papanastasiou [5] propôs um modelo de menor complexidade que faz uma aproximação contínua do modelo de Herschel-Bulkley. Ele acrescentou um termo exponencial na equação que faz com que a viscosidade decresça rapidamente de um valor muito alto pré-determinado, chamada de viscosidade limite η_L . Neste trabalho a viscosidade limite foi definida como sendo a viscosidade característica do fluido multiplicada por um fator de 1000. Esta ideia produz um único modelo contínuo que é válido para todos os valores de tensão de cisalhamento.

Os gráficos abaixo representam a relação entre a viscosidade e a tensão cisalhante para o modelo de Herschel-Bulkley e para a simplificação proposta por Papanastasiou.

Figura 3: Relação entre a viscosidade e a tensão cisalhante

Em um fluido Newtoniano, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação é linear e como não há uma tensão limite de escoamento, quando a taxa de deformação é nula a tensão de cisalhamento é nula também. Para um fluido de Bingham, esta relação é linear, no entanto, temos uma tensão limite de escoamento. No modelo proposto por Herschel-Bulkley a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, após vencer a tensão limite de escoamento (τ_0) não é linear.

Os gráficos abaixo mostram como é a variação da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para fluidos newtonianos e para os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

Figura 4: Gráficos da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para diferentes tipos de fluidos.

No *Fluent*, o modelo contínuo utilizado para modelar a relação entre a viscosidade (η) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) de um fluido do tipo Herschel-Bulkley é dada por:

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{crítica}} \right)^{n-1} , \text{ se } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_{crítica}$$

$$\eta = \tau_0 \frac{(2 - \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_{crítica})}{\dot{\gamma}_{crítica}} + k \left[(2 - n) + (n - 1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{crítica}} \right] , \text{ se } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{crítica} \quad (8)$$

Onde:

- $\dot{\gamma}_{crítica}$ = Taxa de deformação crítica

A taxa de deformação crítica $\dot{\gamma}_{crítica}$ é a menor taxa de deformação a partir da qual o fluido é capaz de escoar. Esta é definida como sendo a taxa de cisalhamento característica $\dot{\gamma}_c$, definida na equação (5), dividida pelo fator escolhido para o valor da viscosidade limite η_L , usado para modelar a viscosidade infinita, como foi proposto por Papanastasiou [5], que neste trabalho foi definido anteriormente como sendo igual a mil. Com isso a taxa de cisalhamento crítica é definida por:

$$\dot{\gamma}_{crítica} = \frac{\sqrt{gD_c}}{1000D_c} \quad (9)$$

3 Formulação do problema

Neste capítulo, são apresentadas primeiramente a geometria e as dimensões do tanque usado para simular o poço de petróleo, bem como o desenvolvimento da malha utilizada para representar este tanque numericamente.

3.1 Geometria do Tanque

Para a representação do espaço anelar presente entre a coluna de perfuração e a parede de um poço de petróleo o William F. Lopez [1] utilizou em seus estudos um tanque acrílico no formato retangular com as seguintes dimensões:

- Altura do tanque: 55,0 cm
- Largura do tanque: 19,5 cm

Figura 5: Tanque utilizado pelo William F. Lopez [1] em seus estudos

Considerou-se uma altura de 3 centímetros a partir do fundo do tanque para a injeção da bolha.

Para as simulações numéricas realizadas neste trabalho foi feita uma representação bidimensional do tanque utilizado no experimento do William. Esta representação foi realizada com o auxílio do software *DesignModeler* produzido pela *Ansys®*.

Abaixo segue foto da geometria criada no *software*.

Figura 6: Geometria criada a partir do *software DesignModeler*

3.2 Desenvolvimento da Malha

Para a discretização da geometria criada para representar o tanque, inicialmente foram criadas três diferentes malhas. Uma destas malhas era uniforme, e as outras duas eram não-uniformes, com um refinamento maior na região central, com uma razão de aspecto de tal modo que o comprimento horizontal das células localizadas no centro da malha fossem dez vezes menores que os comprimentos horizontais das células localizadas na extremidade lateral junto as paredes.

Segue abaixo a quantidade de divisões verticais e horizontais de cada malha:

- **Malha uniforme:** 330 divisões verticais e 118 divisões horizontais
- **Malha não-uniforme 1:** 180 divisões verticais e 40 divisões horizontais
- **Malha não-uniforme 2:** 270 divisões verticais e 60 divisões horizontais

Figura 7: Imagem com as três malhas testadas

Para a escolha de qual malha seria utilizada foram feitas duas simulações idênticas nas três malhas, utilizando a Glicerina como fluido, e o oxigênio para o gás da bolha. Para a primeira simulação o diâmetro inicial escolhido para a bolha foi de um centímetro (1,0 cm), e para a segunda simulação o diâmetro inicial da bolha foi de dois centímetros e meio (2,5 cm). Então, os resultados obtidos foram analisados e comparados entre si. Os dados levados em consideração nesta análise foram: a velocidade final da bolha; o formato da bolha; e o tempo de processamento de cada simulação. Levando em conta que a malha uniforme é a mais refinada, esta análise busca identificar se algumas das duas malhas não uniformes criadas nos fornece resultados satisfatoriamente próximos a malha uniforme. Em caso positivo, a malha não-uniforme é escolhida para a realização das simulações, uma vez que o tempo de processamento diminui consideravelmente.

3.2.1 Velocidade da bolha para as três malhas

Os gráficos abaixo representam as velocidades de deslocamento vertical das bolhas para cada instante de tempo para cada uma das malhas. No gráfico 1 estão representadas as velocidades para as bolhas com um centímetro de diâmetro inicial, e o gráfico 2 para dois centímetros e meio de diâmetro inicial.

Figura 8: Velocidade da Bolha no Tempo - Diâmetro da bolha: 1,0 cm - Fluido: Glicerina

Figura 9: Velocidade da Bolha no Tempo - Diâmetro da bolha: 2,5 cm - Fluido: Glicerina

A partir dos gráficos conclui-se que os resultados obtidos para a malha-não uniforme 2 e para a malha uniforme são bastante similares, no entanto, a malha não uniforme 1 apresentou valores para as velocidades consideravelmente diferentes para os dois valores de diâmetros iniciais testados em relação as demais malhas.

3.2.2 Formato da bolha para as três malhas

Para analisar o formato da bolha nas três malhas obtem-se do *Fluent* gráficos que representam as quantidades de cada fase (ar e glicerina) existentes em uma célula. Estes gráficos são obtidos para as três malhas no mesmo instante de tempo e para cada um dos dois valores de diâmetro inicial testados, vistos a seguir.

- Diâmetro inicial: 1,0 cm

Na figura abaixo estão representados os formatos das bolhas com diâmetro inicial de um centímetro em cada uma das malhas:

Figura 10: Formato da bolha - Glicerina - Diâmetro: 1,0 cm

- Diâmetro inicial: 2,5 cm

Na figura abaixo estão representados os formatos das bolhas com diâmetro inicial de dois centímetros e meio em cada uma das malhas:

Figura 11: Formato da bolha - Glicerina - Diâmetro: 2,5 cm

A partir dos gráficos obtidos pode-se concluir mais uma vez que os resultados para os dois valores de diâmetros iniciais testados para a malha uniforme estão muito semelhantes aos resultados da malha não-uniforme 2. Já para os gráficos da malha não-uniforme 1, pode-se observar que os resultados são um pouco diferentes, com uma perda significativa na exatidão devido a um menor refinamento desta malha.

3.2.3 Escolha da malha

Com base nos dois fatores analisados nos itens 2.1.1 e 2.1.2 conclui-se que a malha não-uniforme 1 apresentou resultados muito distintos em todas as simulações realizadas em relação aos resultados das demais malhas testadas, o que acarretou desqualificando esta malha para as simulações futuras.

Uma vez que, em todas as simulações realizadas, os dados obtidos por meio das malhas uniforme e não-uniforme 2 foram satisfatoriamente próximos, e levando em consideração o tempo de simulação, conclui-se que a malha não-uniforme 2 é a mais indicada para os testes a serem realizados.

3.2.4 Verificação da malha escolhida

A fim de verificar se a malha escolhida atende aos requisitos necessários para os testes, foi feita uma comparação com os resultados obtidos por Abdu, Aliche, Candela, Naccache e de Souza Mendes [7]. Neste estudo foi apresentado um mapa com os formatos de uma bolha de ar para diversos valores do número de Reynolds e Bond testados, como visto na figura 10:

Figura 12: Mapa com os formatos das bolhas obtidos por Abdu, Aliche, Candela, Naccache e de Souza Mendes [7].

Sendo assim, novas simulações são feitas, desta vez usando somente a malha escolhida (malha não-uniforme 2), com intuito de comparar os resultados fornecidos pela malha escolhida com os resultados do mapa apresentado. Para estas simulações o fluido utilizado foi novamente a Glicerina.

A partir do mapa, localiza-se três regiões do mapa com formatos diferentes para a bolha, identificando-se os valores de Reynolds e Bond para cada formato. Então, utilizando as propriedades da Glicerina, calcula-se o diâmetro característico que a bolha de ar simulada deve ter para atingir um formato semelhante ao apresentado no mapa. Abaixo estão as definições de Bond e Reynolds utilizadas por Abdu, Aliche, Candela, Naccache e de Souza Mendes [7] para a realização do mapa, e as propriedades do fluido Glicerina.

$$Bo = \frac{D_c^2 \rho g}{\sigma} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho g^{1/2} D_c^{3/2}}{\mu} \quad (10)$$

Propriedades do fluido Glicerina:

- $\mu = 0,799 \frac{kg}{m.s}$
- $\sigma = 0,0630 \frac{N}{m}$
- $\rho = 1259,900 \frac{kg}{m^3}$

Aceleração da gravidade:

- $g = 9,810 \frac{m}{s^2}$

Os testes buscaram atingir valores próximos para os seguintes formatos do mapa: *Spherical*, *Elipsoidal* e *Skirted*.

- Formato 1: Esférico

Para o primeiro formato, os valores escolhidos para Bond e Reynolds foram: $Bo = 2,540$ e $Re = 1,070$, o que resulta em um diâmetro característico igual a: $D_c = 0,00360 m$.

Para este valor de diâmetro o resultado obtido foi muito próximo do esperado, como visto abaixo:

Figura 13: Formato da bolha 1 - Esférica

- Formato 2: Elipsoidal

No segundo formato, os valores escolhidos para Bond e Reynolds foram: $Bo = 26,400$ e $Re = 6,170$. O que resulta em um diâmetro característico igual a: $D_c = 0,0116 \text{ m}$.

É possível observar novamente, que o resultado obtido foi muito próximo do esperado, como visto abaixo:

Figura 14: Formato da bolha 2 - Elipsoidal

- Formato 3: “Meia-lua”

Para o terceiro formato, os valores escolhidos para Bond e Reynolds foram: $Bo = 200,890$ e $Re = 28,270$, o que resulta em um diâmetro característico igual a: $D_c = 0,0320 \text{ m}$.

Como visto abaixo, para este formato, o resultado obtido não foi tão similar quanto ao esperado, mas ainda assim, possui grande semelhança com o formato mostrado no mapa. Levando em consideração que estes resultados são baseados em aproximações, pode-se considerar este resultado satisfatório.

Figura 15: Formato da bolha 3 - "meia-lua"

Com base nas comparações realizadas para os três diferentes formatos que foram testados neste item, pode-se concluir que a malha escolhida apresentou resultados bem consistentes em todos os testes, portanto conclui-se que esta poderia ser utilizada para os demais testes.

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo foram analisados a influência dos efeitos reológicos e do tamanho da bolha na velocidade de escoamento da bolha, na distribuição da pressão estática ao entorno da bolha, e no formato da bolha, assim como nos parâmetros adimensionais do número de Reynolds, Re , que relaciona a inércia do escoamento com as forças viscosas, e o número de Bond, Bo , que relaciona a flutuabilidade com as forças capilares. Para isso, são realizados testes em três diferentes concentrações de Carbopol®: 0,10%w/w, 0,15%w/w e 0,20%w/w. Nas simulações realizadas neste trabalho os efeitos da elasticidade do fluido são desprezados para reduzir o tempo das simulações. Todas as propriedades reológicas de cada uma dessas soluções estão representadas na tabela 1.

Concentração	0,10%w/w	0,15%w/w	0,20%w/w
τ_0 [Pa]	4,5900	16,570	28,500
K [Pa]	2,0220	6,0440	7,5520
n [-]	0,4197	0,3775	0,4251
σ [N/m]	0,0760	0,0760	0,0760
ρ [kg/m ³]	1000,0	1000,0	1000,0

Tabela 1: Propriedades Reológicas

Nestas análises os parâmetros adimensionais do número de Reynolds e número de Bond são definidos da seguinte forma:

$$Bo = \frac{(D_c/2)^2 \rho g}{\sigma} \quad (11)$$

$$Re = \frac{\rho v D_c}{\mu} \quad (12)$$

Onde v é a velocidade terminal da bolha.

Para cada uma das três diferentes soluções do Carbopol® são realizadas cinco simulações cada uma com diferentes diâmetros iniciais para a bolha. A escolha desses diâmetros foi feita a partir do cálculo do diâmetro crítico D_* para cada uma das soluções. O diâmetro crítico é o menor diâmetro que a bolha pode ter para conseguir superar a tensão de cisalhamento crítica, e então conseguir escoar no fluido, ou seja, é o diâmetro para o qual a força de empuxo E é maior do que a força de arraste F_D , $E > F_D$, como é mostrado a seguir:

Figura 16: Empuxo e Força de Arraste na Bolha

$$E = \rho g V \quad e \quad F_D = \tau_0 A \quad \therefore \quad E = F_D \quad \therefore \quad \tau_0 A = \rho g V$$

$$\frac{\tau_0}{\rho g} = \frac{4\pi r_*^3}{12\pi r_*^2} = \frac{r}{3} \quad \therefore \quad r_* = \frac{3\tau_0}{\rho g}$$

$$D_* = \frac{6\tau_0}{\rho g} \tag{14}$$

Os valores dos diâmetros críticos calculados para cada solução estão representados na tabela 2.

Concentração	0,10%w/w	0,15%w/w	0,20%w/w
Diâmetro crítico [m]	0.00281	0.0101	0.0174

Tabela 2: Diâmetros Críticos

A partir dos diâmetros críticos calculados para cada concentração de Carbopol® são definidos os cinco diâmetros iniciais das bolhas para cada simulação nas três diferentes soluções. A tabela 3 mostra os diâmetros iniciais D das bolhas utilizados em cada simulação, assim como a taxa de cisalhamento crítica $\dot{\gamma}_{crítica}$ definida na equação (8) para cada um destes diâmetros.

0,10%w/w		0,15%w/w		0,20%w/w	
D [m]	$\dot{\gamma}_{crítica} [s^{-1}]$	D [m]	$\dot{\gamma}_{crítica} [s^{-1}]$	D [m]	$\dot{\gamma}_{crítica} [s^{-1}]$
0,0100	0.0313	0.0200	0.0221	0.0200	0.0221
0,0150	0.0256	0.0250	0.0198	0.0250	0.0198
0,0200	0.0221	0.0300	0.0181	0.0300	0.0181
0,0250	0.0198	0.0350	0.0167	0.0375	0.0162
0,0325	0.0174	0.0400	0.0157	0.0400	0.0157
0,0350	0.0167	0.0450	0.0148	0.0450	0.0148
0,0375	0.0162	0.0475	0.0144	0.0500	0.0140

Tabela 3: Diâmetros Iniciais e Taxa de cisalhamento crítica

Nas figuras 17, 18 e 19 estão apresentados os formatos das bolhas em função do diâmetro inicial para as três concentrações do fluido Carbopol, 0,10%w/w, 0,15%w/w e 0,20%w/w, respectivamente.

Fluido com concentração de 0,10%w/w de Carbopol							
Formato da Bolha
Diametro [m]	0,010	0,0150	0,0200	0,0250	0,0325	0,0350	0,0375

Figura 17: Formato das bolhas em função do diâmetro para o fluido com 0,10%w/w de Carbopol

Fluido com concentração de 0,15%w/w de Carbopol							
Formato da Bolha
Diametro [m]	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,045	0,0475

Figura 18: Formato das bolhas em função do diâmetro para o fluido com 0,15%w/w de Carbopol

Fluido com concentração de 0,20%w/w de Carbopol							
Formato da Bolha
Diametro [m]	0,025	0,030	0,035	0,0375	0,040	0,045	0,050

Figura 19: Formato das bolhas em função do diâmetro para o fluido com 0,20%w/w de Carbopol

Analisando as figuras 17 e 18 pode-se ver que para os maiores diâmetros os formatos das bolhas passam a ficar mais achatados, enquanto que para o fluido com concentração de 0,20%w/w o mesmo não acontece. Isso ocorre pois quanto maior a velocidade final da bolha, maior será a pressão no fluido localizado acima da bolha. Essa pressão é o que faz com que a bolha tenha esse formato mais achatado. Para os fluidos com menores viscosidades a bolha consegue atingir uma velocidade terminal maior, e o mesmo ocorre a medida em que os diâmetros iniciais vão aumentando. Sendo assim, quanto maior for a velocidade terminal da bolha, mais achatado será o seu formato.

Nas figuras 20 e 21 pode-se ver os diferentes formatos das bolhas obtidos experimentalmente por Lopez [1] para as soluções com 0,10% e 0,20% do polímero Carbopol 980 NF.

Figura 20: Escoamento de bolhas de ar na concentração de 0,10%w/w de Carbopol obtido por Lopez [1].
 (a) $D_c = 0,0081 \text{ m}$. (b) $D_c = 0,0118 \text{ m}$. (c) $D_c = 0,0167 \text{ m}$. (d) $D_c = 0,0215 \text{ m}$. (e) $D_c = 0,0254 \text{ m}$. (f) $D_c = 0,0293 \text{ m}$. (g) $D_c = 0,0325 \text{ m}$.

Figura 21: Escoamento de bolhas de ar na concentração de 0,20%w/w de Carbopol obtido por Lopez [1].
 (a) $D_c = 0,0196 \text{ m}$. (b) $D_c = 0,0227 \text{ m}$. (c) $D_c = 0,0258 \text{ m}$. (d) $D_c = 0,0316 \text{ m}$. (e) $D_c = 0,0340 \text{ m}$. (f) $D_c = 0,0349 \text{ m}$. (g) $D_c = 0,0382 \text{ m}$. (h) $D_c = 0,0436 \text{ m}$.

Podemos notar que para o fluido com 0,10%w/w de Carbopol, os formatos das bolhas obtidos neste trabalho representados na figura 17, estão próximos dos resultados obtidos por Lopez para a mesma solução representados na figura 20. Mas para o fluido com 0,20%w/w de Carbopol os resultados são bastante diferentes. Na figura 19 pode-se ver que os formatos de todas as bolhas estão bem circulares, enquanto que os formatos para essa mesma solução obtidos por Lopez [1] representados na figura 21, possuem um formato parecido com o de uma gota. É importante observar que o Carbopol é um fluido viscoplástico (com tensão limite de escoamento) que apresenta elasticidade próximo a tensão limite de escoamento. Porém, a simulação numérica não considera o efeito da elasticidade. Por este motivo, observa-se a diferença entre os formatos encontrados no fluido com maior concentração de Carbopol, já que neste caso os efeitos da elasticidade são maiores.

Um outro parâmetro desse escoamento analisado neste trabalho foi a velocidade da bolha ao longo do escoamento. A relação entre a velocidade da bolha e o tempo para quatro diferentes diâmetros iniciais, podem ser observadas em cada fluido nas figuras 22, 23 e 24.

Figura 22: Gráfico para quatro diferentes diâmetros iniciais, da Velocidade no tempo para o fluido com 0,010%w/w de Carbopol

Figura 23: Gráfico para quatro diferentes diâmetros iniciais, da Velocidade no tempo para o fluido com 0,015%w/w de Carbopol

Figura 24: Gráfico para quatro diferentes diâmetros iniciais, da Velocidade no tempo para o fluido com 0,020%w/w de Carbopol

Na tabela 4 estão apresentadas as velocidades no regime permanente para cada diâmetro inicial da bolha de ar nos três fluidos estudados.

0,10%w/w		0,15%w/w		0,20%w/w	
D [m]	Velocidade [m/s]	D [m]	Velocidade [m/s]	D [m]	Velocidade [m/s]
0,0100	0,0315	0,0200	0,0033	0,0200	0,0016
0,0150	0,1448	0,02500	0,0105	0,0250	0,0028
0,0200	0,2156	0,0300	0,0442	0,0300	0,0036
0,0250	0,3054	0,03500	0,1084	0,0375	0,0051
0,0325	0,4065	0,0400	0,1515	0,0400	0,0059
0,0350	0,4151	0,0450	0,1685	0,0450	0,0671
0,0375	0,4203	0,0475	0,1710	0,0500	0,1040

Tabela 4: Velocidade em regime permanente das bolhas para todos os diâmetros testados para os fluidos com 0,010%w/w, 0,015%w/w e 0,020%w/w de Carbopol.

A partir dos dados da tabela 4 pode-se comparar os resultados obtidos numericamente neste trabalho com os resultados experimentais obtidos por William F. Lopez [1] para as velocidades terminais das bolhas em cada uma das três soluções testadas. Para isso, na figura 25, é feito um gráfico comparativo onde são plotados todos os resultados numéricos e experimentais para as velocidades terminais.

Figura 25: Velocidades terminais obtidas numericamente, e experimentalmente por William F. Lopez [1]

Por meio da figura 25 é possível notar que os resultados numéricos para a solução com menor concentração de Carbopol estão muito próximos dos dados experimentais. Este é o fluido que não teria elasticidade. A elasticidade aumenta com a concentração e isto explicaria a diferença nos casos de 0,15 e 0,20%. Essas diferenças encontradas também podem ser explicadas pelo fato da análise numérica ser bidimensional, enquanto que a análise experimental é tridimensional. Esta aproximação produz resultados diferentes, o que explica essa diferença encontrada nos dois experimentos.

A figura 26 apresenta um gráfico com a relação entre a viscosidade característica, definida na equação (6), para todos os diâmetros efetivos testados para as três diferentes concentrações do polímero Carbopol simuladas – 0,10%w/w, 0,15%w/w e 0,20%w/w.

Figura 26: Viscosidade característica para cada diâmetro efetivo nas três soluções simuladas

A partir desses resultados fica claro que quanto maior é a concentração de Carbopol, mais baixa é a velocidade da bolha no escoamento. Isso ocorre devido a viscosidade nos fluidos com maior concentração de Carbopol ser mais alta, como visto na figura 26, com isso a tensão cisalhante que atua na bolha é maior gerando assim uma força de arraste maior. Observa-se também que para diâmetros menores e, portanto, mais próximos ao diâmetro crítico, a velocidade de escoamento da bolha é muito pequena. Isso ocorre pois para os diâmetros mais próximos ao diâmetro crítico a força de empuxo que atua sobre a bolha é muito pequena, fazendo com que a bolha não consiga atingir uma velocidade muito elevada.

Para analisar os efeitos gerados no fluido pelo o escoamento da bolha, são traçados os vetores de velocidade deste escoamento, apresentados na figura 26, para diferentes diâmetros nas três diferentes soluções estudadas nesse trabalho.

Figura 27: Vetores de velocidade para três diferentes diâmetros característico testados para os fluidos com 0,10%w/w, 0,15%w/w e 0,20%w/w de concentração do polímero Carbopol.

Analisando os campos vetoriais apresentados na figura 27 nota-se que em todos os casos, a maior velocidade é alcançada na parte central da bolha, e nas proximidades laterais da bolha há uma pequena região de recirculação no fluido devido a diferença de pressão causada pelo deslocamento da bolha no fluido. Para detalhar melhor a diferença de pressão causada pelo descolamento da bolha no fluido, na figura 28 estão os mapas de pressão para três diâmetros característicos de cada solução estudada.

Figura 28: Mapas de pressão para três diâmetros característicos testados para os fluidos com 0,10%w/w, 0,15%w/w e 0,20%w/w de concentração do polímero Carbopol.

Analisando os mapas de pressão da figura 28 nota-se que conforme a bolha vai se deslocando, a pressão acima da bolha aumenta, e abaixo dela diminui. Isso ocorre devido ao fato da bolha “empurrar” parte do fluido que está a sua frente para conseguir se movimentar, gerando assim uma compressão desse fluido. Esse aumento de pressão é responsável pela alteração do formato da bolha. Olhando para figura 28 pode-se notar que para os maiores valores de pressão, mais achatada é o formato da bolha, como foi já visto neste trabalho.

Para um melhor entendimento deste escoamento são traçados os gráficos com os seguintes parâmetros adimensionais: número de Bingham, número de Reynolds e número de Bond, para todos os diâmetros testados para as três diferentes concentrações do polímero Carbopol – 0,10%w/w, 0,15%w/w e 0,20%w/w.

Na figura 29 tem-se o número de Bingham Bi para cada diâmetro característico nas três soluções simuladas. O número de Bingham faz uma comparação entre a tensão de escoamento do fluido com a tensão viscosa, de modo que para $Bi \geq 0,5$ a tensão viscosa supera a tensão de escoamento e o material se comporta com um sólido. Para valores $0 \leq Bi \leq 0,5$ a tensão de escoamento é capaz de promover o cisalhamento no fluido, e quando $Bi = 0$ temos o modelo de um fluido Newtoniano. A equação utilizada para o cálculo do número de Bingham neste trabalho é:

$$Bi = \frac{\tau_0}{\rho g \frac{D_{efetivo}}{2}} \quad (15)$$

Figura 29: Número de Bingham para cada diâmetro efetivo nas três soluções simuladas.

Como visto na figura 29 em todas as simulações realizadas o número de Bingham está entre 0 e 0,5 o que indica que o material se comporta como um fluido, e por isso, a bolha consegue se deslocar.

Na figura 30 estão representados os valores do número de Reynolds para cada valor da velocidade final de todos os diâmetros simulados nas três soluções. O número de Reynolds é um número adimensional muito utilizado na mecânica dos fluidos para determinar o tipo de escoamento de um determinado fluido. O número de Reynolds é um quociente entre as forças de inércia e as forças viscosas que atuam sobre um escoamento, neste trabalho foi determinado na equação (12).

Figura 30: Número de Reynolds para cada diâmetro efetivo nas três soluções simuladas

Observa-se que em todas as simulações os números de Reynolds encontrados foram muito baixos, caracterizando um escoamento laminar em todos os casos como era esperado. Isso se deve ao fato da viscosidade dos fluidos utilizados possuírem uma viscosidade muito elevada, e também devido ao diâmetro das bolhas simuladas serem bem pequenos. Nota-se que para o fluido com a menor concentração de Carbopol os valores de Reynolds encontrados foram significativamente maiores do que para as demais soluções. Isso ocorre devido ao fato de que neste fluido a viscosidade é muito menor e, portanto, as velocidades terminais são muito maiores fazendo com que os valores do número de Reynolds sejam maiores para os escoamentos neste fluido.

Um outro parâmetro adimensional testado foi o número de Bond, representado na figura 31. O número de Bond é geralmente utilizado no estudo do comportamento de bolhas e gotas. Ele representa a proporção entre a fluutuabilidade da bolha com a tensão superficial. Neste trabalho o número de Bond foi definido como:

$$Bo = \frac{\rho g \left(\frac{D_{efetivo}}{2} \right)^2}{\sigma} \quad (16)$$

Figura 31: Número de Bond para cada diâmetro efetivo nas três soluções simuladas

Na figura 31 pode-se ver que os números de Bond para todos os casos simulados seguem praticamente a mesma curva. E para os mesmos diâmetros efetivos, os valores do número de Bond são muito próximos nas três soluções. Isso se deve ao fato de que as tensões superficiais, e a densidade dos três fluidos são muito parecidas fazendo assim pouco diferença de uma solução para a outra.

No estudo da dinâmica de um escoamento um parâmetro de grande importância é o coeficiente de arrasto, ou coeficiente de resistência aerodinâmica. Este parâmetro é um número adimensional usado para quantificar a resistência hidrodinâmica, ou aerodinâmica existente entre uma superfície e um fluido. O coeficiente de arrasto é definido a partir de um balanço entre a força de arrasto e o empuxo no regime permanente do escoamento como é mostrado na figura 16. A tensão limite de escoamento τ_0 neste trabalho é definida da seguinte maneira:

$$\tau_0 = \frac{C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{2} \quad (17)$$

Onde A é a área superficial, e o volume da bolha dados respectivamente por:

$$A = \frac{\pi \cdot D_{eff}^2}{4}$$

$$V = \frac{\pi \cdot D_{eff}^3}{6}$$

Com isso temos que o coeficiente de arrasto é definido da seguinte maneira:

$$F_D = \tau_0 A = \rho g V$$

$$\frac{C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{2} \frac{\pi \cdot D_{eff}^2}{4} = \rho g \frac{\pi \cdot D_{eff}^3}{6}$$

$$C_d = \frac{4 \cdot g \cdot D_{eff}}{3 \cdot v^2} \quad (18)$$

A figura 32 apresenta um gráfico log-log do coeficiente de arrasto versus o número de Reynolds para todos os diâmetros testados nas três soluções de Carbopol.

Figura 32: Gráfico log-log do coeficiente de arrasto versus o número de Reynolds

Ao analisar a figura 32 é possível notar que o coeficiente de arrasto diminui conforme o número de Reynolds aumenta. Por este motivo para os fluidos com menores concentrações de Carbopol os coeficientes de arrasto encontrados são menores. Indicando que, conforme o esperado, nos fluidos com menores concentrações de Carbopol a bolha encontra menos dificuldade para se mover devido a viscosidade nesses fluidos ser menor como pode ser visto na figura 26.

5. Conclusão

Neste trabalho foram feitas diversas análises numéricas para o escoamento de uma bolha de ar em um fluido composto por uma mistura de água com Carbopol®, desconsiderando a elasticidade deste fluido. Foram testados sete diferentes diâmetros iniciais para as bolhas, em três diferentes concentrações do polímero. Para cada uma dessas simulações foram analisados diversos parâmetros do escoamento como: velocidade da bolha ao longo do tempo, vetores da velocidade, formato da bolha, gradiente de pressão, viscosidade característica, entre outros. Os dados levantados neste trabalho puderam então, ser comparados com os resultados obtidos experimentalmente por William F. Lopez [1].

Ao analisar os resultados pode-se levantar algumas tendências que puderam ser observadas em ambos os trabalhos. Pode-se ver que aumentando os diâmetros as bolhas, é possível atingir velocidades mais altas, porém, ao atingir velocidades mais altas o formato da bolha vai ficando mais achatado, o que acaba reduzindo o aumento da variação da velocidade. Um outro parâmetro que influencia diretamente a velocidade da bolha é a concentração do polímero Carbopol. Observa-se que a medida em que aumentamos a quantidade do polímero a viscosidade característica aumenta e isso faz com que a bolha tenha uma dificuldade maior em escoar pelo fluido, diminuindo assim a velocidade final da bolha.

A partir do mapa de pressão vê-se claramente o aumento de pressão provocado pelo deslocamento da bolha. A esse aumento de pressão pode-se relacionar a mudança no formato da bolha, uma vez em que para maiores gradientes de pressão a bolha se torna mais achatada.

Uma vez em que os efeitos da elasticidade do fluido não foram considerados neste trabalho, ao comparar os resultados deste trabalho com os resultados obtidos por William F. Lopez [1] fica claro o efeito gerado pela elasticidade do fluido. Pode-se ainda observar que para as soluções com maiores concentrações do polímero Carbopol os efeitos elásticos são ainda mais evidentes. Quando comparados os formatos das bolhas para o fluido com 0,20%w/w de Carbopol pode-se ver que quando a elasticidade é considerada surge uma cauda, e o formato da bolha fica próximo ao formato de uma gota. No entanto quando não considerada a elasticidade do fluido, o formato da bolha é ligeiramente achatado, não sofrendo grandes modificações. Essa

diferença no formato da bolha faz com que as velocidades terminais quando elasticidade é considerada, sejam maiores, pois neste caso, o formato gerado possui melhor hidrodinâmica fazendo com que a força de arraste sobre a bolha é menor.

De modo geral pode-se concluir que os resultados obtidos numericamente e experimentalmente para este tipo de escoamento são muito semelhantes, e a partir desses resultados é possível um melhor entendimento desse escoamento que pode ser aplicado em diversas áreas em futuras pesquisas.

6. Referências Bibliográficas

- [1] WILLIAM F. LOPEZ, MÔNICA F. NACCACHE, PAULO R. DE SOUZA MENDES. Experiments of air bubble rising in yield stress fluids.
- [2] C. W. HIRT AND B. D. NICHOLS. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries.
- [3] MANOJ KUMAR TRIPATHI, KIRTI CHANDRA SAHU, GEORGE KARAPETSAS, OMAR K MATAR. Bubble rise dynamics in a viscoplastic material.
- [4] JÚLIO CÉSAR SANTOS NASCIMENTO. Simulador de Escoamento Multifásico em Poços de Petróleo (SEMPP).
- [5] TASOS C. PAPANASTASIOU. Flows of Materials with Yield.
- [6] DIRLAINE OLIVEIRA DA COSTA, JULIANA DE CASTRO LOPES. Tecnologia dos métodos de controle de poço e *blowout*.
- [7] A. ABDU, A. A. ALICKE, W. L. CANDELA, M. F. NACCACHE, P. R. DE SOUZA MENDES. Gas Migration in Viscoplastic Fluids
- [8] J. TSAMOPOULOS, Y. DIMAKOPOULOS, N. CHATZIDAI, G. KARAPETSAS AND M. PAVLIDIS. Steady bubble rise and deformation in Newtonian and viscoplastic fluids and conditions for bubble entrapment.
- [9] MD. TARIQUL ISLAM, P. GANESAN* AND JI CHENG. A pair of bubbles rising dynamics in a xanthan gum solution: a CFD study.
- [10] CRISTIANA DUARTE RANGEL DE ABREU. Análise do deslocamento de bolhas de gás em fluido viscoplástico.
- [11] FERNANDO V. DA SENHORA E MARCOS D. DE A. CID. Deslocamento de Bolhas de Gás Em Fluidos Viscoplásticos.
- [12] I.A. FRIGAARD N. DUBASH. Propagation and stopping of air bubbles in Carbopol solutions.
- [13] F. RAYMOND AND J.M. ROSANT. A numerical and experimental study of the terminal velocity and shape of bubbles in viscous liquids.
- [14] D. SIKORSKI, H. TABUTEAU, AND J. R. DE BRUYN. Motion and shape of bubbles rising through a yield-stress fluid.

- [14] http://www.sinmec.ufsc.br/site/arquivos/x-xwrkamlv mz_2005_emilio_tese.pdf
- [15] <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node880.htm>
- [16] http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/h/herschel-bulkley_fluid.aspx
- [17] <http://iopscience.iop.org/article/10.1209/0295-5075/87/38004/fulltext/>
- [18] <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node297.htm>
- [19] http://www.fem.unicamp.br/~ffranca/MultiPhase_2008_01.pdf
- [20] https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/13887/13887_1.PDF