

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**SARAH NUNES ARGENTIN**

**SIMULAÇÃO DO BOMBEIO DE COLCHÃO VISCOSO PARA  
LIMPEZA DE CASCALHOS EM POÇOS DE ALTO AFASTAMENTO**

**CURITIBA**

**2022**

**SARAH NUNES ARGENTIN**

**SIMULAÇÃO DO BOMBEIO DE COLCHÃO VISCOSO PARA  
LIMPEZA DE CASCALHOS EM POÇOS DE ALTO AFASTAMENTO**

**Simulation of sweeping pills for the cleaning of extended reach oil wells**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado para como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Admilson Teixeira Franco.

Co-orientadores: Dr. Alan Lugarini de Souza e Prof. M. Eng. Joviano Janjar Casarin.

**CURITIBA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**SARAH NUNES ARGENTIN**

**SIMULAÇÃO DO BOMBEIO DE COLCHÃO VISCOSO PARA  
LIMPEZA DE CASCALHOS EM POÇOS DE ALTO AFASTAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação  
apresentado para como requisito para a  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 22/ Junho/2022

---

Admilson T. Franco  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Silvio Luiz de Mello Junqueira  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Eduardo Matos Germer  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2022**

Aos meus pais Edson e Inês, pelo amor e carinho dados a mim. Este trabalho é fruto da dedicação de vocês.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos meus pais Edson e Inês por todo amor e ensinamentos dados ao longo da minha vida. Também à minha irmã Marcela com quem aprendi muito.

Aos meus amigos Aline e o Murilo por todos os momentos de descontração e apoio.

Aos colegas do LABFlow do CERNN por todos os momentos de aprendizado e risadas.

Aos engenheiros Joviano Casarin e Alan Lugarini, por toda ajuda (que não foi pouca), paciência e ensinamentos para a execução do presente trabalho. Sem a ajuda deles, o estudo das partículas seria muito mais difícil.

Por fim, a todos os mestres que tive. Em especial ao professor Admilson, grande mestre da área das ciências térmicas da UTFPR.

## RESUMO

ARGENTIN, Sarah Nunes. **Simulação do bombeio de colchão viscoso para limpeza de cascalhos em poços de alto afastamento.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

A limpeza adequada de poços de petróleo é crucial para evitar problemas como travamento da coluna de perfuração ou danos ao reservatório. Os colchões viscosos são opções viáveis, pois não oferecem risco significativo para a integridade do poço e não requerem a remoção do tubo de perfuração. O colchão viscoso é um pequeno volume de fluido com maior densidade e viscosidade do que o fluido de perfuração. Conseqüentemente, pode carrear cascalhos para longe das áreas de bloqueio. É visada a simulação e análise o processo de limpeza de poço de alto afastamento por bombeio de colchões viscosos. A reologia do colchão viscoso é o foco principal da investigação. A modelagem do escoamento líquido-sólido utiliza a abordagem euleriana-lagrangiana. Assim, as fases fluida e sólida são tratadas separadamente e acopladas em quatro vias. Para as interações entre as fases líquida e sólida, é implementado o modelo de fase discreta, enquanto as interações entre partículas adjacentes e fronteiras sólidas são resolvidas pelo método dos elementos discretos. O colchão viscoso apresenta comportamento não newtoniano pseudoplástico no qual a função viscosidade ajusta-se ao modelo Power-Law. O escoamento de fluido de perfuração em estado estacionário com leito de cascalhos foi obtido na literatura especializada, e o resultado, numérico foi utilizado como condição inicial nas presentes simulações. No instante inicial, o fluido de perfuração é substituído pelo colchão viscoso e o movimento do fluido é retomado. O colchão viscoso é bombeado até que a vazão volumétrica de  $0,006 \text{ m}^3/\text{s}$  atravesse o domínio. Em seguida, a simulação é pausada e a influência da reologia do colchão viscoso na eficiência de limpeza é analisada. Os resultados obtidos indicam que o fator de consistência é o parâmetro reológico de maior influência sobre a capacidade de carregamento de partículas de cascalho.

**Palavras-chave:** colchão viscoso; limpeza de poços; fluido de perfuração; poço de alto afastamento; CFD-DEM.

## ABSTRACT

ARGENTIN, Sarah Nunes. **Simulation of sweeping pills for the cleaning of extended reach oil wells**. 2022. Undergraduation Final Project (Mechanical Engineering Bachelor's Degree) – Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2022.

Proper oil well cleaning is crucial to avoid problems such as stuck pipe or reservoir damage. In this respect, sweeping pills are viable options because they do not offer significant risk to the well's integrity and do not require drill pipe removal. A sweeping pill is a small volume of fluid with higher density and viscosity than the drilling fluid. Hence, it can drag cuttings away from blockage areas. Simulation and analysis is aimed at the cleaning process of an extended reach well by pumping sweeping pills. The sweeping pill's rheology is the main focus of the investigation. The modeling of liquid-solid flow uses an Eulerian-Lagrangian approach. So, the fluid and solid phases are treated separately and coupled in four-way. For the interactions between the liquid and solid phases, a discrete phase model is implemented, while the particle interactions among adjacent particles and solid boundaries are solved by the discrete element method. The sweeping pill has a non-Newtonian pseudoplastic behavior in which the viscosity function follows the Power-Law model. The steady-state drilling mud flow with a cuttings bed was obtained in the specialized literature, and this numerical result was used as an initial field in the present simulations. At the initial time, the drilling fluid is replaced by the sweeping pill, and the fluid motion resumes. The sweeping pill is pumped until a volumetric flow of  $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$  crosses through the domain. Then, the simulation is paused and the influence of the sweeping pill's rheology on the cleaning efficiency is analyzed. The results obtained indicate that the consistency factor is the rheological parameter with the greatest influence on the ability to carry gravel particles.

**Keywords:** sweeping pill; wellbore cleaning; drilling fluid; extended-reach well; CFD-DEM.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação do processo de limpeza de poço de petróleo e variáveis significativas. (a) corte longitudinal. (b) corte transversal. (c) representação de poço inclinado em relação à vertical. ....	14
Figura 2 - Representação da geometria do poço horizontal e dos cascalhos a ser estudada. (a) Representação do poço com o colchão viscoso (região em laranja) e com as partículas sólidas. (b) Corte longitudinal vertical na região horizontal do tubo. ....	17
Figura 3 - Configurações esquemáticas de escoamento líquido-sólido em tubo de seção anular e horizontal. ....	21
Figura 4- Parâmetros de processo que influenciam na eficiência de limpeza de poço. ....	22
Figura 5 - Queda de pressão em função da velocidade do escoamento. ....	23
Figura 6- Sistema mecânico mola-amortecedor. ....	36
Figura 7- Esquema de aproximação, colisão e sobreposição de partículas. ....	37
Figura 8- (a) Esquema de sobreposição entre duas partículas decorrente do processo de colisão, onde a sobreposição é decomposta em componentes normal e tangencial. (b) Ilustração de como as forças e dissipações energéticas são tratadas no DEM. ....	38
Figura 9- Geometria do problema de escoamento bifásico líquido-sólido em seção anular excêntrica. ....	41
Figura 10- Volume de controle cilíndrico para a integração das equações de transporte. ....	43
Figura 11- Fluxograma do ciclo de modelagem do acoplamento entre método de volumes finitos e método dos elementos discretos (CFD-DEM). ....	51
Figura 12- Representação do problema estudado por Mordant e Pinton (2000). ....	54
Figura 13- Comportamento da partícula em função do passo de tempo da fase fluida utilizada. (a) malha 0,5 x 0,5 x 0,5 [mm] (b) malha 1 x 1 x 1 [mm] (c) malha 2 x 2 x 2 [mm]. ....	55
Figura 14- Representação do problema estudado por Gondret et al. (2002). Colisões de partícula com parede. ....	57
Figura 15- Comparação de resultados experimentais Gondret et al. (2002) para colisão inelástica de partícula de Teflon em ar. ....	59
Figura 16- Comparação de resultados experimentais Gondret et al. (2002) para colisão inelástica de partícula de Aço em RV10. ....	60
Figura 17- Evolução temporal do leito obtido via simulação por Pivovarski. ....	62

Figura 18 - Evolução temporal do leito obtido via simulação para o presente trabalho. ....	62
Figura 19- Perfil da malha utilizada. ....	65
Figura 20- Valores para a interação partícula-partícula. ....	65
Figura 21- Valores para a interação partícula-parede.....	65
Figura 22- Gráfico da vazão de colchão viscoso utilizado nas simulações.....	67
Figura 23- Leito de partículas do Fluido 1 para as vazões de entrada do colchão viscoso. (a) 30 GPM. (b) 50 GPM. (c) 70 GPM. (d) 100 GPM.....	69
Figura 24- Leito de partículas do Fluido 2 para as vazões de entrada do colchão viscoso. (a) 30 GPM. (b) 50 GPM. (c) 70 GPM. (d) 100 GPM.....	70
Figura 25- Leito de partículas do Fluido 3 para as vazões de entrada do colchão viscoso. (a) 30 GPM. (b) 50 GPM. (c) 70 GPM. (d) 100 GPM.....	71
Figura 26- Queda de pressão em função do tempo para os Fluidos 1, 2 e 3. Analisadas a partir de $t = 6$ s. ....	73
Figura 27- (a) Concentração de partículas em função do tempo para o Fluido 1. (b) Vazão mássica de partículas em função do tempo para o Fluido 1. Analisadas a partir de $t = 6$ s. ....	74
Figura 28- (a) Concentração de partículas em função do tempo para o Fluido 2. (b) Vazão mássica de partículas em função do tempo para o Fluido 2. Analisadas a partir de $t = 6$ s. ....	75
Figura 29 - (a) Concentração de partículas em função do tempo para o Fluido 3. (b) Vazão mássica de partículas em função do tempo para o Fluido 3. Analisadas a partir de $t = 6$ s. ....	76
Figura 30- Comparativo das concentrações de partículas para cada fluido utilizado, analisados a partir de $t = 6$ s. ....	77
Figura 31- Velocidade de partículas para o Fluido 4.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Características da tubulação, fluido e partículas utilizadas nas simulações. ....	27
Tabela 2– Características dos fluidos utilizados nas simulações. ....	28
Tabela 3- Sumário dos parâmetros para a colisão normal. ....	57
Tabela 4- Dados referentes às fases líquida e sólida no trabalho de Pivovarski (2018). ....	61
Tabela 5-Parâmetros numéricos utilizados no trabalho de Pivovarski (2018). ....	62
Tabela 6- Vazões utilizadas nas simulações. ....	66
Tabela 7- Parâmetros utilizados para o cálculo do valor de Reynolds. ....	68
Tabela 8 - Cálculo da eficiência dos fluidos utilizados na simulação. ....	77
Tabela 9- Proposta de grade de simulações. ....	79

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Caracteres latinos

$A$	Área	$[\text{m}^2]$
$Bi$	Número de Bingham	$[-]$
$C$	Concentração em volume ou fração volumétrica.	$[\%]$
$C_D$	Coefficiente de arrasto	$[-]$
$C_e$	Coefficiente de empuxo	
$C_{n,rest}$	Coefficiente de restituição normal	$[-]$
$C_{sf}$	Coefficiente de atrito estático	$[-]$
$C_{t,rest}$	Coefficiente de restituição tangencial	$[-]$
$d$	Diâmetro	$[\text{m}]$
$dx$	Deslocamento infinitesimal na direção $x$	$[\text{m}]$
$E$	Módulo de elasticidade	$[\text{Pa}]$
$\hat{e}$	Vetor unitário	$[-]$
$F$	Força	$[\text{N}]$
$f$	Fator de atrito	$[-]$
$g$	Aceleração da gravidade	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
$G$	Módulo de elasticidade ao cisalhamento	$[\text{Pa}]$
$I$	Momento de inércia em torno do eixo de simetria	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$
$i, j, k$	Vetores unitários	
$II_{2D}$	Segunda invariante do tensor taxa de deformação para cisalhamento simples	
$k$	Constante de rigidez	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$
$L$	Comprimento. Dimensão característica.	$[\text{m}]$
$m$	Índice de consistência do fluido	$[\text{Pa}\cdot\text{s}^n]$
$M$	Massa	$[\text{kg}]$
$n$	Índice de lei de potência	$[-]$

$n_k$	Quantidade de fases	[-]
$P$	Pressão	[Pa]
$q$	Vazão	[L·s <sup>-1</sup> ]
$q_0$	Vazão crítica	[L·s <sup>-1</sup> ]
$r$	Raio	[m]
$\mathbf{r}$	Vetor posição	[m]
Re	Número de Reynolds	[-]
$s$	Razão entre as massas específicas da partícula e do fluido	[-]
$S_{\square}$	Termo fonte	
$SF$	Fator de sólidos	[-]
St	Número de Stokes	
$t$	Tempo	[s]
$T_c$	Torque	[N·m]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$\mathbf{v}$	Vetor velocidade	[m·s <sup>-1</sup> ]
$V$	Velocidade	[m·s <sup>-1</sup> ]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$v_{sp,r}$	Velocidade de sedimentação restringida	[m·s <sup>-1</sup> ]
$v_{t,p}$	Velocidade terminal da partícula	[m·s <sup>-1</sup> ]
$x$	Direção $x$	
$x_v$	Fração de vórtices	[-]
$y$	Direção $y$	
$z$	Direção $z$	

## Caracteres gregos

$\beta$	Coeficiente de amortecimento	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}]$
$\beta_{ s}$	Constante	$[-]$
$\delta$	Sobreposição	$[\text{m}]$
$\Delta P$	Queda de pressão	$[\text{Pa}]$
$\Delta t$	Passo de tempo	$[\text{s}]$
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	$[\text{s}^{-1}]$
$\Gamma$	Termo difusivo	
$\mu$	Viscosidade dinâmica	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
$\nabla$	Operador vetorial diferencial	$[-]$
$\nu$	Coefficientes de Poisson	$[-]$
$\theta$	Direção tangencial	$[\text{rad}]$
$\rho$	Massa específica	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
$\tau_{ij}$	Tensor de tensões viscosas	$[\text{Pa}]$
$\omega$	Velocidade angular. Rotacional do campo de velocidades.	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$
$\xi$	Constante relativa aos regimes de escoamento líquido-sólido	$[-]$

## Subíndices

$\theta$	Direção $\theta$
$1,2,3$	Regimes de escoamento líquido-sólido
$amort$	Amortecimento
$c$	Cisalhante
$C$	Crítica
$D$	Relativo à força de arrasto
$DEM$	Método dos elementos discretos

<i>e</i>	Empuxo
<i>entrada</i>	Relativo à entrada do domínio computacional
<i>eq</i>	Equivalente
<i>ext</i>	Externo
<i>f</i>	Fluido ou fase contínua
<i>g</i>	Relativo à gravidade
<i>geom</i>	Geometria da partícula
<i>hid</i>	Hidrostática
<i>i</i>	Partícula <i>i</i>
<i>impacto</i>	Impacto
<i>int</i>	Interno
<i>j</i>	Partícula <i>j</i>
<i>k</i>	Fase <i>k</i>
<i>LDC</i>	Limite de deposição crítico
<i>LDL</i>	Limite de deposição laminar
<i>LDT</i>	Limite de deposição de transição
<i>máx</i>	Máximo
<i>mc</i>	Relativo a condições de contato
<i>md</i>	Modificado
<i>mín</i>	Mínimo
<i>mv</i>	Massa virtual.
<i>n</i>	Normal
<i>ns</i>	Relativo a escoamento monofásico
<i>p</i>	Partícula ou fase sólida. Relativo ao gradiente de pressão.
<i>parede</i>	Relativo à parede
<i>PL</i>	Fluido de lei de potência

<i>r</i>	Direção <i>r</i> .
<i>R</i>	Rotacional.
<i>Rayleigh</i>	Relacionado à propagação da onda mecânica de Rayleigh
<i>s</i>	Sedimentação. Superfície.
<i>t</i>	Tangencial
<i>v</i>	Relacionado à resposta da partícula
<i>w</i>	Monofásico
<i>z</i>	Direção <i>z</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Contextualização.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Caracterização do problema.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. Objetivos gerais .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4 Estrutura do trabalho .....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Limpeza de poços horizontais.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Bombeio de colchão viscoso .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 Objetivos específicos.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4 Síntese do capítulo .....</b>	<b>28</b>
<b>3 MODELAGEM MATEMÁTICA .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Fundamentação teórica.....</b>	<b>29</b>
3.1.1 Escoamento líquido-sólido .....	29
3.1.2 Fase Líquida .....	30
3.1.3 Fase sólida .....	32
3.1.3.1 Força de arrasto .....	33
3.1.3.2 Força decorrente do gradiente de pressão.....	33
3.1.3.3 Força de massa virtual.....	34
3.1.3.4 Forças Gravitacional e de Empuxo.....	34
3.1.3.5 Forças de contato.....	35
<b>3.2 Características do domínio e condições de contorno.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3 Síntese do capítulo .....</b>	<b>42</b>
<b>4 MODELAGEM NUMÉRICA .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Solução das equações de balanço – método dos volumes finitos .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 Escalas de tempo associadas à modelagem das partículas.....</b>	<b>46</b>
<b>4.3 Método dos elementos discretos .....</b>	<b>48</b>
<b>4.4 Acoplamento entre a fase dispersa e fase contínua .....</b>	<b>49</b>
<b>4.5 Algoritmo do acoplamento <i>CFD-DEM</i>.....</b>	<b>50</b>
<b>4.6 Síntese do capítulo .....</b>	<b>52</b>
<b>5 CASOS DE VALIDAÇÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1 Sedimentação em fluido viscoso .....</b>	<b>53</b>
<b>5.2 Colisão inelástica de partícula imersa.....</b>	<b>56</b>
<b>5.3 Formação de leito.....</b>	<b>61</b>
<b>5.4 Síntese do capítulo .....</b>	<b>63</b>
<b>6 RESULTADOS .....</b>	<b>64</b>
<b>6.1 Configurações das simulações .....</b>	<b>64</b>

6.1.1 Leito de partículas .....	68
6.1.2 Queda de pressão .....	71
6.1.3 Concentração de partículas .....	74
<b>6.2 Análise da eficiência do colchão viscoso .....</b>	<b>76</b>
<b>6.3 Síntese do capítulo .....</b>	<b>79</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>80</b>
<b>7.1 Conclusões .....</b>	<b>80</b>
<b>7.2 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>82</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

No cenário industrial atual, o petróleo desempenha papel essencial entre as mais importantes matérias-primas. Raramente encontra-se um produto ou bem que não tenha derivado de petróleo em sua constituição, ou que sua fabricação não precise, direta ou indiretamente, do petróleo. Logo, faz-se necessário o entendimento dos mecanismos envolvidos em sua produção.

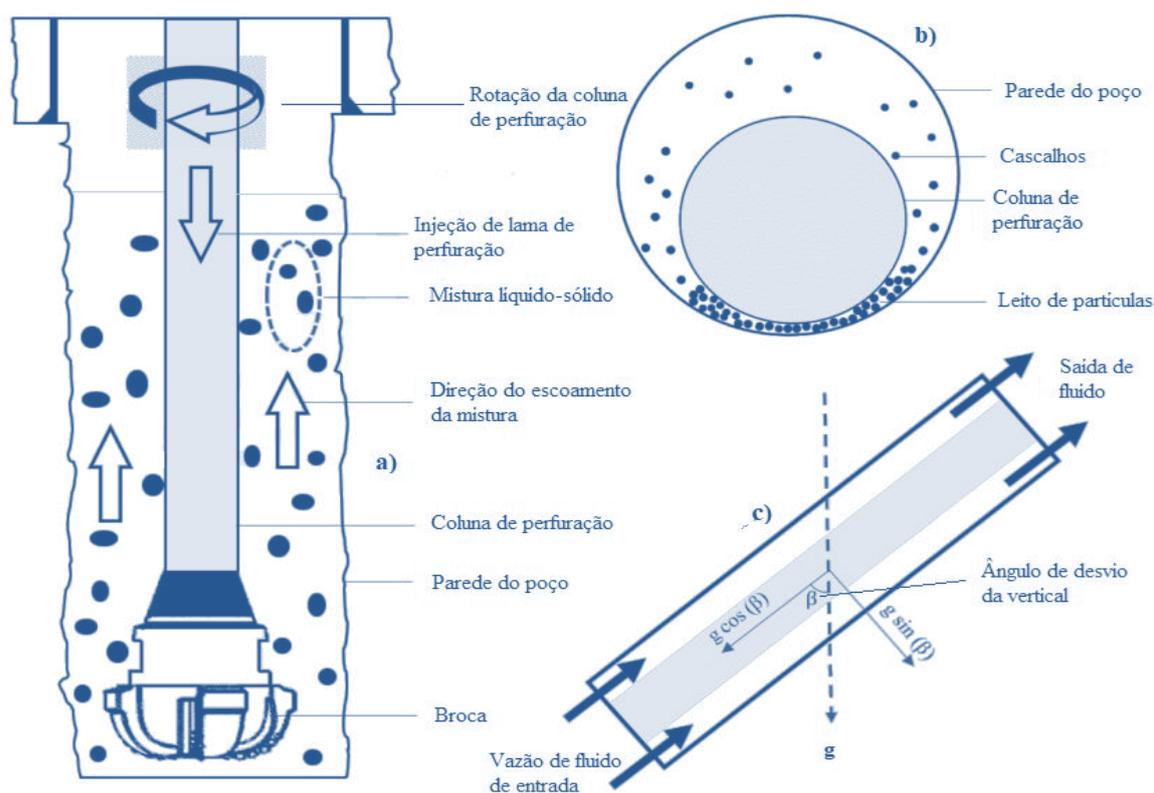
Todavia, depois de décadas de exploração, o acesso ao petróleo tornou-se mais difícil, o que ocasionou a perfuração de poços de alto afastamento e inclinados para que fosse possível chegar às reservas. Poços de alto afastamento podem ser definidos com base na razão de profundidade, a qual, é a partida horizontal dividida pela profundidade vertical. Caso essa razão seja maior do que 2, o poço é considerado de alto afastamento (CARR *et al.*, 2003).

Um dos maiores problemas ocasionados pela fuga da direção vertical é a realização da limpeza do poço. De acordo com Pilehvari *et al.* (1999), Bilgesu *et al.* (2007) e Sifferman e Becker (1992), vários problemas são ocasionados pela limpeza inadequada de poços de petróleo, como taxas de perfuração reduzidas, desgaste prematuro da ferramenta, alta demanda energética para maiores torques no equipamento e ainda a prisão da broca no local onde ocorre a perfuração. Em casos extremos, pode-se danificar as paredes do poço quando pressões muito elevadas são aplicadas para o transporte de partículas de cascalho.

Logo, torna-se necessário retratar como é realizada a limpeza de um poço de petróleo. Enquanto a broca realiza a perfuração da formação, quebrando a rocha que está à sua frente, o fluido de perfuração é injetado pelo interior da coluna até atingir a rocha perfurada. A pressão do fluido de perfuração faz com que os cascalhos sejam carregados pelo espaço anular formado entre a coluna de perfuração e a parede do poço até local apropriado. A Figura 1a apresenta o corte longitudinal ao longo de poço vertical, demonstrando como ocorre o processo de remoção de cascalhos. Já a Figura 1b mostra o corte transversal em poço inclinado, no qual é possível observar a excentricidade da coluna de perfuração – devido ao peso da coluna de perfuração – e a formação de leito de cascalhos na parte inferior, resultante da ação do campo gravitacional (BILGESU *et al.*, 2002). A Figura 1c apresenta o corte longitudinal em poço inclinado, evidenciando o ângulo de inclinação  $\beta$  em relação à vertical.

O processo de perfuração de poços de petróleo envolve bilhões de dólares (ESCUDIER *et al.*, 2002). Para as perfurações *onshore* – realizadas no continente – as despesas relacionadas à perfuração ficam em torno de 30 a 40% do custo total do poço, ao passo que nas perfurações *offshore* – efetuadas sobre lâmina d'água – a parcela relativa à perfuração abrange 60% dos custos totais do poço (FULLENBAUM *et al.*, 2016).

**Figura 1 - Representação do processo de limpeza de poço de petróleo e variáveis significativas. (a) corte longitudinal. (b) corte transversal. (c) representação de poço inclinado em relação à vertical.**



**FONTE:** adaptado de Epelle e Gerogiorgis (2017).

O processo de limpeza de poços de petróleo é realizado por meio de operações, tais como:

- Rotação da coluna de perfuração, pois por muitas vezes apenas a utilização da vazão pode não ser eficaz. O objetivo da rotação da coluna é movimentar os cascalhos, depositados na porção inferior do poço, para cima.
- Aumento da vazão de bombeio para a que a remoção dos cascalhos seja satisfatória. Contudo, a limitação relativa ao seu uso fica por conta do

aumento das perdas de carga no anular, e da possibilidade do surgimento de altas velocidades de fluido, ocasionando erosão na parede do poço.

- *Backreaming*, que consiste na manobra de bombear e rotacionar a coluna de perfuração enquanto a puxa para fora do poço, é utilizado como forma de limpeza de poço mas, esta prática é arriscada para poços de longo alcance. Segundo Rocha (2009), com o *backreaming* a limpeza do poço abaixo da broca é quase 100%. No entanto, a medida que a broca é puxada ocorre a formação de “dunas” de cascalhos na porção superior do BHA (*bottom hole assembly*) o prendendo no poço.
- A diminuição da taxa de penetração ocorre quando o limite das variáveis controladas como a hidráulica e velocidade de rotação é atingido. Contudo, a redução na taxa de penetração impacta negativamente o custo do poço, mas as vantagens em se evitar problemas na perfuração – prisão da coluna, torque e arrastes excessivos – devem compensar estas perdas (COSTA, 2006).
- Em alguns casos a circulação do fluido de perfuração não é suficiente para realizar a limpeza do poço. Então, realiza-se o bombeio de colchão viscoso (*sweeping pills*), que consiste em impulsionar no poço fluido formulado com densidade e características reológicas diferentes das encontradas no fluido de perfuração, tais como o fator de consistência e o índice de potência, com o intuito de aumentar a capacidade de carreamento de sólidos.

A proposta deste trabalho é avaliar numericamente o comportamento do escoamento líquido-sólido característico da manobra de bombeio de colchão viscoso (*sweeping pills*) para a limpeza de poços horizontais de bacias *offshore* do pós-sal da Petrobras (Bacias de Campos e do Espírito Santo).

## 1.2 Caracterização do problema

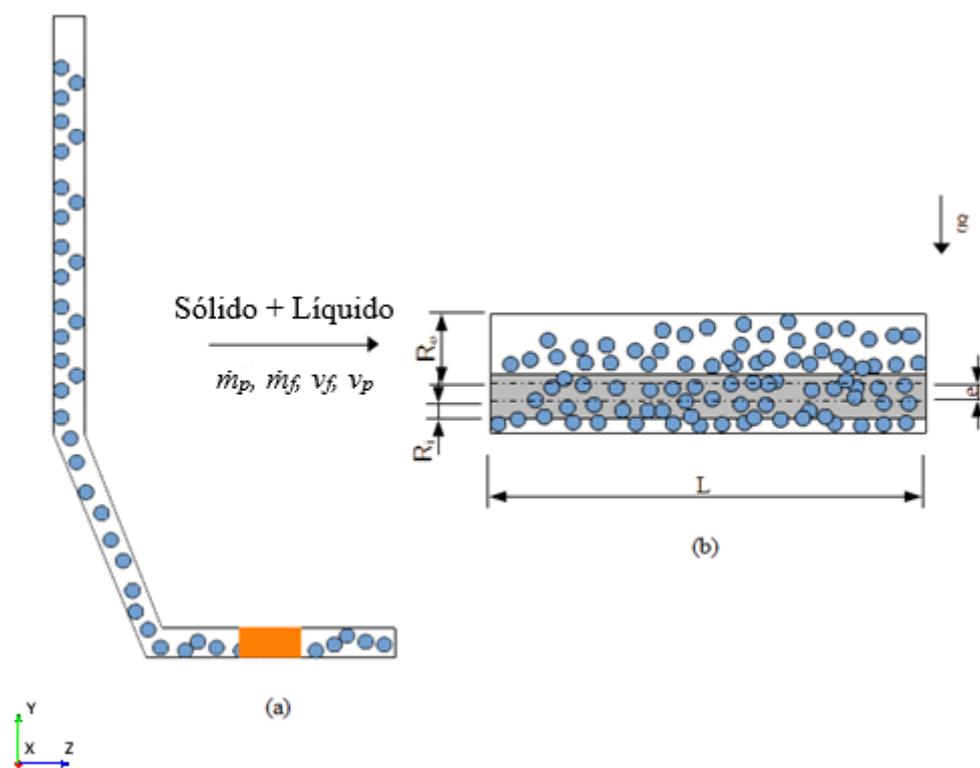
O problema de interesse é o processo de limpeza de poços horizontais de alto afastamento, onde o método utilizado é o bombeio de colchões viscosos. O colchão viscoso é um fluido formulado para que apresente características reológicas diferentes daquelas observadas no fluido de perfuração. O bombeamento do colchão viscoso ocorre de maneira gradual no poço para que possa carrear as partículas de cascalhos. É importante ressaltar que, além do bombeio do colchão viscoso, também será utilizada a rotação da coluna interna.

Para o caso em questão, serão utilizados como dados iniciais da simulação, os resultados de distribuição de cascalhos e de fluido obtidos por Casarin (2018), o qual estudou a formação de leito em fluidos não newtonianos. Tendo estes dados como ponto de partida, foi simulada a operação de bombeio de colchão viscoso.

A partir de um tempo inicial, as partículas são injetadas no fluido de perfuração e, após a formação de leito, o colchão viscoso (*sweeping pill*) é bombeado gradualmente por determinado período de tempo até que a vazão volumétrica alcance o valor de 0,006 m<sup>3</sup>/s. Após esse tempo ser atingido, a simulação é interrompida para a análise da capacidade de carregamento das partículas sólidas no interior da tubulação, ou seja, a eficiência de limpeza do fluido usado como colchão viscoso.

A Figura 2 ilustra a geometria adotada para o estudo, a qual compreende o espaço anular excêntrico, de comprimento  $L$ , raio externo ( $r_{ext}$ ), raio interno ( $r_{int}$ ), partículas sólidas de diâmetros iguais a 6,35 mm sendo utilizada a concentração de partículas sólidas igual a 5% em volume, vazão de bombeio de 100 gpm e rotação da coluna de perfuração de 50 rpm. As simulações numéricas foram realizadas por meio do programa *STAR-CCM+*<sup>®</sup>, onde o escoamento líquido-sólido foi modelado de acordo com o acoplamento 4 vias a fim de representar com maior exatidão o comportamento físico das fases sólida e líquida.

**Figura 2 - Representação da geometria do poço horizontal e dos cascalhos a ser estudada. (a) Representação do poço com o colchão viscoso (região em laranja) e com as partículas sólidas. (b) Corte longitudinal vertical na região horizontal do tubo.**



Fonte: elaborado pela autora.

### 1.3. Objetivos gerais

O principal objetivo deste trabalho é analisar a influência da reologia do colchão viscoso na limpeza de poços. A finalidade é modelar e simular numericamente o escoamento bifásico de fluido e partículas sólidas em tubo anular excêntrico horizontal para representar o fenômeno de carreamento de cascalhos. A simulação é realizada através da abordagem Euler-Lagrange que contabiliza as interações entre fluido e partículas, bem como entre partículas adjacentes e fronteiras sólidas, por meio de modelos de colisão.

## 1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se a contextualização do trabalho, mostrando para o leitor os aspectos importantes da perfuração horizontal, assim como caracterizando o problema e especificando os objetivos gerais.

No capítulo 2 a revisão da literatura é apresentada e subdividida em duas partes essenciais: limpeza de poços horizontais e bombeio de colchão viscoso. Por último, após dispor do embasamento teórico necessário, apresenta-se o enunciado dos objetivos específicos.

No capítulo 3 são fornecidos os dados a respeito da modelagem matemática das interações entre as fases e fronteiras, condições de contorno e características do domínio físico do problema.

O capítulo 4 aborda as informações referentes à dinâmica de fluidos computacional utilizada na solução das equações de transporte por meio do método de volumes finitos. Também é descrito o processo de solução das equações de transporte.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os casos de validação realizados para o trabalho, isto é, analisa-se se a metodologia aplicada é capaz de retratar adequadamente os fenômenos físicos de interesse.

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos e os discute. E, por último, o capítulo 7 mostra as conclusões retiradas dos resultados obtidos, apresentados no capítulo anterior e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os principais tópicos relacionados a limpeza de poços de petróleo horizontais, destacando o bombeio de colchões viscosos relacionados ao carreamento de partículas sólidas em tubulações.

### 2.1 Limpeza de poços horizontais

O processo de perfuração de poços de petróleo de elevada inclinação e trajetória complexa possui como ponto de maior criticidade o transporte das partículas sólidas pelo fluido de perfuração. Isto ocorre pela tendência natural, em razão da ação da gravidade, que os cascalhos têm de sedimentarem em regiões inferiores do espaço anular, formando o leito. O efeito da presença de leito de cascalhos em operações de perfuração é a elevação do atrito entre a mistura líquido-sólida e as paredes do espaço anular, o que acarreta em travamento da coluna de perfuração, e em certos casos a perda do poço em função do aumento da pressão (COSTA *et al.*, 2003).

Os fatores de maior relevância para a limpeza de poços são: as propriedades do fluido, o tamanho e forma das partículas, a velocidade média do fluido no anular, a rotação da coluna de perfuração, ângulo de inclinação do poço, a excentricidade da coluna de perfuração e a taxa de penetração. Espera-se que o aumento na vazão de fluido proporcione remoção mais eficaz de sólidos da região anular. Contudo, é necessário respeitar certos limites operacionais de elevação da vazão, tais como: densidade equivalente de circulação (ECD) e a potência do equipamento hidráulico. Conforme a inclinação do poço aumenta, Figura 1, o processo de limpeza torna-se mais complexo em função da sedimentação das partículas de cascalho. Com isso, maior pressão é requerida para que o escoamento ocorra. O posicionamento da coluna de perfuração na região inclinada do poço tem efeito importante na eficácia da remoção de cascalhos, pois pode ocasionar baixas velocidades do fluido no espaço abaixo da coluna (AZAR; SANCHEZ, 1997; LI; WALKER, 1999; JEFFERSON; ZAMORRA, 1995; KELESSIDIS; MPANDELIS, 2003).

Quando não há rotação da coluna interna, a análise do efeito da reologia do fluido de perfuração no processo de limpeza de poços direcionais mostra que quanto maior a viscosidade, maior a pressão de bombeamento no interior de poços de elevada inclinação. Maiores pressões são prejudiciais à integridade do poço e, portanto, devem ser evitadas. Em contrapartida, quanto menor a viscosidade do fluido maior a capacidade de

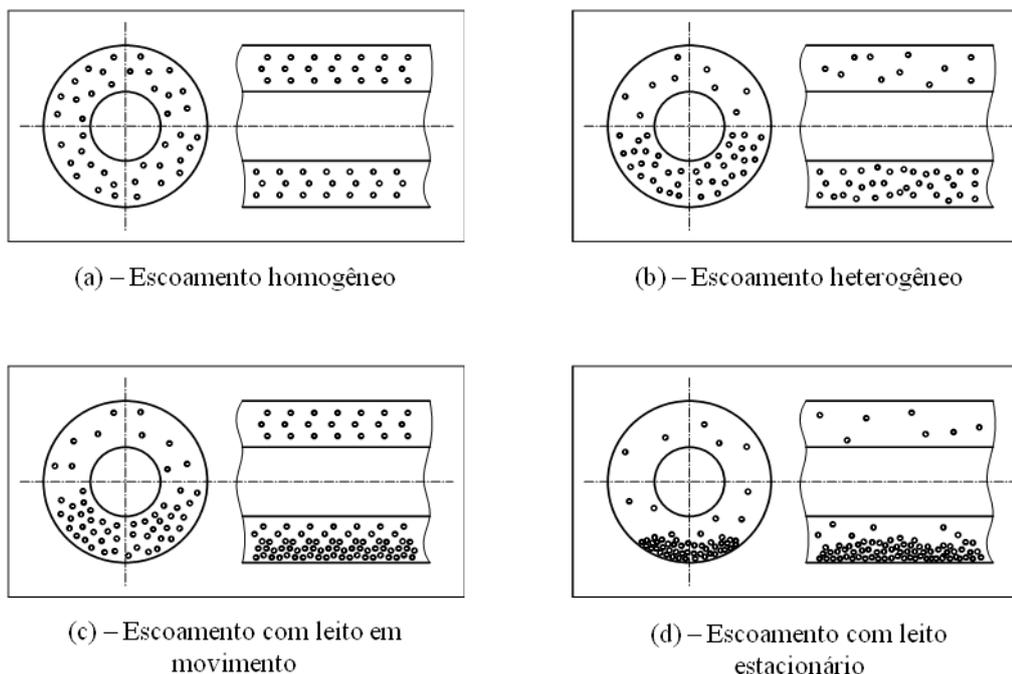
carreamento de cascalhos (OKRAJNI; AZAR, 1986). A rotação da coluna de perfuração tem efeito considerável no carreamento das partículas sólidas em poços direcionais, e a melhoria atingida na remoção dos cascalhos com a rotação da coluna é função da associação da reologia e vazão do fluido de perfuração, tamanho das partículas e inclinação do poço (BASSAL, 1995).

Segundo Crowe (2006), o escoamento líquido-sólido é caracterizado pela existência de fases dispersas e contínuas podendo ser definido como a suspensão de partículas sólidas em fluido de transporte. A fase dispersa é constituída por partículas sólidas que, de acordo com a natureza da aplicação, possuem diferentes configurações físicas e geométricas. Já a fase contínua retrata o fluido, responsável pela movimentação das partículas em razão da interação e decorrente transferência de quantidade de movimento entre as fases.

No campo do escoamento líquido-sólido, vários fatores influenciam na capacidade de movimentação das partículas sólidas. Nos sistemas de escoamento utilizados nas operações de perfuração e exploração dos poços de petróleo dados relativos ao fluido de perfuração – vazão mássica, propriedades reológicas e massa específica – e características do processo de perfuração – rotação, diâmetro, ângulo de inclinação do poço e excentricidade da ferramenta – são exemplos dos elementos que influenciam a eficiência de carreamento das partículas, visto que os principais são: a velocidade do escoamento da mistura líquido-sólida e a reologia do fluido (AKHSHIK; BEHZAD; RAJABI, 2015; ALLAHVIRDIZADEH; KURU; PARLAKTUNA, 2016). Fator adicional que influencia a capacidade de transporte das partículas é a fração volumétrica de sólidos (PEKER; HELVACI, 2008; VLASAK; CHARA, 2009).

Ainda que a dificuldade inerente ao escoamento com partículas complique a classificação e a caracterização dos limites que indicam os regimes de transição, alguns autores fazem uso das configurações apresentadas na Figura 3 como referência aos regimes de escoamento líquido-sólido (ABULNAGA, 2002; CROWE, 2006; DORON; BARNEA, 1996; PARZONKA; KENCHINGTON; CHARLES, 1981; PEKER; HELVACI, 2008).

**Figura 3 - Configurações esquemáticas de escoamento líquido-sólido em tubo de seção anular e horizontal.**



**Fonte: modificado de Kelessidis e Bandelis (2004).**

O escoamento homogêneo, Figura 3-(a), apresenta distribuição uniforme de partículas sólidas, e é caracterizado por apresentar elevada concentração volumétrica de sólidos (CROWE, 2006).

No escoamento heterogêneo, Figura 3-(b), as dimensões das partículas sólidas são relativamente maiores e apresentam maior massa específica. A organização deste escoamento apresenta uma parte disposta de maneira não uniforme e uma parcela diluída de partículas, distribuídas uniformemente no fluido (CROWE *et al.*, 2012).

O escoamento com leito em movimento, Figura 3-(c), tem como característica a ocorrência de duas regiões distintas na seção transversal do tubo. A parte superior consiste em uma mistura heterogênea, composta por fluido e partículas. E, a região inferior é formada por leito de partículas que se movem na direção do escoamento. A tendência de formação de leito é resultado da alta concentração volumétrica de partículas em associação à diminuição da velocidade do escoamento (CASARIN, 2018).

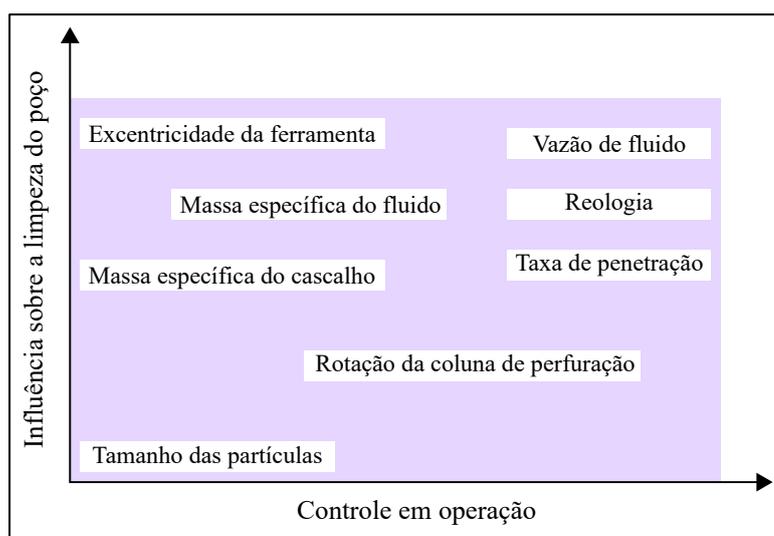
Segundo Abulnaga (2002) e Crowe (2006), deve-se evitar as condições de escoamento que levem à configuração com leito estacionário, Figura 3-(d). O agrupamento

das partículas causa aumento local da pressão e a obstrução da seção transversal do escoamento, aumentando a quantidade de energia necessária para movimentar a mistura, além de ocasionar instabilidades no processo de perfuração (KALESSIDIS; BANDELIS, 2004).

A especificação dos escoamentos líquido-sólidos depende da definição dos parâmetros que possibilitam a identificação dos limites de transição entre os regimes de escoamento. Diferentes parâmetros são apresentados por pesquisadores a partir de observações experimentais e resultados de simulações numéricas. Definir os regimes de escoamento com base em único parâmetro – tamanho de partícula, por exemplo – é considerado incompleto (ABULNAGA, 2002; CROWE, 2006; TURIAN; YUAN, 1997). O comportamento dos escoamentos bifásicos líquido-sólidos é dependente de parâmetros adicionais, como as propriedades reológicas, tendo como exemplo, quando o fluido não newtoniano é utilizado.

A escolha das condições operacionais do sistema de escoamento responsável pelo carregamento de partículas de cascalho em poços de petróleo necessita do conhecimento dos elementos que influenciam na movimentação da mistura líquido-sólida. Os parâmetros que interferem na capacidade de limpeza de poços nos processos de perfuração são agrupados conforme a Figura 4 (NAZARI; HARELAND; AZAR, 2010).

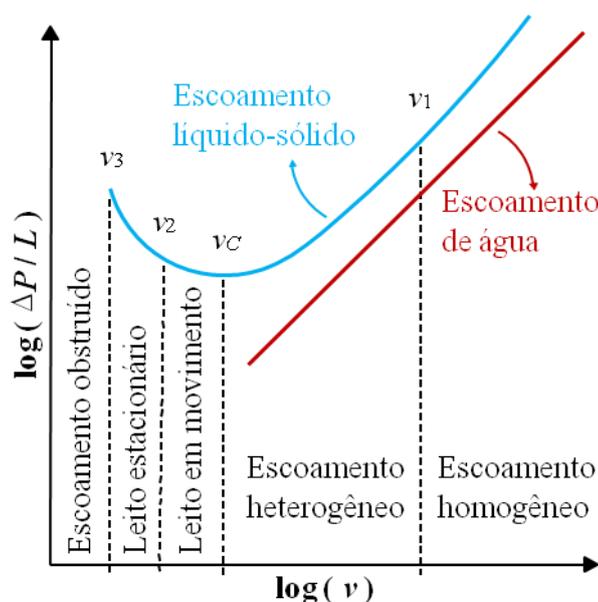
**Figura 4– Parâmetros de processo que influenciam na eficiência de limpeza de poço.**



**Fonte: (NAZARI; HARELAND; AZAR, 2010).**

De acordo com Darby e Chhabra (2017), os limites entre os regimes de escoamento dependem, de forma complexa, da massa específica e do tamanho das partículas sólidas, da viscosidade e massa específica do fluido, da fração volumétrica de sólidos e da velocidade da mistura. As velocidades de transição podem ser definidas segundo a Figura 5. Onde,  $v_1$  é a velocidade a partir da qual a mistura se movimenta com características de suspensão homogênea, entre  $v_c$  e  $v_1$  o escoamento da mistura acontece com aspecto de suspensão heterogênea. A partir de  $v_2$  o escoamento da mistura é considerado heterogêneo em razão da ação da força gravitacional, a qual intensifica a sedimentação. Em  $v_3$ , a redução da velocidade da mistura diminui a capacidade de transporte das partículas por parte do fluido. Para velocidades abaixo de  $v_3$ , ocorre a obstrução da seção transversal do escoamento da mistura por causa do acúmulo excessivo de partículas sólidas.

Figura 5 - Queda de pressão em função da velocidade do escoamento.



Fonte: Crowe (2006).

Conforme Crowe (2006), as regiões que estão delimitadas pelas velocidades de transição  $v_3$  e  $v_2$ , segundo a Figura 5, não são apropriadas para a operação de sistemas bifásicos na presença de partículas. Valores perto de  $v_c$  não são utilizados, visto que não é desejável operar os sistemas de escoamento com a linha de tubulação parcialmente bloqueada pelo leito de partículas. A diminuição da área da seção transversal do tubo resulta em aumento da perda de carga e elevação das flutuações relacionadas às condições do escoamento. Segundo Abulnaga (2002) e Crowe *et al.* (2012), as velocidades de

escoamento da mistura em torno de  $v_l$  devem ser selecionadas para uma melhor eficiência operacional do sistema.

Segundo Allahvirdizadeh, Kuru e Parlaktuna (2016), o comportamento reológico do fluido influencia o movimento das partículas ao longo do campo de escoamento de tal maneira que a eficiência de transporte de partículas sólidas também é afetada significativamente. Para Allahvirdizadeh, Kuru e Parlaktuna (2016), o aumento da viscosidade do fluido para melhorar a capacidade de carregamento das partículas sólidas, nem sempre é a resposta apropriada quando se atua com elevadas vazões.

Como muitas vezes o fluido de perfuração utilizado não consegue realizar limpeza eficiente, faz-se necessária a realização de tratamento de poços ou circulação de fluidos, chamados de colchões viscosos, especialmente formulados para a remoção dos leitos de cascalhos – e outros tipos de cascalhos que, normalmente, não seriam removidos do poço pelo fluido de perfuração. Eles são periodicamente utilizados para evitar que o acúmulo de cascalhos chegue ao ponto de interferir na broca de perfuração ou no próprio processo de perfuração (HEMPHILL, 2003).

## **2.2 Bombeio de colchão viscoso**

O bombeio de colchão viscoso é técnica empregada para auxiliar o processo de limpeza de poços de petróleo. O colchão viscoso é um volume pequeno de fluido formulado com propriedades e reologia diferentes das observadas no fluido de perfuração, como fator de consistência e índice de potência. O objetivo do colchão viscoso é a obtenção de maior capacidade de carregamento de partículas sólidas quando comparado ao fluido de perfuração, ou seja, promover o aumento da eficiência de limpeza do poço.

As experiências em campo indicam que a eficácia dos diferentes tipos de colchões viscosos varia de acordo com a inclinação do poço. Por essa razão, é recomendado que a seleção do fluido a ser usado como colchão viscoso considere as características geométricas do poço perfurado. Além disso, em função das condições de fratura e colapso da formação, é necessário considerar a manutenção da estabilidade do poço ao se formular o fluido do colchão viscoso, a fim de evitar danos ainda mais significativos às paredes do poço (CZUPRAT *et al.*, 2020).

Os colchões viscosos podem ser classificados em cinco categorias (HEMPHILL, 2010):

- Baixa viscosidade (*low-viscosity sweeps*), no qual o fluido com viscosidade mais baixa do que a do fluido de base é utilizado.
- Alta viscosidade (*high-viscosity*), onde o volume de fluido de perfuração sofre acréscimo de aditivos para tornar-se mais viscoso do que o fluido de base.
- Alta densidade (*high-density*), no qual a densidade do volume de fluido de perfuração sofre aumento para nível mais alto do que a densidade do fluido de base.
- Alta densidade / alta viscosidade (*high-density / high viscosity*), no qual o volume de fluido de perfuração é acrescido de aditivos para que tenha sua densidade aumentada.
- Em conjunto (*tandem sweeps*), onde são bombeados dois fluidos consecutivamente, compostos por quaisquer dos três listados anteriormente.

Os colchões viscosos de alta viscosidade possuem bom desempenho para a limpeza de poços verticais e próximos da vertical, não sendo a melhor opção para poços horizontais. Os efeitos da elevada viscosidade forçam inclinação ainda maior da distribuição de escoamento no poço (POWER et al, 2000).

Os colchões viscosos de alta densidade proporcionam maior capacidade de transporte da fase sólida em poços de alta inclinação. O fator mais importante associado à melhor eficiência no transporte de cascalhos é o efeito do empuxo adicionado ao sistema. Esse efeito diminui a velocidade de sedimentação das partículas sólidas, do mesmo modo que permite o fluido mais denso penetrar com mais eficiência na região inferior do poço. Porém, os colchões viscosos de alta densidade são mais eficazes quando utilizados em conjunto com a rotação da coluna de perfuração, pois, à medida que ocorre a limpeza da região anular, a maior força de empuxo sobre as partículas permite que o colchão viscoso entre no espaço anular e auxilie no processo de limpeza – o que seria difícil de conseguir sem a rotação do tubo (POWER et al, 2000; HEMPHILL; RAVI, 2006).

Nos cenários discutidos por Power *et al.* (2000), os dados de modelagem numérica coincidiram com as observações realizadas em campo, ou seja, colchões viscosos de alta densidade proporcionam melhor carregamento de cascalhos quando comparados com os

colchões viscosos de alta viscosidade em poços horizontais. Isso decorre dos efeitos que o aumento da viscosidade e da tensão limite de escoamento do fluido exercem sobre a distribuição do escoamento ao longo da seção anular. Se o fluido tiver valor baixo de tensão limite de escoamento, o aumento dessa tensão melhorará a capacidade de suspensão de sólidos do fluido até certo ponto, mas além desse valor, a eficiência de transporte diminui.

O experimento realizado por Czuprat *et al.* (2020) mostrou que os fluidos de limpeza de alta densidade tiveram maior eficácia na limpeza para poços horizontais. Já o fluido combinado (alta densidade / alta viscosidade), obteve o segundo melhor desempenho no processo de limpeza de poços horizontais, sendo considerado boa alternativa. Os fluidos de limpeza de alta viscosidade não apresentaram resultado satisfatório para a limpeza de poços de alta inclinação.

Os colchões viscosos devem ser tratados principalmente como métodos de limpeza de poços. A limpeza é feita por meio de circulação do fluido de perfuração, com vazão apropriada e sem interrupções, e não pode ser realizada apenas com o colchão viscoso. Colchões viscosos em conjunto do tipo baixa viscosidade / alta densidade são muito recomendados para o caso de desvios maiores que 35°. Os colchões viscosos de baixa viscosidade introduzem ação turbulenta, enquanto os colchões viscosos de alta densidade movem os cascalhos através da seção hidráulica do poço e realizam porcentagens mais altas de carregamento. Recomenda-se o bombeio de colchões viscosos em conjunto após a perfuração de cada fase e quando o colchão viscoso retorna ao sistema de bombeio, deve ser separado. O colchão viscoso em conjunto não é recomendado quando surgem problemas de instabilidade no poço (ALJUBRAN; AL-YAMI; MADAN, 2017).

Durante o processo de perfuração, limpar o poço intermitentemente com colchões viscosos de alta viscosidade ou alta densidade é a técnica comprovada para garantir eficiente limpeza do poço. A rotação da coluna de perfuração durante o bombeio dos colchões viscosos no poço é crítica para uma limpeza bem-sucedida. É altamente recomendável isolar os colchões viscosos do sistema ativo e/ou ajustar o ponto de escoamento no volume total de lama ativa (AL-YAMI; SCHUBERT, 2012).

O aperfeiçoamento das práticas de perfuração e a aplicação de colchões viscosos projetados pode melhorar muito a eficácia da perfuração de poços desviados. Ao se perfurar seções inclinadas, períodos de rotação com circulação devem ser aplicados para

agitar qualquer leito de cascalhos que possa se desenvolver. A circulação de colchões viscosos de alta densidade nesse momento também pode facilitar a remoção mais eficiente de sólidos no anular do tubo. Dados de PWD (*pressure while drilling*) demonstram que os colchões viscosos de alta densidade não adicionam cargas excessivas no poço em águas profundas e, portanto, podem ser usados com segurança para esse tipo de operações de perfuração (POWER et al, 2000).

### 2.3 Objetivos específicos

Após a leitura dos trabalhos sobre colchões viscosos presentes na revisão bibliográfica, foram comparados os fluidos utilizados pelos autores e por Casarin (2018). Assim, foram definidas a densidade, o fator de consistência e índice de potência dos fluidos utilizados como colchões viscosos para o presente trabalho.

Os dados do estudo de Casarin (2018), o qual investigou o escoamento de fluido de perfuração com partículas em regime permanente, que serão utilizados no presente trabalho são: as dimensões do tubo, rotação da coluna interna, vazão de fluido e as características físicas e dimensionais das partículas, os quais estão listados na Tabela 1.

A priori, foi utilizado o mesmo fluido de Casarin (2018), Fluido 1, porém, para que o objetivo do trabalho fosse atingido, fez-se necessária a modificação de parâmetros reológicos para a análise da eficiência do colchão viscoso. Logo, foram modificados o fator de consistência ( $m$ ), o índice de potência ( $n$ ) e a densidade do colchão viscoso ( $\rho_f$ ), apresentados na Tabela 2.

**Tabela 1– Características da tubulação, fluido e partículas utilizadas nas simulações.**

<b>Tubo anular</b>	<b>Partícula</b>	<b>Condições de escoamento</b>
$L = 6 \text{ m}$	$d_p = 6,35 \text{ mm}$	$Q_f = 100 \text{ gpm}$
$r_{ext} = 0,0635 \text{ m}$	$\rho_p = 2651,1 \text{ kg/m}^3$	$\Omega = 50 \text{ rpm}$
$r_{int} = 0,02413 \text{ m}$		
$\beta = 80^\circ$		
$e = 0,5$		

Fonte: (CASARIN, 2018).

**Tabela 2– Características dos fluidos utilizados nas simulações.**

	<b>Fluido 1</b>	<b>Fluido 2</b>	<b>Fluido 3</b>	<b>Fluido 4</b>
$m$ [Pa.s <sup>n</sup> ]	0,2825	0,8500	0,2825	0,2825
$n$	0,64	0,64	0,9	0,64
$\rho_f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1012,15	1012,15	1012,15	1100

**Fonte: Elaborado pela autora.**

Para analisar eficiência do colchão viscoso com vazão constante foi utilizada a massa inicial de cascalhos ( $m_0$ ), avaliada no tempo inicial ( $t_i$ ) e a massa final de cascalhos ( $m_f$ ), avaliada após determinado intervalo de tempo ( $t_f$ ). Assim, para o cálculo da eficiência ( $\varepsilon$ ), a qual varia de 0 a 1, do colchão viscoso pode-se utilizar a relação matemática representada pela Equação (1):

$$\varepsilon = \frac{(m_0 - m_f)}{m_0} \quad (1)$$

## 2.4 Síntese do capítulo

Nesse capítulo, o processo de limpeza de poços de petróleo é fundamentado e a revisão bibliográfica é apresentada, possibilitando a definição dos objetivos específicos. Avaliando os tipos de colchões viscosos apresentado na revisão bibliográfica, é definido o tipo de colchão viscoso utilizado no presente trabalho, apresentado na Tabela 2. A utilização de colchões viscosos é avaliada considerando o escoamento líquido-sólido. O escoamento bifásico é modelado na escala da partícula através de abordagem híbrida Euler-Lagrange.

### 3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo serão apresentadas as equações utilizadas na formulação do problema de escoamento líquido-sólido de fluido não newtoniano em seção anular excêntrica. Também serão descritas as condições de contorno aplicadas aos elementos ao longo do domínio, a configuração geométrica do sistema de escoamento e as características relacionadas ao fluido de transporte.

#### 3.1 Fundamentação teórica

##### 3.1.1 Escoamento líquido-sólido

É possível representar o escoamento bifásico líquido-sólido em três escalas espaciais: a microscópica, a mesoscópica e a macroscópica (Ni *et al.*, 2006; Tsuji *et al.*, 2008; Xu e Yu, 1997; Yu e Xu, 2003). As escalas espaciais se limitam para as magnitudes micro e macroscópica cuja diferença consiste na identificação individual de cada partícula por meio da interface fluido-partícula. Na escala macroscópica, tanto as partículas sólidas quanto o fluido são considerados como meio contínuo, onde é impossível diferenciar a fase contínua da dispersa. As informações específicas a respeito de cada fase não estão disponíveis, e o acompanhamento do escoamento é feito através das propriedades macroscópicas, tais como vazão e perda de carga (POLETTI, 2017).

As escalas micro e mesoscópica são semelhantes, visto que em ambas as partículas sólidas são visivelmente identificáveis, apenas diferenciando-se na forma como as interações fluido-partícula são analisadas. Para a escala microscópica, o escoamento é resolvido em nível do fluido, de maneira que é possível verificar a camada limite cinética com a formação de esteira e vórtices (POLETTI, 2017).

Pode-se representar o escoamento bifásico líquido-sólido na escala mesoscópica, ou escala da partícula, o que possibilita a utilização de dois métodos numéricos onde a principal diferença está na forma como a fase sólida é tratada. No Modelo de Fase Discreta (*Discrete Phase Model – DPM*) a movimentação das partículas é avaliada em abordagem lagrangiana considerando as partículas como entidades discretas. Neste modelo, as partículas são menores do que os volumes de controle do fluido, de maneira que torna impossível a simulação numérica da formação das camadas limites. Diante disso, os efeitos

da partícula sobre o fluido, e vice-versa, são analisados através dos termos que contabilizam a transferência de massa e quantidade de movimento (Peker e Helvaci, 2008). A simulação pelo método DPM é realizada por meio da abordagem híbrida de Euler-Lagrange considerando os efeitos do acoplamento de quatro vias. Loth (2006) caracterizou os regimes de acoplamento como:

- Acoplamento de uma via: quando o escoamento afeta o movimento das partículas;
- Acoplamento de duas vias: o movimento da fase fluida também é afetado pelas partículas;
- Acoplamento de três vias: quando a camada limite resultante do movimento da partícula influencia o movimento das partículas adjacentes;
- Acoplamento de quatro vias: quando o atrito e a colisão influenciam o movimento global das partículas e, conseqüentemente, o escoamento.

### 3.1.2 Fase Líquida

A existência de partículas sólidas no fluido é computada na equação de balanço de massa para a fase líquida (Ishii e Hibiki, 2011):

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_f \rho_f) + \nabla \cdot (C_f \rho_f \mathbf{v}_f) = 0 \quad (2)$$

onde  $\nabla$  é o operador vetorial diferencial,  $C_f$  é a fração volumétrica de fluido definida na Equação (3) e  $\mathbf{v}_f$  o vetor velocidade do fluido [m/s], definida na Equação (4).

$$C_f = 1 - C_p \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_f = \hat{e}_r v_{f,r} + \hat{e}_\theta v_{f,\theta} + \hat{e}_z v_{f,z} \quad (4)$$

com  $\hat{e}_r$ ,  $\hat{e}_\theta$  e  $\hat{e}_z$  representando os vetores unitários nas direções  $r$ ,  $\theta$  e  $z$  respectivamente. E,  $v_{f,r}$  é a velocidade do fluido na direção  $r$  [m/s],  $v_{f,\theta}$  é a velocidade do fluido na direção  $\theta$  [m/s] e  $v_{f,z}$  é a velocidade do fluido na direção  $z$  [m/s].

Ishii e Hibiki (2011) definem a equação de balanço de quantidade de movimento para a fase contínua como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_f \rho_f \mathbf{v}_f) + \nabla \cdot (C_f \rho_f \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f) = -\nabla(C_f \hat{p}) - \nabla \cdot (C_f \boldsymbol{\tau}_{ij}) \quad (5)$$

com  $\nabla(C_f \hat{p})$  sendo o gradiente de pressão [Pa], definido na Equação (6) e  $\boldsymbol{\tau}_{ij}$  o tensor de tensões viscosas, definido pela Equação (7):

$$\nabla(C_f \hat{p}) = C_f (\nabla P - \rho_f \mathbf{g}) \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{rr} & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{r\theta} & \tau_{\theta\theta} & \tau_{\theta z} \\ \tau_{rz} & \tau_{\theta z} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde  $P$  é a pressão do fluido [Pa] e  $\mathbf{g}$  é o vetor aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>], Equação (8):

$$\mathbf{g} = \hat{e}_r g_r + \hat{e}_\theta g_\theta + \hat{e}_z g_z \quad (8)$$

com  $g_r$ ,  $g_\theta$  e  $g_z$  sendo as componentes da aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>], direções  $r$ ,  $\theta$  e  $z$ , respectivamente.

O modelo Power-law, ou modelo de Ostwald de Waele, estabelece a viscosidade de fluido não newtoniano através da Equação (9) (Bird *et al.*, 1987):

$$\mu = m (\dot{\boldsymbol{\gamma}})^{n-1} \quad (9)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica [Pa·s],  $m$  o índice de consistência [Pa·s<sup>n</sup>],  $n$  o índice de comportamento não newtoniano do escoamento (ou índice de lei de potência) e  $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$  o tensor simétrico de taxa de deformação.

### 3.1.3 Fase sólida

Para que se possa modelar o comportamento da fase sólida utilizando o método de elementos discretos, deve-se utilizar a orientação das partículas ao longo do campo de escoamento. De acordo com Crowe *et al.* (2012), é de suma importância levar em conta a Equação da quantidade de movimento angular da partícula descrita na Equação (10):

$$\mathbf{I}_p \frac{d}{dt}(\boldsymbol{\omega}_p) = \mathbf{T}_p \quad (10)$$

onde  $\mathbf{I}_p$  é o momento de inércia da partícula em torno do eixo de simetria [ $\text{kg.m}^2$ ],  $\boldsymbol{\omega}_p$  é a velocidade angular da partícula [ $\text{rad/s}$ ] e  $\mathbf{T}_p$  é o torque que atua sobre a partícula [ $\text{N.m}$ ] devido aos momentos produzidos pelas forças de resistência ao rolamento,  $\mathbf{T}_{\text{rolamento}}$ , e de qualquer outra força de contato que aja sobre a partícula.

$$\mathbf{T}_p = \sum_{\text{contatos}} (\mathbf{r}_p \times \mathbf{F}_{mc} + \mathbf{T}_{\text{rolamento}}) \quad (11)$$

com  $\mathbf{r}_p$  sendo o vetor posição, medido a partir do centro de gravidade da partícula até o ponto de contato [ $\text{m}$ ],  $\mathbf{F}_{mc}$  a força de contato conforme o modelo utilizado para a caracterização das interações entre fases [ $\text{N}$ ].

Shook e Roco (1991) descreveram a movimentação de partícula de massa  $M$  ao longo do campo de escoamento através da Equação (12),

$$M \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_b \quad (12)$$

onde  $\mathbf{v}_p$  é a velocidade instantânea da partícula [ $\text{m/s}$ ],  $M$  é a massa da partícula [ $\text{kg}$ ],  $t$  é o tempo [ $\text{s}$ ],  $\mathbf{F}_s$  é a resultante das forças de superfície atuantes sobre a partícula [ $\text{N}$ ], Equação (13),  $\mathbf{F}_b$  é a força de corpo [ $\text{N}$ ], Equação (14).

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_{vm} \quad (13)$$

em que  $\mathbf{F}_d$  é a força de arrasto sobre a partícula [ $\text{N}$ ], Equação (16),  $\mathbf{F}_p$  é a força por efeito do gradiente de pressão [ $\text{N}$ ], Equação (19), e  $\mathbf{F}_{vm}$  é a força de massa virtual, definida pela Equação (20).

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_{c|DEM} \quad (14)$$

onde  $\mathbf{F}_g$  é a força gravitacional [N], Equação (21),  $\mathbf{F}_e$  é a força de empuxo [N], Equação (15), e  $\mathbf{F}_{c|DEM}$  é a força de repulsão por causa das colisões [N], Equação (15).

$$\mathbf{F}_{c|DEM} = \sum_{\text{contatos}} \mathbf{F}_{mc} \quad (15)$$

### 3.1.3.1 Força de arrasto

Partículas que se movem imersas em fluido estão sujeitas a forças de superfície, como força de arrasto,  $\mathbf{F}_d$ , a qual atua no sentido oposto ao da velocidade do fluido e se desenvolve em razão da redução da velocidade nas regiões que estão próximas à fronteira da partícula. Quando ocorre a estagnação da velocidade, tem-se o aumento da pressão local. Crowe *et al.* (2012) determinou a equação para a força de arrasto atuante sobre partícula esférica que se move no fluido, Equação (16).

$$\mathbf{F}_d = \frac{1}{2} \rho_f C_d A_p |\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p| (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p) \quad (16)$$

onde  $A_p$  é a área projetada da partícula normal ao sentido da velocidade [m<sup>2</sup>].

Atapattu, Chhabra e Uhlherr (1995) utilizam a equação modificada de Schiller-Naumann, Equação (17), para o cálculo do coeficiente de arrasto da partícula esférica que se move em fluido Power-Law.

$$C_D = \frac{24}{Re_{PL}} (1 + 0,15 Re_{PL}^{0,687}) \quad Re_{PL} \leq 1000 \quad (17)$$

sendo  $Re_{PL}$  o número de Reynolds da fase dispersa, definido na Equação (18), para o escoamento de fluido Power-Law:

$$Re_{PL} = \frac{\rho_f |\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p|^{2-n} d_p^n}{m} \quad (18)$$

### 3.1.3.2 Força decorrente do gradiente de pressão

A Equação (19) caracteriza as forças de superfície associadas ao gradiente de pressão analisado no campo de escoamento.

$$\mathbf{F}_p = -V_p \nabla P_{estática} \quad (19)$$

com  $V_p$  representando o volume da partícula [ $m^3$ ] e  $P_{estática}$  a pressão estática do fluido [Pa].

### 3.1.3.3 Força de massa virtual

Devido ao gradiente de velocidade que se desenvolve ao longo do domínio, as partículas sólidas estão submetidas a acelerações no campo de escoamento. Logo, são observadas forças que desaceleram o movimento da partícula. Auton, Hunt e Prud'homme (1988) utilizam a Equação (20) para o cálculo da força de massa virtual.

$$F_{mv} = C_{mv} \rho V_p \left[ \frac{D}{Dt}(\mathbf{v}_f) - \frac{d}{dt}(\mathbf{v}_p) \right] \quad (20)$$

onde  $C_{mv}$  é o coeficiente de massa virtual. Para partícula esférica em escoamento uniforme, invíscido e incompressível tem o valor padrão de 0,5 (MILNE; THOMSON, 1962).

### 3.1.3.4 Forças Gravitacional e de Empuxo

As forças gravitacional e de empuxo atuam no centro de gravidade da partícula são definidos e estão descritas, respectivamente, nas Equações (21) e (22).

$$\mathbf{F}_g = \rho_p V_p \mathbf{g} \quad (21)$$

$$\mathbf{F}_e = \rho_f V_p \mathbf{g} \quad (22)$$

A diminuição na diferença entre a velocidade angular da partícula e o fluido na qual está inserida é ocasionada pelo momento atuante na partícula em decorrência do arrasto rotacional. O torque de arrasto é definido pela Equação (23) (SOMMERFELD, 2000).

$$\mathbf{T}_b = \frac{1}{2} \rho_f C_R \left( \frac{d_p}{2} \right)^5 |\boldsymbol{\omega}_r| \boldsymbol{\omega}_r \quad (23)$$

com  $C_r$  representando o coeficiente de arrasto rotacional descrito na Equação (24),  $\boldsymbol{\omega}_r$  a velocidade angular da partícula [rad/s], Equação (25), e  $Re_R$  é o Reynolds rotacional, Equação (26).

$$C_r = \begin{cases} \frac{12,9}{\text{Re}_R^{0,5}} + \frac{128,4}{\text{Re}_R}, & 32 \leq \text{Re}_R < 1000 \\ \frac{64\pi}{\text{Re}_R}, & \text{Re}_R < 32 \end{cases} \quad (24)$$

$$\boldsymbol{\omega}_r = \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v}_f - \boldsymbol{\omega}_p \quad (25)$$

$$\text{Re}_R = \frac{\rho_f d_p^2 |\boldsymbol{\omega}_r|}{\mu} \quad (26)$$

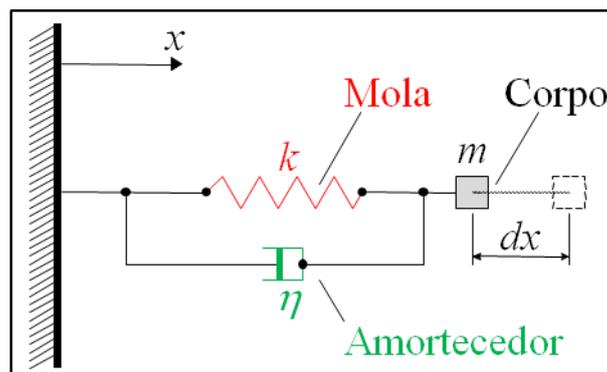
onde  $\boldsymbol{\omega}_p$  é a velocidade angular da partícula [rad/s].

### 3.1.3.5 Forças de contato

O fluido é o responsável pelo processo de carregamento das partículas sólidas ao longo do campo de escoamento bifásico. Logo, as partículas obtêm certo nível de velocidade próximo ao do fluido de transporte dependendo das propriedades relativas entre as fases. Desse modo, cada partícula possui determinada quantidade de energia cinética característica, a qual decai em função das colisões que ocorrem com elementos adjacentes e à dissipação viscosa. Conforme a concentração da fase sólida aumenta pode-se observar maior frequência de colisões entre as partículas, o que provoca acréscimo das perdas de energia cinética (CROWE *et al.*, 2012). Assim sendo, é de extrema importância realizar a caracterização dos efeitos associados à interação entre as partículas sólidas.

Cundall e Strack (1979) desenvolveram o método de elementos discretos com o intuito de simplificar os cálculos relativos aos fenômenos de colisão e contato de partículas. Com o método DEM é possível realizar simulações com alta quantidade de partículas interagindo no domínio. A movimentação da fase sólida é modelada de forma individual para cada partícula e, as interações são observadas a cada situação de contato. Para modelar as condições de contato é feita a analogia entre sistemas mecânicos massa-mola-amortecedor e a formulação é de natureza diferencial. O processo de colisão é resolvido por integração numérica das equações de movimento.

Figura 6– Sistema mecânico mola-amortecedor.



Fonte: Crowe *et al.* (2012).

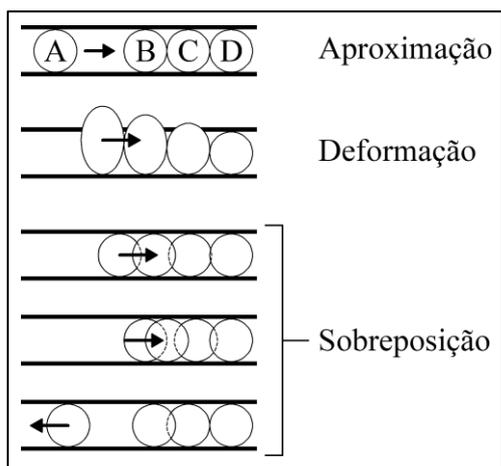
Analisando a Figura 6 pode-se observar que o movimento do corpo de massa  $M$  pode ser definido pela Equação (27).

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (27)$$

onde  $M$  é a massa do corpo [kg],  $dx$  é o deslocamento do corpo [m],  $t$  é o tempo para o deslocamento  $dx$  [s],  $\beta$  é o coeficiente de amortecimento [N·s/m] e  $k$  a constante de rigidez da mola [N/m]. De acordo com a equação (27), a relação entre a força e o deslocamento é linear, a energia cinética é dissipada no amortecedor e o trabalho efetuado pela mola é proporcional à velocidade de deslocamento da massa  $m$ .

Para a modelagem da interação entre partículas, utiliza-se o método de aproximação e colisão da partícula com grupo de partículas em contato, Figura 7. A partícula “A” desloca-se com determinada velocidade e sentido colidindo com a partícula “B”. Depois da colisão, as partículas que estão em contato sofrem deformação. A partícula de interesse é analisada levando-se em conta apenas o contato direto com as partículas próximas. De acordo com a Figura 7, a partícula “A” sofre influência apenas da partícula “B”, que por sua vez é influenciada pelas partículas “A” e “C”.

**Figura 7– Esquema de aproximação, colisão e sobreposição de partículas.**



**Fonte: Crowe *et al.* (2012).**

Como se pode visualizar na Figura 7, a deformação é substituída pela sobreposição de duas partículas e quanto maior a distância que foi sobreposta, maior será a força de repulsão. Para determinar a força de repulsão, utiliza-se a analogia com o sistema massa-mola-amortecedor, Figura 6, e o equacionamento considera a sobreposição como a deformação da mola.

Geralmente, o movimento de colisão entre partículas tem duas componentes em razão da sobreposição,  $\delta_n$  que é compreendida como a componente normal e  $\delta_t$ , componente tangencial, Figura 8(a). Devido à sobreposição de partículas, duas forças são desenvolvidas durante o contato, determinadas como força normal e força tangencial. Para modelar as forças de contato normal e tangencial entre as partículas sólidas no *STAR-CCM+*<sup>®</sup> tem-se duas abordagens: o modelo de contato de Hertz-Mindlin e o modelo de contato mola linear.



As forças que são desenvolvidas em razão do contato entre duas partículas esféricas são calculadas levando-se em consideração as constantes de rigidez normal, Equação (31), e tangencial, Equação (32).

$$k_n = \frac{4}{3} E_{eq} \sqrt{\delta_n r_{eq}} \quad (31)$$

$$k_t = 8G_{eq} \sqrt{\delta_n r_{eq}} \quad (32)$$

sendo  $E_{eq}$  o módulo de elasticidade equivalente [Pa], Equação (33),  $r_{eq}$  é o raio equivalente da partícula [m], Equação (34), e  $G_{eq}$  o módulo de elasticidade ao cisalhamento equivalente [Pa], dado pela Equação (40).

$$E_{eq} = \frac{1}{\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j}} \quad (33)$$

com  $\nu_i$  e  $\nu_j$  sendo as velocidades das partículas em contato “ $i$ ” e “ $j$ ” [m/s],  $E_i$  e  $E_j$  os módulos de elasticidade das partículas “ $i$ ” e “ $j$ ” [Pa].

$$r_{eq} = \frac{1}{1/r_i + 1/r_j} \quad (34)$$

onde  $r_i$  e  $r_j$  são os raios das partículas “ $i$ ” e “ $j$ ” [m].

As constantes de amortecimento normal e tangencial são determinadas pelas Equações (35) e (36), respectivamente.

$$\beta_n = \beta_{n,amort} \sqrt{5k_n M_{eq}} \quad (35)$$

$$\beta_t = \beta_{t,amort} \sqrt{5k_n M_{eq}} \quad (36)$$

onde  $\beta_{n,amort}$  é a constante de amortecimento normal [N/m], definida pela Equação (37),  $M_{eq}$  a massa equivalente da partícula [kg], dada pela Equação (38), e  $\beta_{t,amort}$  a constante de amortecimento tangencial [N/m], Equação (39).

$$\beta_{n,amort} = \frac{-\ln(C_{n,rest})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{n,rest})^2}} \quad (37)$$

com  $C_{n,rest}$  o coeficiente de restituição normal. Nas situações onde  $C_{n,rest} = 0$ , tem-se que  $\beta_{n,amort} = 1,0$ .

$$M_{eq} = \frac{1}{1/M_i + 1/M_j} \quad (38)$$

para  $M_i$  e  $M_j$  sendo as massas das partículas “i” e “j” [kg].

$$\beta_{t,amort} = \frac{-\ln(C_{t,rest})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{t,rest})^2}} \quad (39)$$

onde  $C_{t,rest}$  é o coeficiente de restituição tangencial. Para os casos em que  $C_{t,rest} = 0$ , então  $\beta_{t,amort} = 1,0$ .

$$G_{eq} = \frac{1}{\frac{2(2-v_i)(1+v_i)}{E_i} + \frac{2(2-v_j)(1+v_j)}{E_j}} \quad (40)$$

com  $v_i$  e  $v_j$  representando os coeficientes de Poisson das partículas “i” e “j”.

Para a força de colisão que ocorre entre partícula e paredes do domínio é realizada com as equações (29) e (30). Contudo, o raio e a massa da parede são considerados como  $r_{parede} \rightarrow \infty$   $M_p \rightarrow \infty$ . Logo, o raio equivalente, Equação (34), é reduzido ao raio da partícula  $r_{parede} = r_p$  e a massa equivalente, Equação (38), é a massa da partícula,  $M_{eq} = M_p$ .

Segundo Cundall e Strack (1979), para o modelo de força de contato mola linear as forças normal e tangencial continuam sendo definidas pelas equações (29) e (30). Os parâmetros que são modificados são os coeficientes  $k_n$ ,  $k_t$ ,  $\beta_n$  e  $\beta_t$ , com  $k_n$  e  $k_t$  representando as constantes normal e tangencial da mola. A Equação (41) fornece o coeficiente de amortecimento normal da mola, e a Equação (42) o coeficiente de amortecimento tangencial.

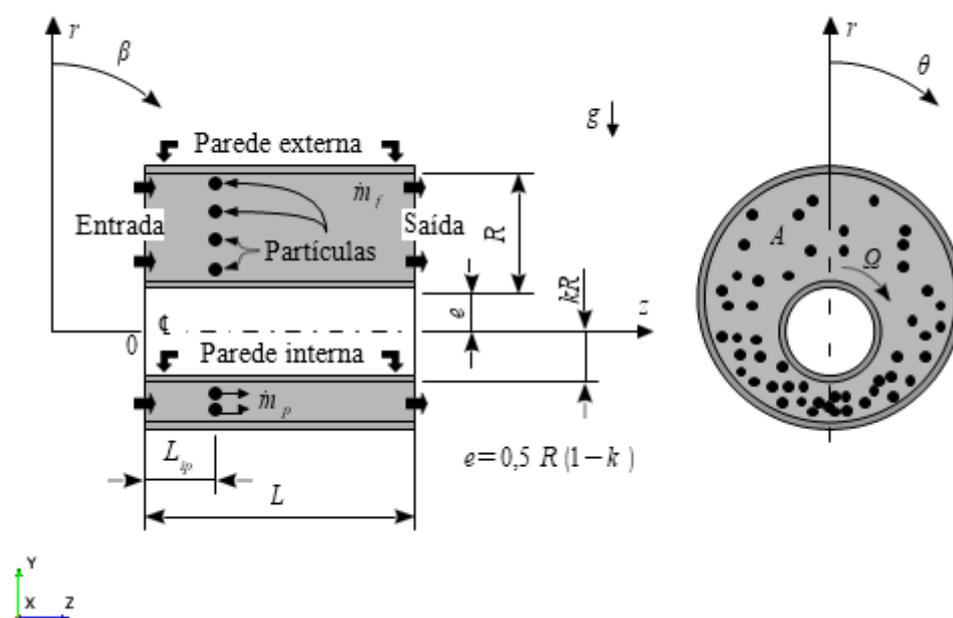
$$\beta_n = 2\beta_{n,amort} \sqrt{k_n M_{eq}} \quad (41)$$

$$\beta_t = 2\beta_{t,amort} \sqrt{k_t M_{eq}} \quad (42)$$

### 3.2 Características do domínio e condições de contorno

A geometria aplicada na análise do escoamento bifásico líquido-sólido de fluido pseudoplástico em seção anular excêntrica, com rotação da parede interna, está representada na Figura 9. As partículas são tidas como rígidas e de formato esférico.

Figura 9– Geometria do problema de escoamento bifásico líquido-sólido em seção anular excêntrica.



Fonte: modificado de Casarin (2018).

A partir da geometria ilustrada na Figura 9, as condições de contorno usadas no problema são especificadas. Onde o fluido entra pela face esquerda, com condição de contorno de velocidade definida (*velocity inlet*), saindo pela face direita, com condição de contorno de pressão definida (*pressure outlet*), com hipótese de escoamento completamente desenvolvido, laminar e transiente. Todas as paredes possuem condições de contorno de não deslizamento. A gravidade é orientada no sentido negativo do eixo y da Figura 9, a qual caracteriza o espaço anular excêntrico na horizontal com comprimento ( $L$ ) de 1 m. A Equação (43) representa a condição de pressão manométrica na saída:

$$P(z = L) = 0 \quad (43)$$

A velocidade tangencial das paredes interna e externa são dadas pelas equações (44) e (45).

$$v_{\theta}(r = R) = 0 \quad (44)$$

$$v_{\theta}(r = \kappa R) = \kappa R \omega \quad (45)$$

### 3.3 Síntese do capítulo

Nesse capítulo é apresentada a formulação matemática do problema de escoamento líquido-sólido de fluido não newtoniano. A simplificação da geometria do problema proposto é apresentada na Figura 9, a qual consiste em tubo horizontal com seção anular excêntrica.

A abordagem matemática do escoamento líquido-sólido é efetuada separadamente para cada fase. Onde a fase sólida é tratada por meio da perspectiva lagrangiana que aplica individualmente o balanço de quantidade de movimento para cada partícula. E, a fase líquida é tratada pela perspectiva euleriana, a qual calcula as equações de balanço de quantidade de movimento e de massa, acopladas à fase sólida. O capítulo 4 apresentará a formulação numérica para a solução das equações apresentadas nesse capítulo.

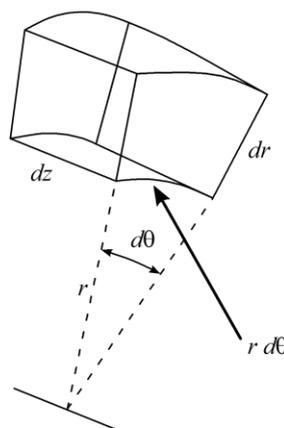
## 4 MODELAGEM NUMÉRICA

Os estudos realizados no presente trabalho são executados com o auxílio do programa de simulação numérica *STAR-CCM+*, de forma que as equações de balanço de massa e quantidade de movimento são solucionadas por meio do método de volumes finitos. Para as interações entre as fases líquida e sólida a modelagem híbrida foi utilizada e, para as interações entre fases sólidas foi utilizado o método dos elementos discretos. Com o intuito de explanar as principais características e processos envolvidos, este capítulo aborda a descrição do processo de solução numérica aplicado no desenvolvimento das simulações.

### 4.1 Solução das equações de balanço – método dos volumes finitos

Este método consiste na transformação de modelos matemáticos em conjuntos de equações algébricas. Para tal, discretiza-se as equações que representam os fenômenos físicos característicos ao longo do espaço tempo. Este método é efetuado pela integração das equações diferenciais de transporte sobre o volume de controle representado na Figura 10 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Figura 10– Volume de controle cilíndrico para a integração das equações de transporte.



Fonte: Kundu; Cohen e Dowling (2012).

Integrando as equações de balanço de massa, Equação (2), e de quantidade de movimento, Equação (5), para a fase contínua obtém-se as Equações (46) e (47).

$$\int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (C_f \rho_f) dV + \int_{VC} [\nabla \cdot (C_f \rho_f \mathbf{v}_f)] dV = 0 \quad (46)$$

$$\int_{VC} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (C_f \rho_f \mathbf{v}_f) \right] dV + \int_{VC} \left[ \nabla \cdot (C_f \rho_f \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f) \right] dV = \int_{VC} \left[ -\nabla (C_f \hat{p}) - \nabla \cdot (C_f \boldsymbol{\tau}_{ij}) \right] dV + \int_{VC} S_\phi dV \quad (47)$$

onde  $dV$  é o elemento diferencial de volume representado na Figura 10 [m<sup>3</sup>], definido pela Equação (48).

$$dV = r dr d\theta dz \quad (48)$$

Empregando o teorema da divergência de Gauss às equações de balanço (46) e (47), tem-se como resultado as equações (49) e (50).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{VC} C_f \rho_f dV \right) + \int_A \mathbf{n} \cdot (C_f \rho_f \mathbf{v}_f) dA = 0 \quad (49)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (C_f \rho_f \mathbf{v}_f) dV + \int_A \left[ \mathbf{n} \cdot (C_f \rho_f \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f) \right] dA = \int_{VC} -\nabla (C_f \hat{p}) dV + \int_A \mathbf{n} \cdot (C_f \boldsymbol{\tau}_{ij}) dA + \int_{VC} S_\phi dV \quad (50)$$

Visto que o problema é transiente, torna-se necessário integrar as equações (49) e (50) ao longo do tempo,  $t$  e  $t + \Delta t$ , e do volume. Desta forma, a solução da integração da equação de balanço de massa será a Equação (51), e do balanço da quantidade de movimento a Equação (52).

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{VC} C_f \rho_f dV \right) dt + \int_A \mathbf{n} \cdot (C_f \rho_f \mathbf{v}_f) dA dt = 0 \quad (51)$$

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \int_V (C_f \rho_f \mathbf{v}_f) dV dt + \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (C_f \rho_f \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f) dA dt = \int_{\Delta t} \int_{VC} -\nabla (C_f \hat{p}) dV dt + \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (C_f \boldsymbol{\tau}_{ij}) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{VC} S_\phi dV dt \quad (52)$$

Como as simulações desenvolvidas para o presente trabalho possuem caráter transiente, foi necessária a utilização de esquema de discretização temporal. Assim, foi utilizado o esquema implícito de primeira ordem (Versteeg e Malalasekera, 1995).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho CV)_0 = \frac{(\rho CV)_0^{n+1} - (\rho CV)_0^n}{\Delta t} = F(\rho CV)_0^{n+1} \quad (53)$$

sendo  $\Delta t$  [s] o passo de tempo do fluido,  $n$  o índice que denota o valor de  $\rho CV$  no passo de tempo presente e  $n+1$  no passo de tempo seguinte a ser calculado. A Equação (52) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \frac{(\rho CV)_0^{n+1} - (\rho CV)_0^n}{\Delta t} V_{VC} + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f^{n+1} C_f^{n+1} \mathbf{v}_f^{n+1} \mathbf{A}_f^{n+1} = \\ \sum_f^{N_{faces}} (\nabla \hat{p})_f^{n+1} C_f^{n+1} V_{VCf} + \sum_f^{N_{faces}} (\nabla \boldsymbol{\tau}_{ij}) \mathbf{A}_f + S_\phi V_{VC} \end{aligned} \quad (54)$$

o índice  $f$  denota cada uma das  $N_{faces}$  do volume de controle. Na Equação (54), o primeiro termo do lado esquerdo da equação é o termo temporal e o segundo é o termo advectivo. Já para o lado direito da equação, o primeiro e o segundo termo são chamados de difusivos e o terceiro, é o termo fonte. As propriedades transportadas pelo termo temporal e pelo termo fonte são dispostos ao centro do volume de controle, ao passo que nos termos difusivos e advectivos os mesmos localizam-se nas respectivas superfícies de controle,  $f$ . A forma linear da Equação (54) é apresentada abaixo:

$$a_{VC} \phi_{VC} = \sum_{nVC} a_{nVC} \phi_{nVC} + S_\phi \quad (55)$$

onde o subscrito nVC se refere às células limítrofes do volume VC, “a” representa os coeficientes de linearização e  $\phi$  é a propriedade transportada (massa ou quantidade de movimento). Para todos os volumes de controle da malha considera-se uma equação análoga à Equação (55), o que resulta no conjunto de equações algébricas lineares (HUTCHINSON; RAITHBY, 1986).

#### 4.1 Escalas de tempo associadas à modelagem das partículas

O passo de tempo máximo tolerado para a modelagem da partícula pelo método dos elementos discretos é limitado pela seguinte consideração: a força que atua sobre a partícula só é afetada pela vizinhança imediata da partícula pela duração de um único passo de tempo. Por sua vez, o passo de tempo é limitado apenas pelo tempo que a onda de Rayleigh,  $t_{Rayleigh}$ , leva para se propagar pela superfície da partícula até a extremidade oposta, Equação (56), (JOHNSON, 2003).

$$t_{Rayleigh} = \pi \frac{r_{p|min}}{v_{Rayleigh}} \quad (56)$$

onde  $r_{p|min}$  é o raio mínimo da partícula [m] e  $v_{Rayleigh}$  é a velocidade de propagação da onda de Rayleigh [m/s], Equação (57) (CD-ADAPCO, 2017).

$$v_{Rayleigh} = \frac{(0,87 + 1,12\nu_p)}{(1,0 + \nu_p)} \sqrt{\frac{G_p}{\rho_p}} \quad (57)$$

onde  $G_p$  é o módulo de elasticidade ao cisalhamento da partícula [Pa].

A velocidade de propagação da onda de Rayleigh é dependente das propriedades do material da partícula, cujo valor pode ser obtido pela solução da equação de Rayleigh (RAYLEIGH, 1885). Critérios adicionais que restringem o passo de tempo, além do tempo de propagação da onda de Rayleigh, são aplicados a partículas em movimento. Segundo a teoria de contato de Hertz, o tempo de duração do impacto entre duas esferas perfeitamente elásticas,  $t_{Timoshenko}$ , é dado pela equação (58) (TIMOSHENKO, 1951).

$$t_{Timoshenko} = \left[ 2,94 \left( \frac{5\sqrt{2} \pi \rho_p (1 - \nu_p^2)}{4 E_p} \right)^{2/5} \right] \frac{r_p}{\sqrt[5]{v_{impacto}}} \quad (58)$$

onde  $v_{impacto}$  é a velocidade de impacto entre as partículas [m/s] e  $E_p$  é o módulo de elasticidade da partícula [Pa].

Outra restrição sobre o passo de tempo no método *DEM* que é utilizada pelo STAR-CCM+<sup>®</sup>, está relacionada à geometria da partícula,  $t_{geom}$ , e se baseia na consideração de que as partículas não devem deslocar-se por longas distâncias no passo de tempo em que estão sendo analisadas, condição que evita a perda de contato entre as partículas do método

DEM, e entre as partículas e paredes. Cada partícula leva, pelo menos, o tempo definido pela equação (59) para se mover a distância equivalente ao comprimento do seu raio.

$$t_{geom} = \frac{r_p}{v_p} \quad (59)$$

O passo de tempo final da partícula é definido como o valor mínimo entre  $t_{Rayleigh}$ ,  $t_{Timoshenko}$  e  $t_{geom}$ .  $t_{Rayleigh}$  é, normalmente, o fator limitante enquanto  $t_{Timoshenko}$  e  $t_{geom}$  apenas restringem as partículas que estão se movendo rapidamente ou quando o módulo de elasticidade é baixo, para acelerar a simulação.

Segundo Crowe *et al.* (2012), o cálculo para determinar a rigidez da partícula se dá em função das propriedades do material e exige que o passo de tempo utilizado para a modelagem das condições de contato entre as partículas seja muito reduzido. Uma das formas de se determinar o passo de tempo da partícula,  $\Delta t_p$ , é utilizando a relação empírica dada pela Equação (60), com o termo entre parênteses representando o período de oscilação natural do sistema massa-mola.

$$\Delta t_p \leq \frac{1}{10} \left( 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}} \right) \quad (60)$$

Com o intuito de se reduzir o esforço computacional associado ao processo de solução numérica, pode-se utilizar valores baixos para a rigidez  $k$  da partícula. De acordo com Crowe *et al.* (2012), os resultados obtidos com essa consideração não diferem muito dos em que se utiliza o valor exato para a constante  $k$ . Para os casos de escoamento bifásico líquido-sólido, as forças atuantes nas partículas diminuem o efeito da rigidez sobre o comportamento da partícula. Assim, é possível a utilização de menores valores para a rigidez das partículas com o propósito de se otimizar o tempo computacional. Para que o passo de tempo da partícula fosse adequado à física do problema, os valores calculados através das equações apresentadas nessa seção foram testados nas simulações. Obtendo-se assim, valor apropriado para todas as simulações.

### 4.3 Método dos elementos discretos

Tendo em conta que se deseja caracterizar o movimento de cada partícula conhecendo-se a posição, a velocidade angular e a velocidade linear ao final de cada passo de tempo, as Equações (10) e (12) são reescritas para a partícula  $j$ , Equações (61) e (62), respectivamente.

$$\frac{d\mathbf{v}_{p[j]}}{dt} = \frac{1}{t_{p[j]}} (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p) + \mathbf{a}_{pF[j]} \quad (61)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}_{p[j]}}{dt} = \frac{\mathbf{T}_{p[j]}}{I_{p[j]}} \quad (62)$$

Na Equação (61), o parâmetro  $t_{p[j]}$  é o tempo de resposta da partícula, determinado pela Equação (63), que é dependente da força de arrasto,  $C_{D[j]}$  é o coeficiente de arrasto,  $Re_{p[j]}$  é o número de Reynolds translacional da partícula, Equação (64), e  $\mathbf{a}_{pF[j]}$  é a aceleração introduzida pela ação das forças de gradiente de pressão, massa virtual e gravidade, representada pela equação (65).

$$t_{p[j]} = \frac{\rho_p d_{p[j]}^2 24}{18\mu_f C_{D[j]} Re_{p[j]}} \quad (63)$$

$$Re_{p[j]} = \frac{\rho_f d_{p[j]} |\mathbf{v}_{p[j]} - \mathbf{v}_{f[j]}|}{\mu_f} \quad (64)$$

$$\mathbf{a}_{pF[j]} = \frac{1}{m_{p[j]}} (\mathbf{F}_{g[j]} + \mathbf{F}_{e[j]} + \mathbf{F}_{p[j]} + \mathbf{F}_{mv[j]}) \quad (65)$$

As Equações (61) e (62) são resolvidas numericamente pela integração explícita:

$$\mathbf{v}_{p,x[j]}^{n+1} = \frac{\mathbf{v}_{p,x[j]}^n + \Delta t_p \left( \mathbf{a}_{p,x[j]} + \frac{\mathbf{v}_{f,x[j]}^n}{t_p} \right)}{1 + \frac{\Delta t_p}{t_{p[j]}}} \quad (66)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{p,z[j]}^{n+1} = \boldsymbol{\omega}_{p,z[j]}^n + \left( \frac{T_p^{n+1}}{I_p \Delta t_p} \right)_{[j]} \quad (67)$$

onde  $\Delta t_p$  [s] é o passo de tempo da partícula, o sobrescrito “n+1” indica o valor que deve ser calculado no passo de tempo atual e “n” é o valor obtido no passo de tempo anterior.

#### 4.4 Acoplamento entre a fase dispersa e fase contínua

A taxa da quantidade de movimento cedida do fluido para a partícula é definida pelas forças de superfície que agem sobre a fase sólida, dada pela Equação (13). De outro modo, a taxa de transferência da quantidade de movimento das partículas inclusas na célula  $c$  à fase contínua, pois a simulação ocorre em regime transiente, sendo representada pelo termo  $S_\phi$ , definido na equação (68).

$$\mathbf{S}_\phi = -\frac{1}{\Delta t} \sum_{\sigma} \left( \int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \delta_{Dirac}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_\sigma) n_\sigma \mathbf{F}_s \right) \quad (68)$$

onde  $n_\sigma$  é o número de partículas presente na célula,  $\Delta t$  é o passo de tempo da partícula,  $\mathbf{r}_\sigma$  é o vetor posição da partícula, o termo  $\delta_{Dirac}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_\sigma)$  é a propriedade de filtragem da função delta de Dirac (KUNDU; COHEN; DOWLING, 2012), segundo a equação (69), e a notação da equação (70), usada para filtrar as parcelas de partículas  $\sigma$  que não estão inclusas na célula  $c$ .

$$\int_a^b \delta_{Dirac}(x - x_0) dx = \begin{cases} 1, & a \leq x_0 \leq b \\ 0, & (x_0 < a) \text{ ou } (x_0 > b) \end{cases} \quad (69)$$

$$\delta_{Dirac}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = \delta_{Dirac}(x - x_0) \delta_{Dirac}(y - y_0) \delta_{Dirac}(z - z_0) \quad (70)$$

Ao discretizar a equação (69) obtém-se a equação (71).

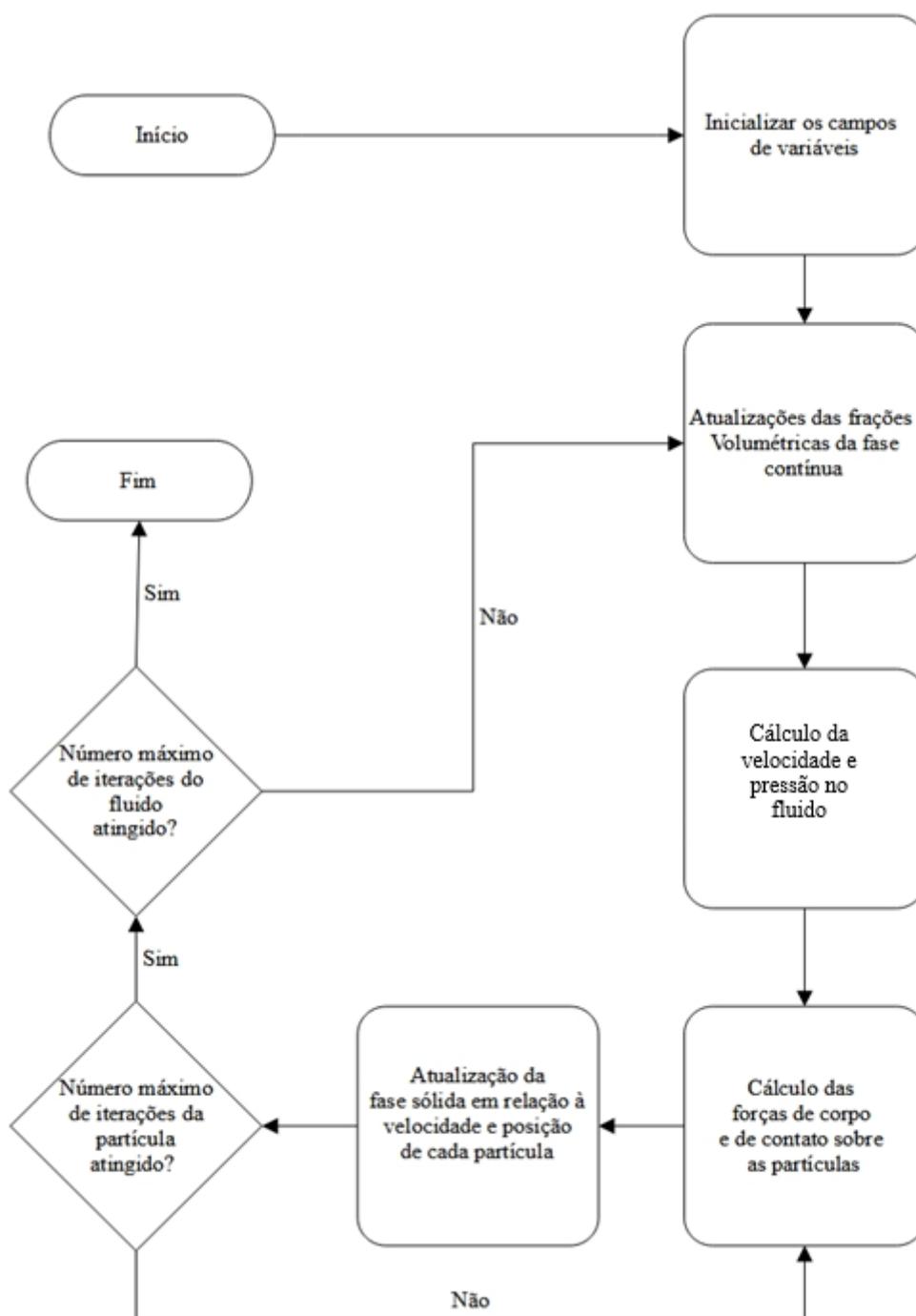
$$\mathbf{S}_\phi = -\frac{1}{\Delta t} \sum_{\sigma} \sum_{\delta t_p} n_\sigma (F_s) \Delta t_p \quad (71)$$

O segundo somatório aplica-se em todo o tempo  $\Delta t_p$  no qual a parcela  $\sigma$  está contida na célula  $c$ .

#### **4.1 Algoritmo do acoplamento *CFD-DEM***

O método de solução das equações de transporte de escoamento líquido-sólido, levando-se em conta o acoplamento entre as fases existentes no domínio computacional, ocorre segundo o representado na Figura 11.

Figura 11– Fluxograma do ciclo de modelagem do acoplamento entre método de volumes finitos e método dos elementos discretos (CFD-DEM).



Fonte: elaborado pela autora.

O programa de simulação realiza iterações referentes à solução do campo de escoamento da fase contínua através do método dos volumes finitos, até que os resíduos atinjam os níveis estabelecidos nos critérios de convergência. Baseando-se nas variáveis do campo de escoamento do fluido – pressão e velocidade – os termos de transferência de quantidade de movimento entre o fluido e as partículas são obtidos a partir das frações volumétricas da fase contínua,  $\alpha_f$ , e da fase sólida,  $\alpha_p$ . Assim, as informações são transferidas à fase sólida através da Equação (13).

Em seguida, as forças de corpo e de contato sobre as partículas são calculadas utilizando a equação (14). A situação da fase sólida é atualizada em relação à velocidade e a posição de cada uma das partículas sólidas ao longo do domínio. Estes dados são transmitidos à interface de acoplamento, na qual a fração volumétrica de sólidos nas células de volume de fluido é calculada. Por último, o acoplamento da fase sólida com a fase contínua é obtido pela Equação (68). Assim, as variáveis referentes ao fluido são atualizadas e o método iterativo de solução das equações de transporte da fase contínua inicia-se novamente.

#### **4.6 Síntese do capítulo**

Neste capítulo, foram abordados os aspectos numéricos referentes às simulações efetuadas. Com o embasamento teórico assimilado, os casos de validação são realizados e debatidos no próximo capítulo.

## 5 CASOS DE VALIDAÇÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos para os problemas de validação. Dois trabalhos da literatura foram estudados, de tal forma que o intuito foi averiguar a precisão do acoplamento entre as fases por meio da comparação de resultados. Para alguns casos, a fim de comparar a qualidade da resposta obtida com os valores esperados, o erro relativo ( $r_{rel}$ ) será utilizado:

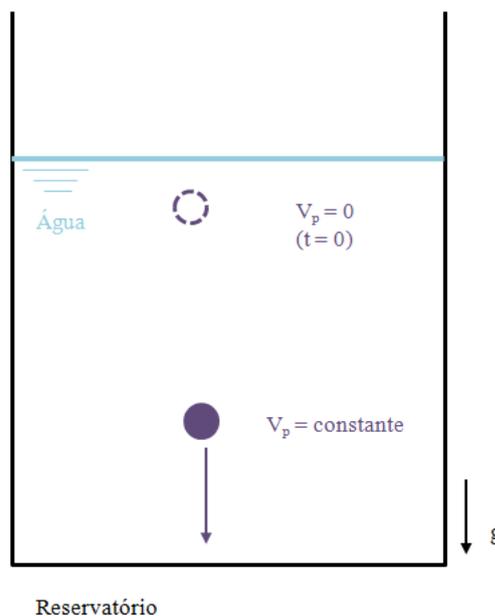
$$r_{rel} = \frac{|v - v_{cal}|}{v} \times 100\% \quad (72)$$

com  $v$  sendo o valor esperado para a grandeza e  $v_{cal}$  o valor calculado para a grandeza durante as simulações.

### 5.1 Sedimentação em fluido viscoso

O primeiro trabalho escolhido para a reprodução de resultados numéricos foi o de Mordant e Pinton (2000), onde partícula esférica é abandonada do repouso em água ( $\rho_f = 997 \text{ kg/m}^3$  e  $\mu_f = 8,9 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$ ) no instante  $t = 0 \text{ s}$ . A esfera acelera sob o efeito de seu peso e, após um período de tempo, atinge a velocidade terminal. A Figura 12 representa o problema. As simulações foram realizadas para partícula de diâmetro  $D_p = 1 \text{ mm}$  e densidade  $\rho_p = 7850 \text{ kg/m}^3$ .

**Figura 12- Representação do problema estudado por Mordant e Pinton (2000).**

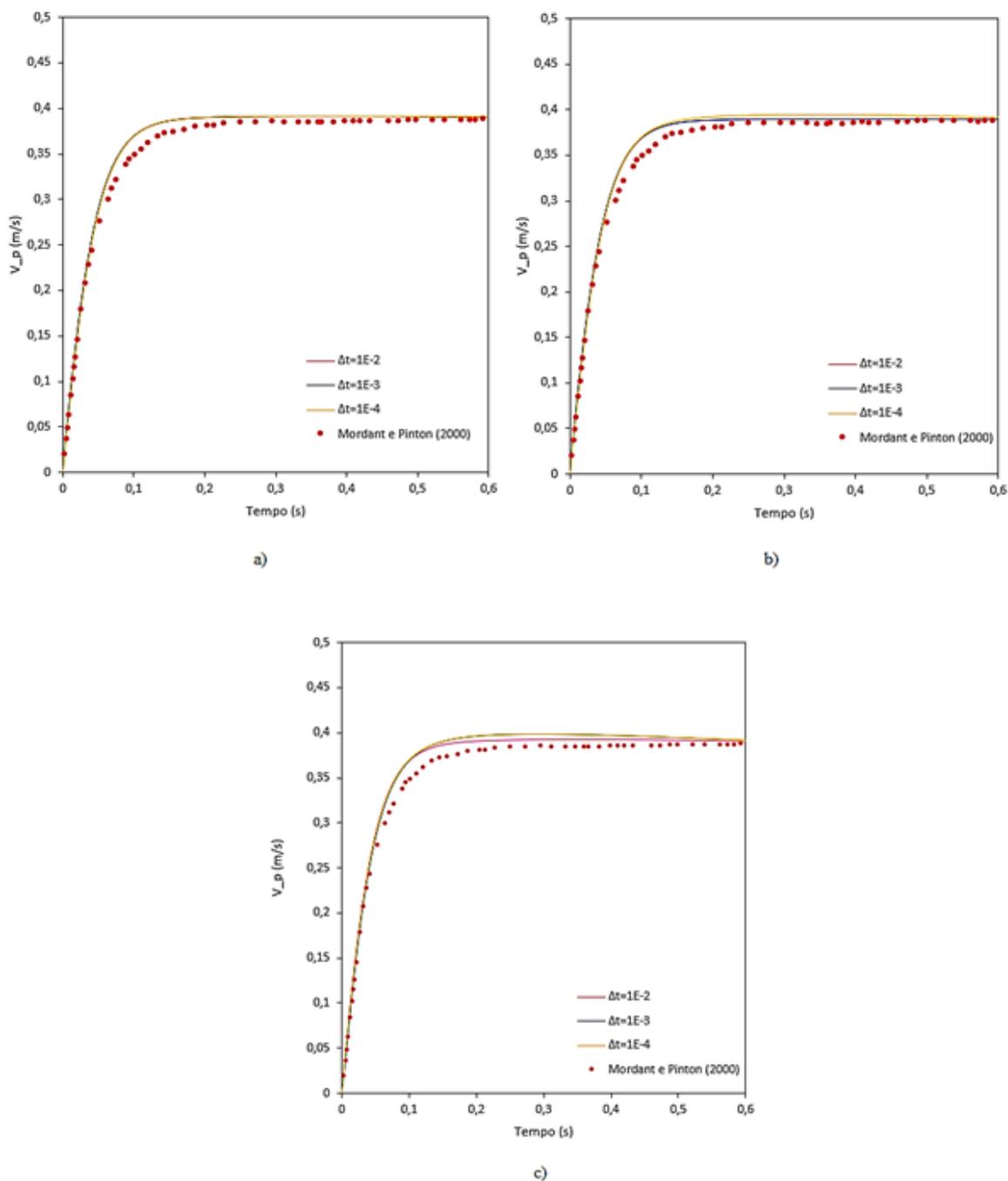


**Fonte: modificado de Pivovarski (2018).**

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos para volume de controle com tamanhos constantes e passos de tempo variáveis para a fase fluida. Os dados relativos ao trabalho original dos autores foram extraídos a partir do *software Engauge-Digitizer*<sup>®</sup>, onde os pontos do gráfico foram obtidos de forma manual, o que causa pequena incerteza nos dados.

Na Figura 13 é apresentada a influência do valor do passo de tempo das partículas em determinado volume de controle. Na Figura 13 (a), os volumes de controle são de  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  [mm], ou seja, malha mais refinada. Os valores obtidos para a velocidade terminal da partícula quase não dependem do valor utilizado para o passo de tempo da fase fluida. Já na Figura 13 (b) onde o volume de controle é de  $1 \times 1 \times 1$  [mm], é possível observar oscilação na velocidade da partícula em relação aos valores experimentais de Mordant e Pinton (2000). Para a Figura 13 (c), onde a malha é mais grosseira, os resultados obtidos apresentam maior oscilação na velocidade terminal da partícula em relação ao trabalho de Mordant e Pinton (2000).

Figura 13- Comportamento da partícula em função do passo de tempo da fase fluida utilizada. (a) malha 0,5 x 0,5 x 0,5 [mm] (b) malha 1 x 1 x 1 [mm] (c) malha 2 x 2 x 2 [mm].



Fonte: elaborado pela autora

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos para o passo de tempo da fase fluida constante e tamanhos do volume de controle variável. Foram utilizadas três tipos de malha: da ordem da metade do diâmetro, da ordem do diâmetro da partícula e duas vezes o diâmetro (0,5D; D e 2D). Na Figura 13 (a), a velocidade não oscila como na Figura 13 (b) e é nítido que, quanto menor o refino de malha, maior o comprometimento dos valores da

velocidade terminal da partícula em relação ao trabalho de Mordant e Pinton (2000). Os resultados ficaram menos fiéis na Figura 13 (c), onde além das oscilações já mencionadas, é possível observar desvio no valor médio da velocidade terminal da partícula. Comparando as três figuras, é possível notar que quanto maior o volume de controle utilizado, passos de tempo menores fornecem melhores resultados. Contudo, o aumento do tempo computacional não é justificável, visto que os ganhos na reprodução da velocidade terminal são pequenos. No geral, obteve-se bom ajuste entre os dados numéricos obtidos pelas simulações e os valores obtidos experimentalmente por Mordant e Pinton (2000), o que indica bom poder preditivo dos modelos utilizados e garantia da não existência de erros operacionais associados às simulações.

## 5.2 Colisão inelástica de partícula imersa

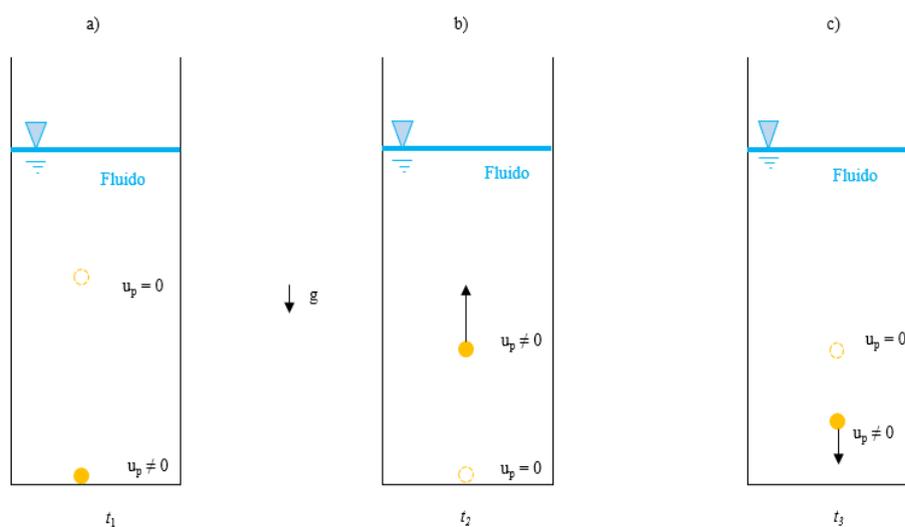
O estudo do problema de colisão normal em parede plana tem como objetivo analisar a capacidade do DEM no cálculo da força de contato e da utilização do coeficiente de restituição partícula-parede para retratar os efeitos dissipativos. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados para as simulações, em ar e em óleo de silicone RV10. Os coeficientes de restituição usados encontram-se em ordem decrescente com início na primeira colisão, sendo avaliados por Gondret *et al.* (2002).

A Figura 14 representa o problema de colisão normal em parede plana onde, a partícula é abandonada do repouso no instante  $t = 0s$  e, depois de determinado intervalo de tempo, ocorre a colisão normal com a parede do volume de controle onde está inserida, Figura 14a. Por causa da colisão, a partícula inverte o sentido do movimento, movendo-se opostamente ao sentido do campo gravitacional, Figura 14b. Em dado instante, a partícula atinge a velocidade nula, alcançando o ponto mais alto de sua trajetória após a colisão, Figura 14c. O estudo de Gondret *et al.* (2002) fez o monitoramento da velocidade da partícula ao longo do tempo, bem como sua trajetória.

**Tabela 3- Sumário dos parâmetros para a colisão normal.**

	Símbolo	Ar	RV10	Unidade
Diâmetro da partícula	$d_p$	0,006	0,003	M
Massa específica da partícula	$\rho_p$	2150	7800	Kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de restituição normal	$e_n$	0,78; 0,66; 0,45; 0,25	0,82	-
Passo de tempo da partícula	$\Delta t_p$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	s
Passo de tempo da partícula	$\Delta t_p$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	s
Viscosidade dinâmica do fluido	$\mu_f$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	0,01	Pa · s
Massa específica do fluido	$\rho_f$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	935	Kg/m <sup>3</sup>
Dimensões do volume de controle da malha	-	$2 d_p ; 1 d_p ;$ $0,5 d_p$	$2 d_p ; 1 d_p ;$ $0,5 d_p$	m

Fonte: modificado de Gondret *et al.* (2002) e Poletto (2017).

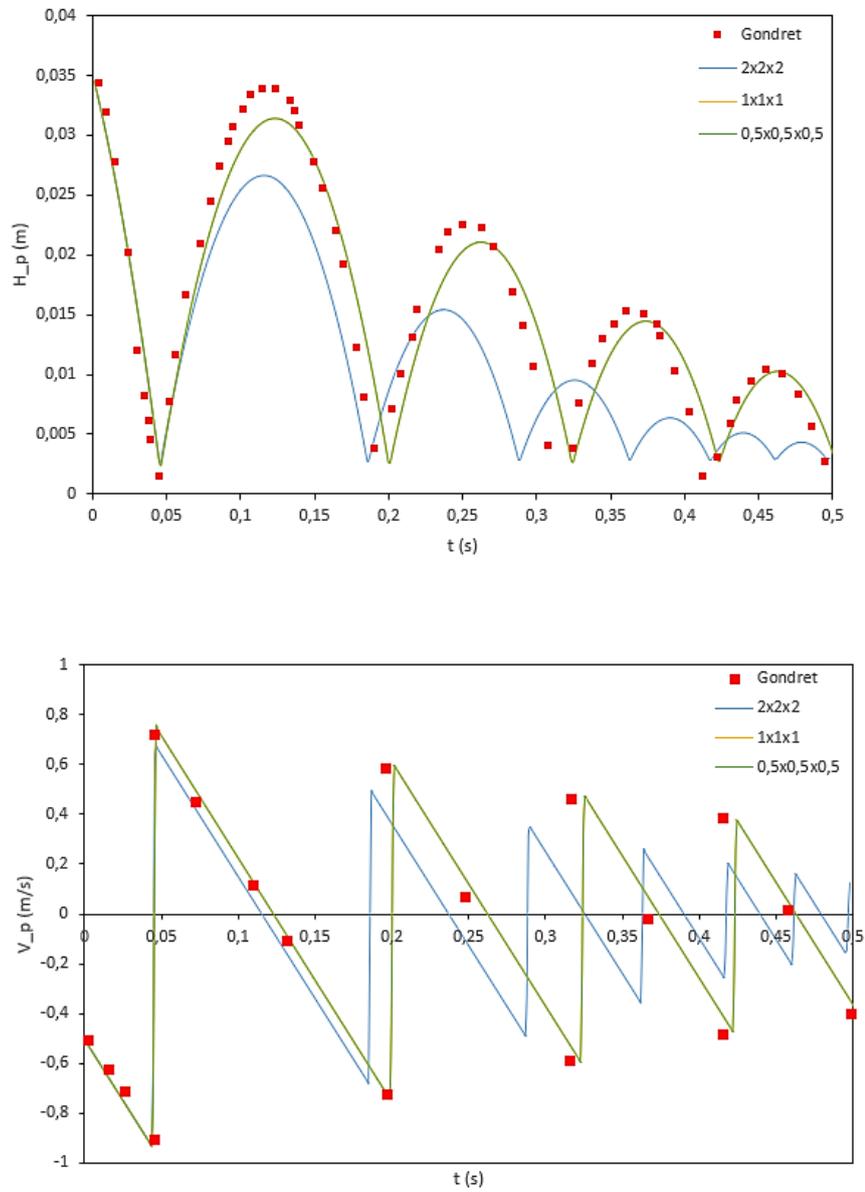
**Figura 14- Representação do problema estudado por Gondret et al. (2002). Colisões de partícula com parede.**

Fonte: modificado de Pivovarski (2018).

Os autores concluíram que, no caso do fluido de baixa viscosidade dinâmica, como o ar, as forças de arrasto, gravitacional e as originadas pelas colisões são suficientes para caracterizar adequadamente o comportamento da partícula. No entanto, quando o fluido onde a partícula está imersa é mais viscoso, outras forças passam a ser mais importantes, como a força de gradiente de pressão.

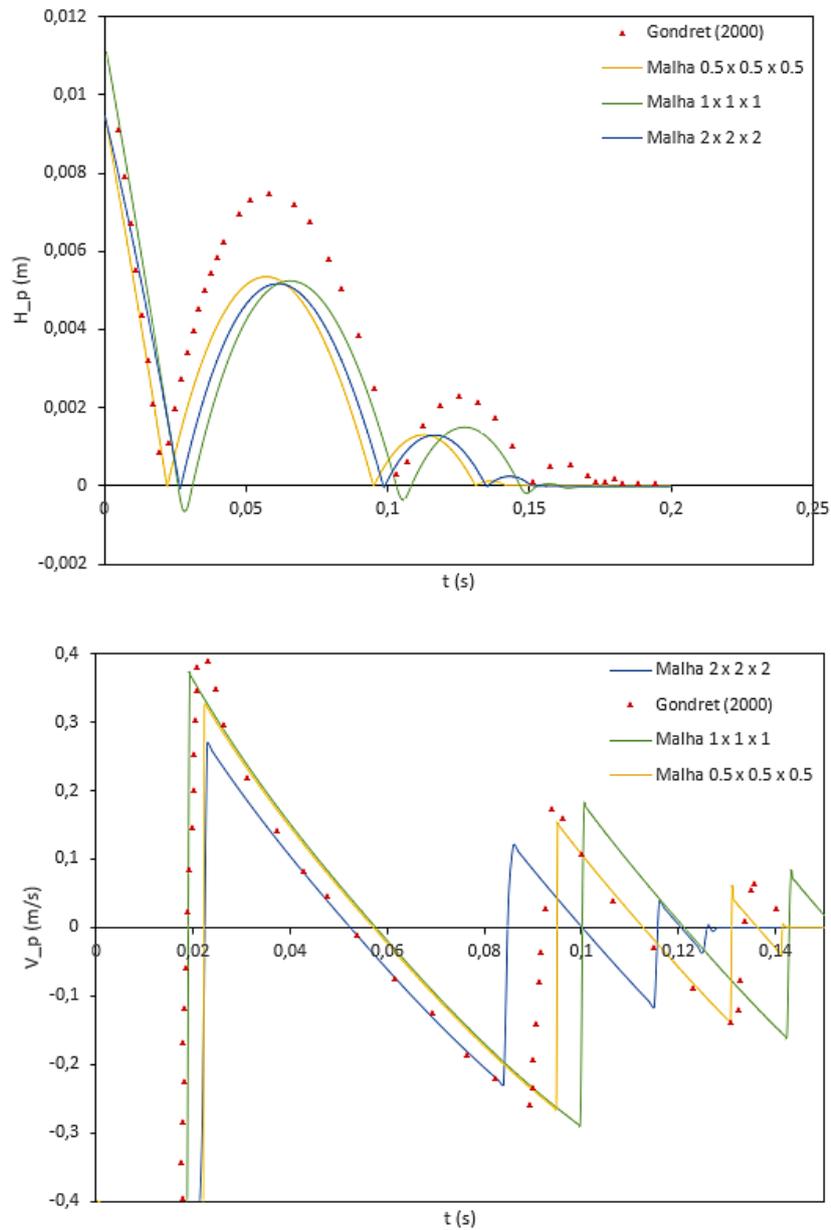
Na Figura 15 é possível observar que a velocidade da partícula é melhor capturada quando a malha possui maior refino, ou seja, para a malha de  $0,5D_p$ , bem como para sua trajetória. A Figura 16 apresenta os resultados obtidos para a colisão de esferas de aço de 3 mm, em óleo silicone RV10, onde nota-se maior aproximação dos resultados de Gondret *et al.* (2002) quanto maior o refino da malha.

**Figura 15- Comparação de resultados experimentais Gondret et al. (2002) para colisão inelástica de partícula de Teflon em ar.**



**Fonte: elaborado pela autora**

**Figura 16- Comparação de resultados experimentais Gondret et al. (2002) para colisão inelástica de partícula de Aço em RV10.**



**Fonte: elaborado pela autora**

### 5.3 Formação de leito

Nesta seção será apresentada a comparação dos resultados obtidos para escoamento particulado denso, de interesse para o presente trabalho. O estudo de Pivovarski (2018) visou acompanhar o preenchimento de canal horizontal. O autor utilizou o canal horizontal de seção retangular de 2 metros de comprimento, de tal forma que as dimensões do canal eram 45 mm x 16 mm x 2 m.

A taxa de injeção de partículas foi de 2% em concentração mássica e 8800 partículas foram injetadas no domínio a cada segundo. A Tabela 4 apresenta os dados pertinentes para cada uma das fases.

**Tabela 4- Dados referentes às fases líquida e sólida no trabalho de Pivovarski (2018).**

Fase	parâmetro	Valor
Sólida	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	1600
	Diâmetro [mm]	0,8 - 1,2
Líquida	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	1181
	Viscosidade dinâmica [Pa.s]	$19,5 \times 10^{-3}$

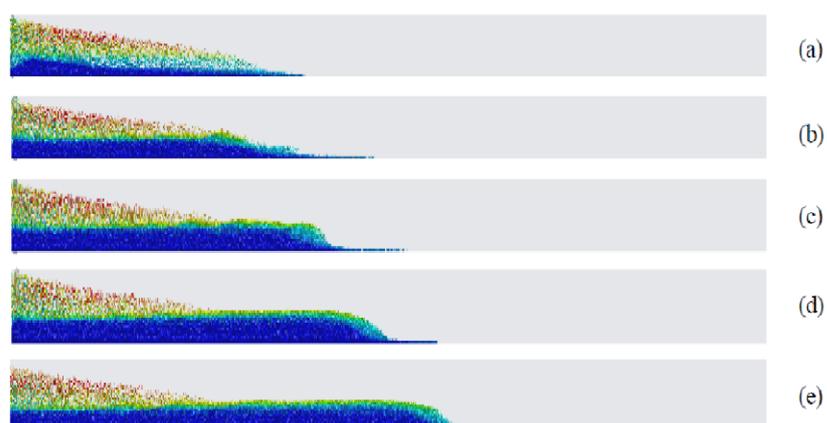
No âmbito das simulações numéricas, o autor utilizou simplificação para reduzir o tempo computacional: como as partículas tinham tamanho muito reduzido, a espessura da seção transversal foi dividida por oito, então o domínio computacional apresentava volume oito vezes menor do que o original, com dimensões de 45 mm x 2 mm x 2m. Ou seja, a injeção de partículas necessária para cumprir a condição de 2% de concentração mássica foi de 1100 partículas por segundo. A Tabela 5 apresenta os dados utilizados na simulação numérica realizada.

**Tabela 5-Parâmetros numéricos utilizados no trabalho de Pivovarski (2018).**

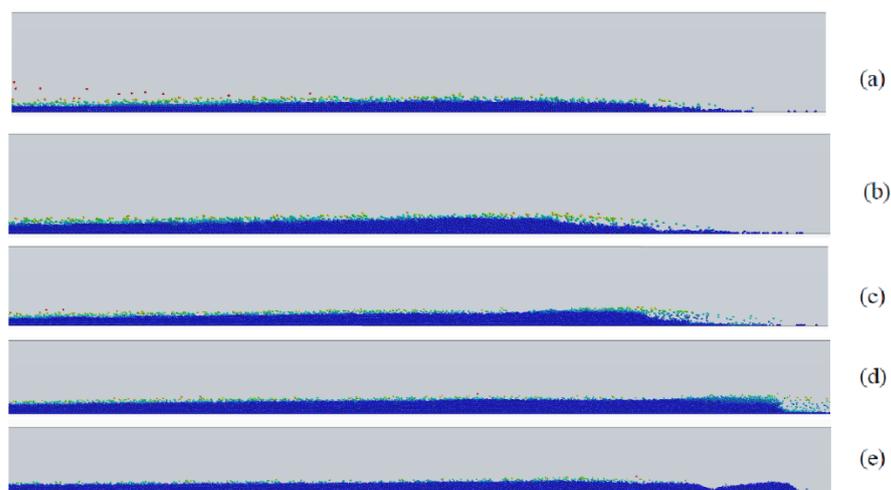
Parâmetro	Valor
Passo de tempo da fase fluida $\Delta t_f$ [s]	$2 \times 10^{-2}$
Passo de tempo da fase sólida $\Delta t_p$ [s]	$4 \times 10^{-4}$
Diâmetro [mm]	1

Neste trabalho, a seção original foi utilizada, *i. e.*, 45 mm x 16 mm x 2 m e, para garantir que a simulação fosse reproduzida conforme o trabalho de Pivovarski (2018), o mesmo número de Reynolds foi utilizado ( $Re = 150$ ).

**Figura 17- Evolução temporal do leito obtido via simulação por Pivovarski.**



**Figura 18 - Evolução temporal do leito obtido via simulação para o presente trabalho.**



Fonte: elaborado pela autora.

Na Figura 17 (a) e (b), nota-se a existência de partículas em suspensão no início do tubo e menor comprimento de leito quando comparado com a Figura 18 (a) e (b). Esse comportamento pode ter sido ocasionado por variações dentro do parâmetro de interação entre partícula- partícula e partícula-parede.

A Figura 17 (c) apresenta a formação de duna alta, resultado do acúmulo de partículas, na frente do leito enquanto que para a Figura 18 (c) a duna ainda não é tão acentuada. Para a Figura 18 (d), a duna já está mais alta e, ao contrário da Figura 17 (d), existem partículas, em suspensão, sendo deslocadas para a parte frontal do leito.

Na Figura 18 (e), o leito está completamente desenvolvido e, quase não apresenta partículas em suspensão, enquanto que para a Figura 17 (e), ainda existem partículas suspensas no fluido. Nota-se que tanto para a Figura 17 (e) quanto para a Figura 18 (e) as partículas tendem a acumular a jusante do leito, formando duna maior nesse local.

Em suma, a simulação do presente trabalho levou mais tempo para a formação de leito, o que ocasionou comprimento de leito maior ao longo do tubo, perceptível, principalmente, na Figura 18 (e).

#### **5.4 Síntese do capítulo**

Neste capítulo foram apresentados e comparados os resultados obtidos nas simulações numéricas com os resultados experimentais dispostos na literatura. Assim, foi possível observar boa concordância entre eles. Sob o ponto de vista qualitativo os resultados obtidos foram muito bons e, houve boa reprodução dos fenômenos físicos reais que estavam acontecendo. No mais, a ferramenta numérica de refino de malha conduziu a resultados da solução, melhores na maioria dos casos de validação realizados para o presente trabalho.

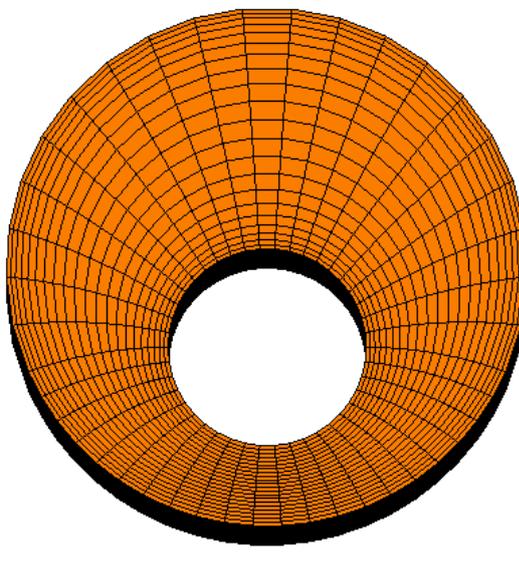
## 6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações numéricas. Os parâmetros que serão modificados são a vazão de bombeio do colchão viscoso, até atingir a estabilidade, a densidade do fluido, o índice de potência e o fator de consistência do fluido, como apresentado nas Tabela 1 e Tabela 2. Nota-se que não é feita a adimensionalização das equações governantes, visto que, o método *DEM* contém um grande número de parâmetros, além de que os adimensionais resultantes dificilmente seriam reproduzidos com similaridade em outra escala. É importante ressaltar que, para o presente trabalho, foram utilizadas unidades usuais da indústria, para facilitar o entendimento e a interpretação dos resultados pelos engenheiros de operações.

### 6.1 Configurações das simulações

Para a realização das simulações, a malha utilizada possuía 21 divisões ao longo do comprimento radial, com distribuição do tipo “*two sided hyperbolic*”, ou seja, com crescimento hiperbólico em direção às paredes do tubo. A Figura 19 apresenta o perfil da malha no plano XY. Para a direção longitudinal, a malha foi elaborada de modo que cada célula ocupasse 2,5 mm. Logo, para tubo anular de 1 metro, por exemplo, a malha possuía 400 elementos.

Figura 19- Perfil da malha utilizada.



Fonte: elaborado pela autora.

Os parâmetros utilizados para a interação entre partícula-partícula e partícula-parede foram definidos através de testes a partir dos valores utilizados nas simulações de Casarin (2018). Os valores para a interação partícula-partícula estão apresentados na Figura 20 e partícula-parede na Figura 21.

Figura 20- Valores para a interação partícula-partícula.

Linear Spring - Properties X		
[-] Properties		
Static Friction Coefficient	0.4	...
Normal Restitution Coefficient	0.8	...
Tangential Restitution Coefficient	0.9	...

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 21- Valores para a interação partícula-parede.

Linear Spring - Properties X		
[-] Properties		
Static Friction Coefficient	0.6	...
Normal Restitution Coefficient	0.8	...
Tangential Restitution Coefficient	0.9	...

Fonte: elaborado pela autora.

Para que o número de partículas sólidas equivalente à concentração de interesse pudesse ser introduzido no domínio físico, foi utilizada a estrutura chamada de “*part injector*”, que libera as partículas sólidas por pontos de injeção, os quais são extraídos das geometrias das partes do injetor.

Inicialmente as partículas são injetadas, ao longo do domínio, no fluido de perfuração (Fluido 1). As partículas são injetadas com perfil de velocidade uniforme e o passo de tempo ( $\Delta t_p$ ) igual a 0,0001 s, de  $t = 0$  s até  $t = 0,01$  s. Após a injeção de partículas, é necessária a formação do leito, por isso, a simulação rodou de  $t = 0,01$  s até  $t = 1$  s. Em seguida, deu-se início ao bombeio do colchão viscoso.

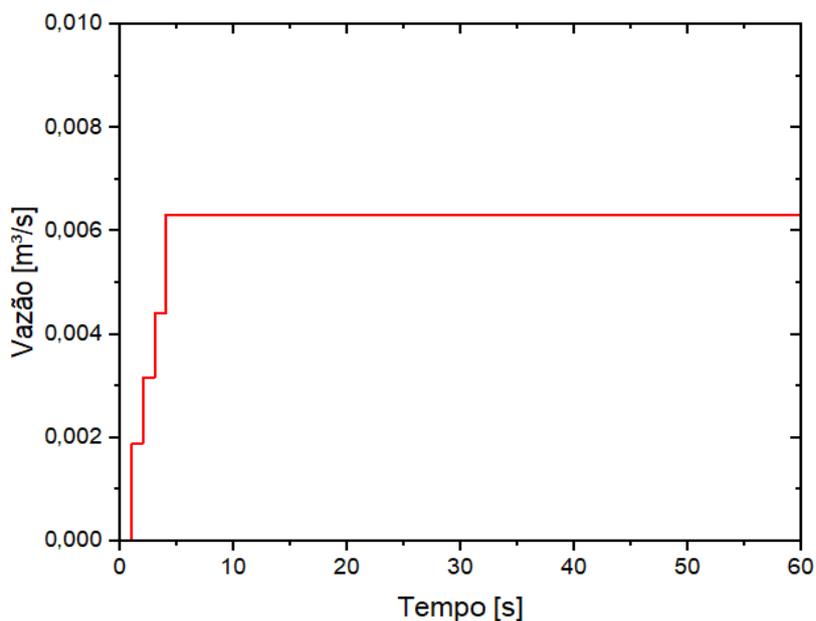
Na etapa de bombeio do colchão viscoso foi necessária a variação gradual de sua vazão, até que se atingisse o valor desejado de 100 gpm, para que não ocorresse a aceleração das partículas de forma súbita. A Tabela 6 mostra o passo de tempo do fluido, as vazões e seus respectivos tempos de aplicação utilizados nas simulações. A Figura 22 apresenta o gráfico de vazão, em  $m^3/s$ , utilizado para todos os fluidos.

**Tabela 6- Vazões utilizadas nas simulações.**

$\Delta t_f$ [s]	Vazão de bombeio de colchão viscoso $Q_f$ [GPM]	$t_i$ [s]	$t_f$ [s]
0,01	30	1	2
	50	2	3
	70	3	4
	100	4	60

**Fonte: elaborado pela autora.**

Figura 22- Gráfico da vazão de colchão viscoso utilizado nas simulações.



Fonte: elaborado pela autora.

O número de Reynolds do fluido foi calculado através da Equação (73) definida para fluidos Power-Law.

$$\text{Re}_f = \frac{\rho_f \bar{U}^{2-n} D_h^n}{m} \quad (73)$$

onde  $\rho_f$  é a densidade do fluido [ $\text{kg/m}^3$ ],  $\bar{U}$  velocidade média do fluido [ $\text{m/s}$ ],  $n$  o índice de potência,  $m$  o fator de consistência [ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ] e  $D_h$  o diâmetro hidráulico calculado através da Equação (74).

$$D_h = 2(r_o - r_i) \quad (74)$$

com  $r_o$  sendo o raio externo [ $\text{m}$ ] e  $r_i$  o raio interno [ $\text{m}$ ].

Os valores dos parâmetros utilizados para calcular o valor de Reynolds e os valores obtidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Parâmetros utilizados para o cálculo do valor de Reynolds.

$r_e$ [m]	$r_i$ [m]	$D_h$ [m]	$\bar{U}$ [m/s]	$\rho_f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Pa.s <sup>n</sup> ]	$n$	Re	
					0,2825	0,64	337,43	Fluido 1
0,0635	0,02413	0,07874	0,5821	1012,15	0,85	0,64	112,14	Fluido 2
					0,2825	0,9	200,58	Fluido 3

Fonte: elaborado pela autora.

Após o cálculo do número de Reynolds pode-se caracterizar o escoamento como laminar ou turbulento. E, para o presente trabalho, os valores calculados mostram que o escoamento é laminar ( $Re < 2000$ ). Esse tipo de escoamento é desejado para o processo de limpeza de poços, visto que, a turbulência pode danificar a integridade do poço.

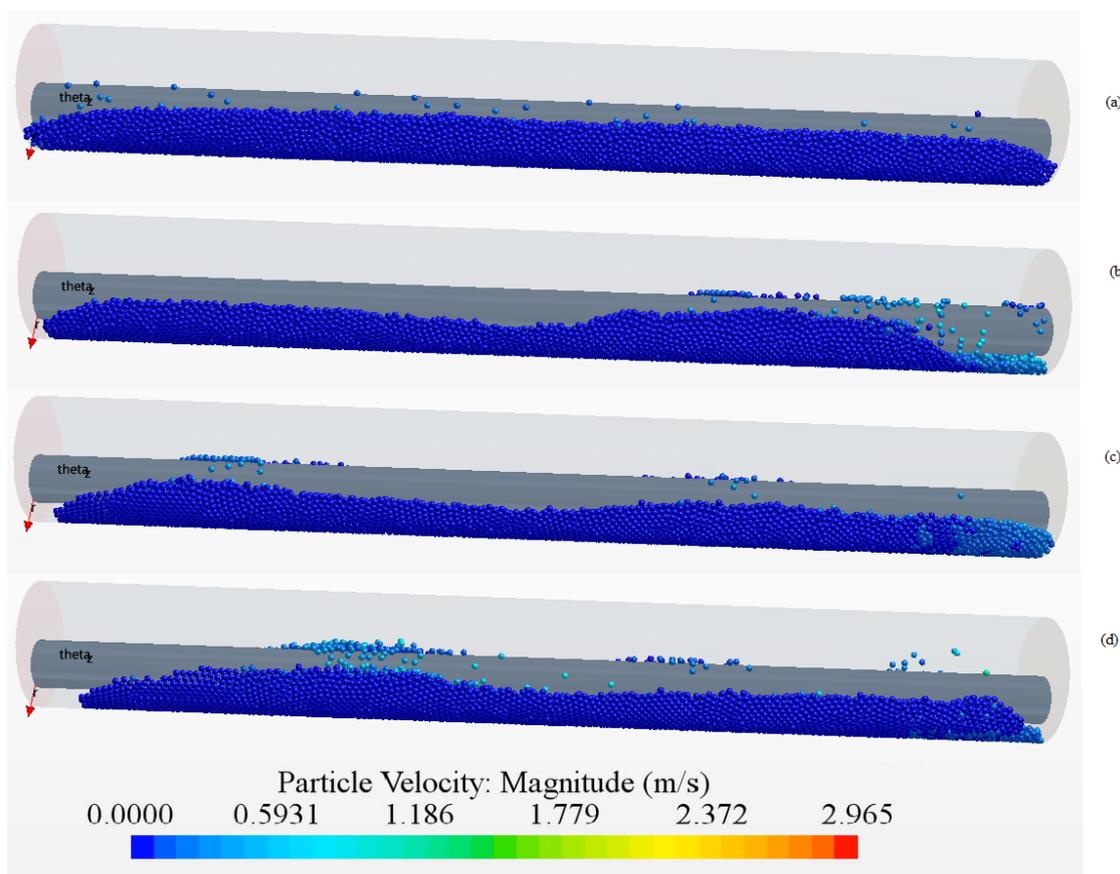
#### 6.1.1 Leito de partículas

Esta seção apresenta os resultados obtidos, para o leito de partículas, por meio da variação da vazão de bombeio. Nesta etapa, foi necessário o aumento gradual da vazão de bombeio do colchão viscoso, até que atingisse a vazão de interesse (100 gpm), para a não ocorrência da aceleração repentina das partículas do leito. Assim, conforme aumenta-se a vazão, diminui-se a concentração de partículas. As Figuras 23, 24 e 25 (a, b, c e d) representam o leito de partículas para cada vazão utilizada no mesmo instante de tempo.

A Figura 23a apresenta a característica do leito de partículas em razão da vazão de entrada do colchão viscoso, 30 gpm, para o fluido de perfuração (Fluido 1). É possível observar que, à medida que a vazão aumenta, ocorre o surgimento de “dunas” em alguns pontos do tubo, ou seja, o colchão viscoso empurra o leito de partículas, conforme passa, e faz com que essas partículas se acumulem. Nesses pontos, a altura do leito de partículas é maior do que no restante do tubo, perceptível na Figura 23b.

Conforme a vazão aumenta, também é notório o deslocamento do leito de partículas em direção a saída do tubo, o que era esperado para o caso, visto que o colchão viscoso deve remover o leito de partículas. Na Figura 23c e d nota-se a existência de partículas em suspensão na seção final do tubo, o que é resultado do “*backflow*”, o qual se estabilizou após 6 segundos de simulação.

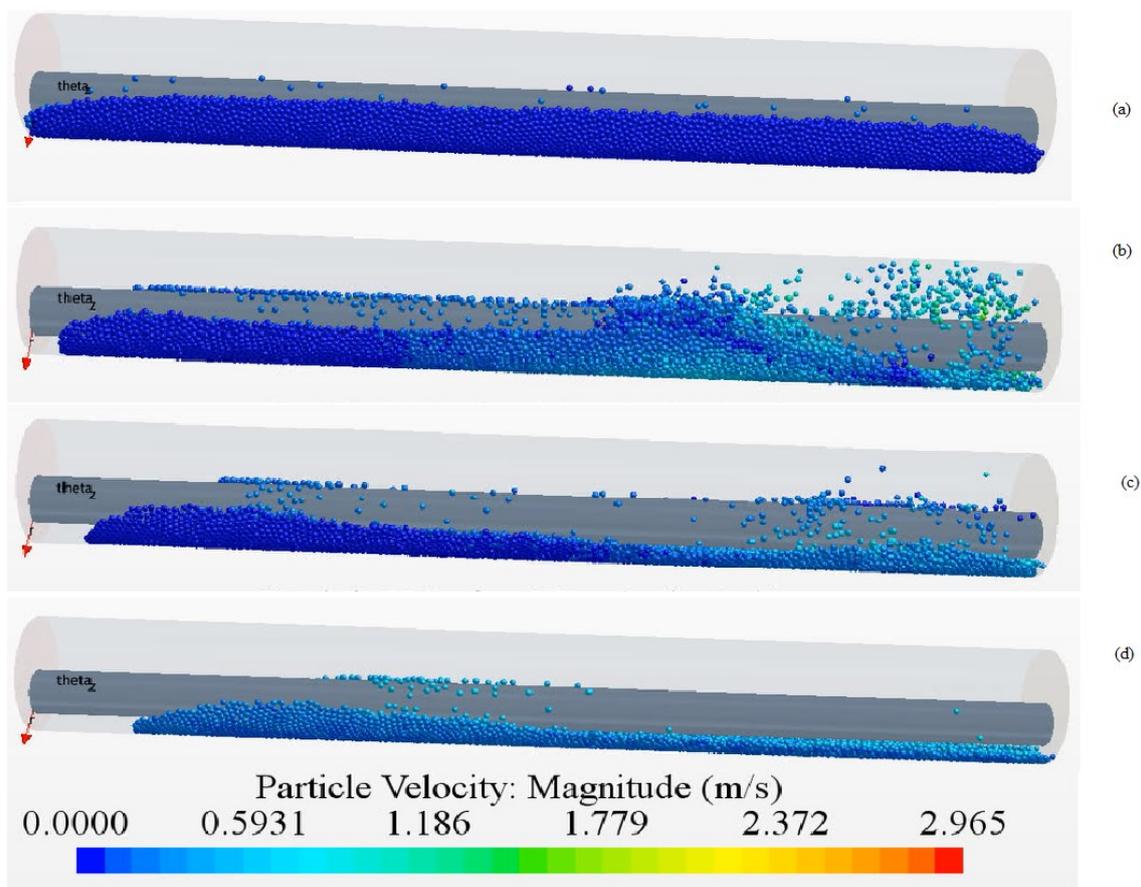
Figura 23- Leito de partículas do Fluido 1 para as vazões de entrada do colchão viscoso. (a) 30 GPM. (b) 50 GPM. (c) 70 GPM. (d) 100 GPM.



Fonte: elaborado pela autora

A Figura 24a mostra o aspecto do leito de partículas do fluido com maior fator de consistência (Fluido 2) em função da vazão de entrada do colchão viscoso, 30 gpm. Na Figura 24b, conforme ocorre o aumento da vazão, é possível notar o aumento da velocidade das partículas, o aparecimento de “dunas” e a ocorrência do “*backflow*”. Na Figura 24c, é possível verificar a diminuição do “*backflow*” e do avanço do leito de partículas para o *outlet* do tubo. Na Figura 24d o “*backflow*” já não está mais presente, tendo sido estabilizado em, aproximadamente, 4 segundos.

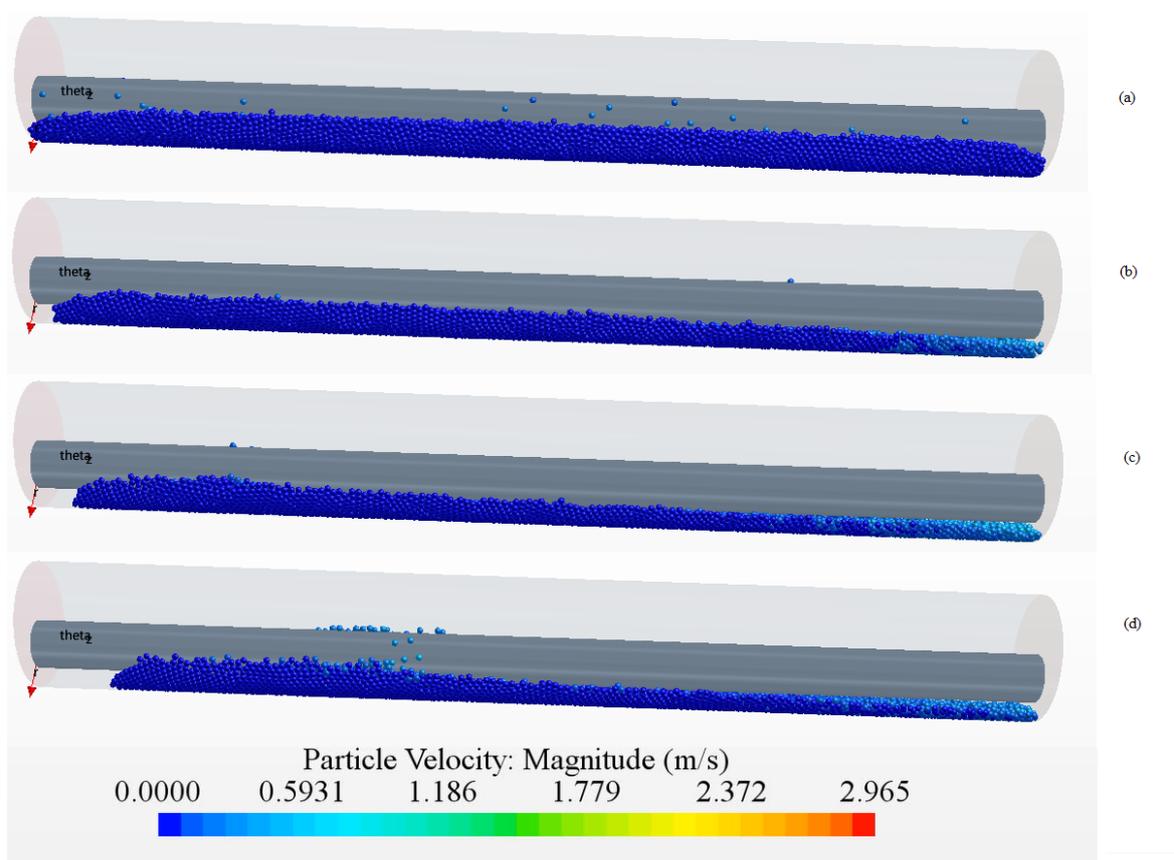
Figura 24- Leito de partículas do Fluido 2 para as vazões de entrada do colchão viscoso. (a) 30 GPM. (b) 50 GPM. (c) 70 GPM. (d) 100 GPM.



Fonte: elaborado pela autora

Na Figura 25a, é apresentado o aspecto do leito de partículas do fluido com maior índice de potência (Fluido 3) em razão da vazão de entrada do colchão viscoso, 30 gpm. Nas Figuras 25b, c e d é possível notar a redução do leito de partículas na seção final do tubo (lado direito) e a formação de “duna” na seção inicial do tubo (lado esquerdo). Também é possível perceber que, conforme a vazão aumenta, o leito de partículas é empurrado para a região final do tubo, *outlet*, e a não existência do “*backflow*”.

**Figura 25- Leito de partículas do Fluido 3 para as vazões de entrada do colchão viscoso. (a) 30 GPM. (b) 50 GPM. (c) 70 GPM. (d) 100 GPM.**



**Fonte: elaborado pela autora**

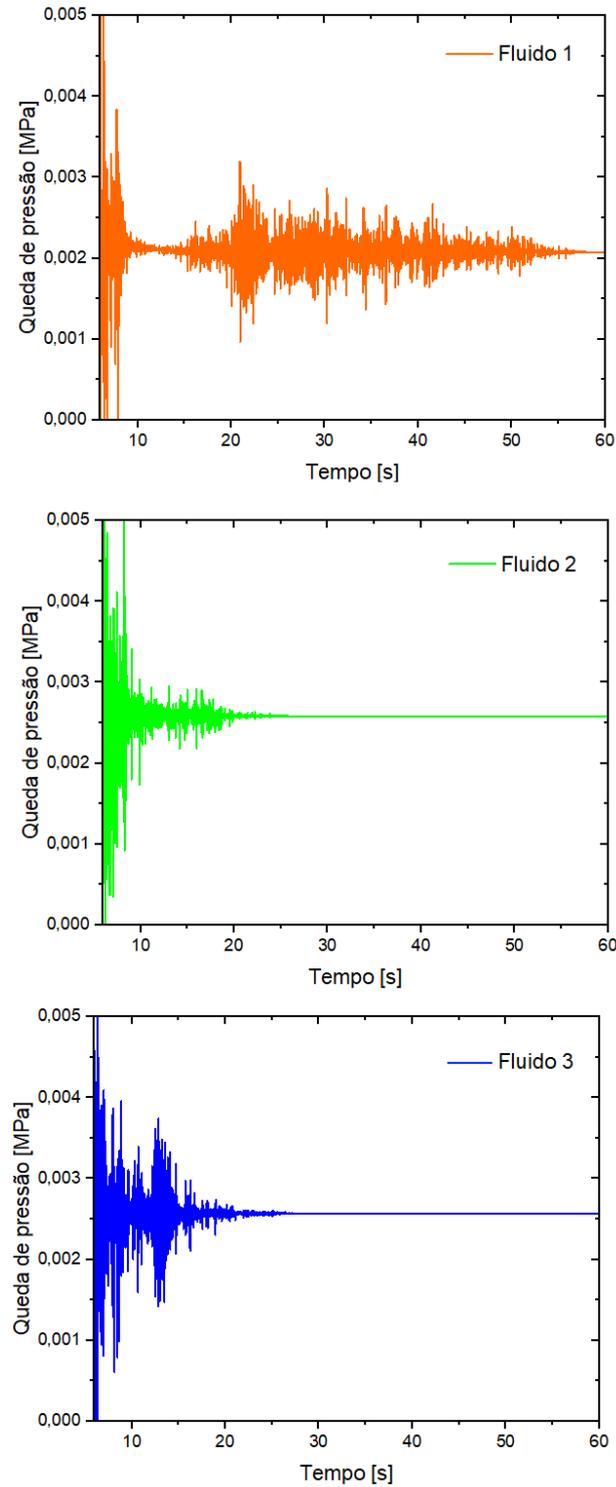
### 6.1.2 Queda de pressão

Antes de apresentar os resultados obtidos para a queda de pressão faz-se necessário abordar aspecto ocorrido durante as simulações e mencionado na seção anterior. Como a ocorrência de “*backflow*” não é aspecto desejado durante o processo de limpeza de poços de petróleo, todos os resultados a partir desta seção considerarão apenas o processo a partir de sua estabilidade. Ou seja, a partir do momento em que não há mais “*backflow*” nos fluidos. Sendo assim, é importante destacar que os resultados não estão comprometidos, as curvas apenas não apresentam os valores desde o instante inicial da simulação ( $t = 0$  s).

A Figura 26 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão em função do tempo de simulação para o fluido de perfuração (Fluido 1), fluido com maior fator de consistência (Fluido 2) e fluido com maior índice de potência (Fluido 3), respectivamente. É possível notar que a queda de pressão varia ao longo do tempo, cujo comportamento é

influenciado pela característica estocástica do método, uma vez que, para cada instante de tempo, a posição espacial das partículas é modificada entre os planos onde a pressão está sendo medida, bem como a quantidade de partículas pode ser diferente. Observa-se a estabilização da queda de pressão após a limpeza total do tubo - quando não há mais partículas no tubo, a queda de pressão não sofre alteração.

Figura 26- Queda de pressão em função do tempo para os Fluidos 1, 2 e 3. Analisadas a partir de  $t = 6$  s.



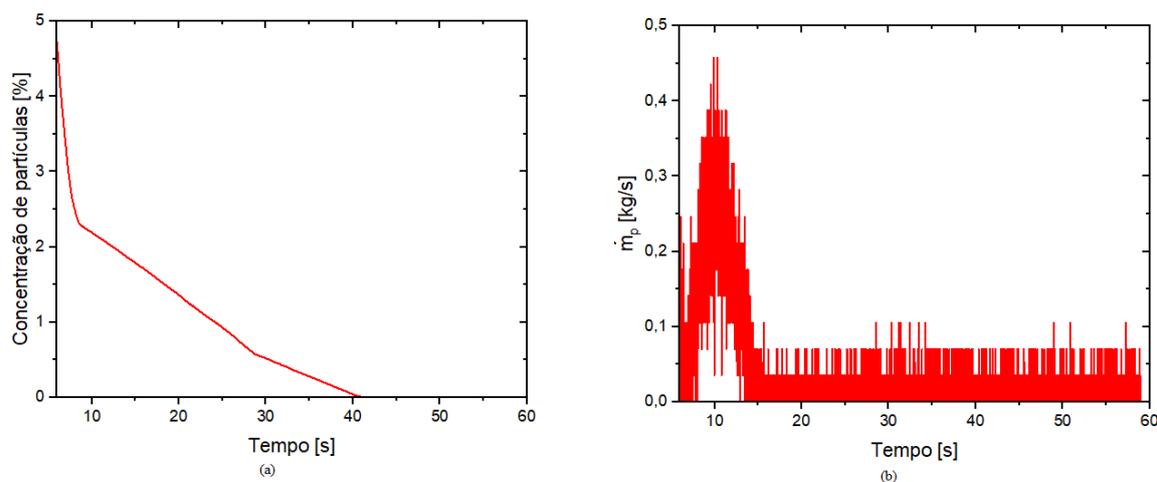
Fonte: elaborado pela autora

### 6.1.3 Concentração de partículas

Nesta seção será apresentada a influência da vazão de bombeio do colchão viscoso no parâmetro mais relevante para a caracterização da eficiência da limpeza de poços de petróleo, ou seja, a concentração de partículas dentro do tubo.

A Figura 27a e b apresentam a concentração de partículas ao longo do tempo e a vazão mássica de partículas em função do tempo para o Fluido 1, fluido de perfuração. Na Figura 27a, é possível notar que, o Fluido 1, tem queda acentuada na concentração de partículas até 10 segundos. A partir desse tempo, a queda na concentração de partículas torna-se constante, como pode ser visto na Figura 27b. Porém, na Figura 27a, os valores de concentração de partículas tornam-se muito baixos, por isso aparenta que foram zerados em 40 segundos, quando, na verdade levou quase 60 segundos para isso, Figura 27b. Ou seja, o fluido de perfuração (Fluido 1) leva, aproximadamente, 60 segundos para carrear todas as partículas que estão no interior do tubo.

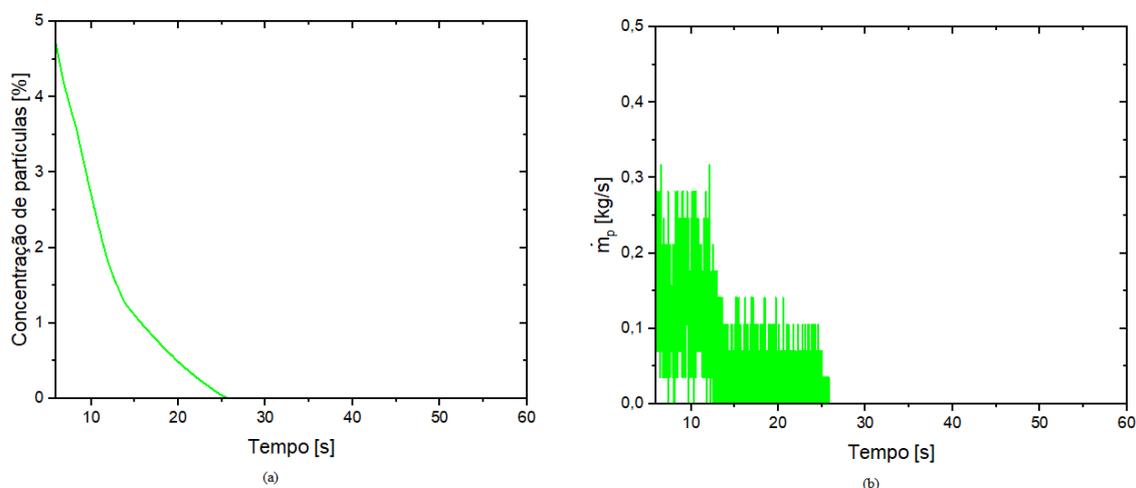
**Figura 27-** (a) Concentração de partículas em função do tempo para o Fluido 1. (b) Vazão mássica de partículas em função do tempo para o Fluido 1. Analisadas a partir de  $t = 6$  s.



**Fonte: elaborado pela autora**

Na Figura 28a e b são apresentados os resultados obtidos para o Fluido 2, fluido com maior fator de consistência, para a concentração de partículas e vazão mássica de partículas ambos em função do tempo, respectivamente. Constata-se que o fluido com maior fator de consistência apresenta queda de concentração de partículas não tão acentuada nos primeiros segundos quanto o fluido de perfuração (Fluido 1). Porém, o Fluido 2 leva menos tempo para carrear todas as partículas, aproximadamente 25 segundos, enquanto o fluido de perfuração leva pouco mais do que o dobro de tempo.

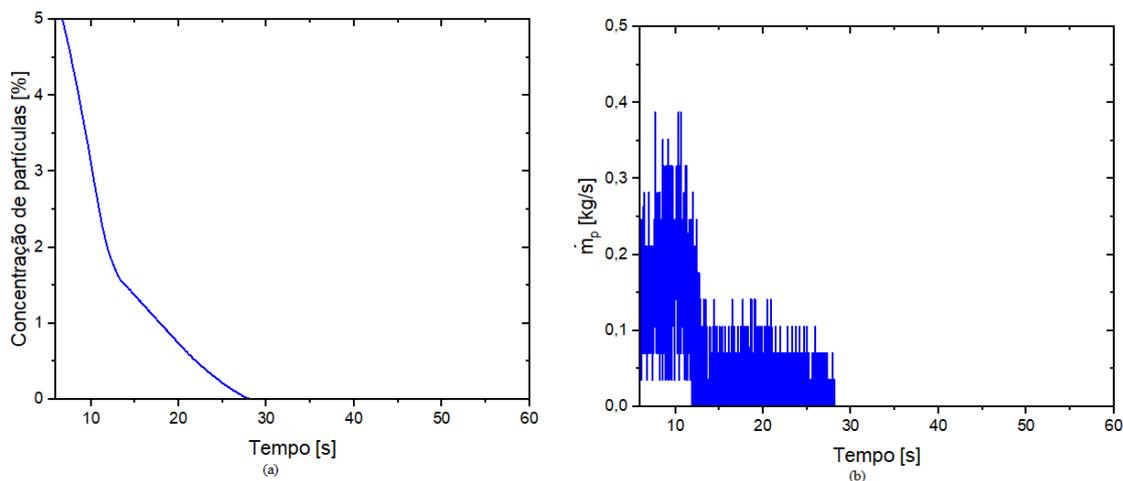
**Figura 28-** (a) Concentração de partículas em função do tempo para o Fluido 2. (b) Vazão mássica de partículas em função do tempo para o Fluido 2. Analisadas a partir de  $t = 6$  s.



**Fonte:** elaborado pela autora

A Figura 29 apresenta os resultados obtidos para o fluido com maior índice de potência (Fluido 3), onde na Figura 29a tem-se a concentração de partículas em função do tempo e, na Figura 29b, a vazão mássica de partículas em função do tempo. O Fluido 3 apresenta concentração de partículas ligeiramente maior do que o fluido de perfuração e do que fluido com maior fator de consistência, Fluidos 1 e 2, respectivamente. Nota-se que o Fluido 3 apresenta a curva de concentração de partículas muito parecida com a do Fluido 2, porém, o Fluido 3 apresenta queda na concentração de partículas ligeiramente menor do que o Fluido 2, em função do tempo. Na Figura 29b percebe-se que a vazão mássica de partículas leva mais de tempo para ser reduzida a zero, quando comparada ao comportamento do Fluido 2.

**Figura 29 - (a) Concentração de partículas em função do tempo para o Fluido 3. (b) Vazão mássica de partículas em função do tempo para o Fluido 3. Analisadas a partir de  $t = 6$  s.**



Fonte: elaborado pela autora

### 6.3 Análise da eficiência do colchão viscoso

Nesta seção será apresentada a análise da eficiência dos colchões viscosos testados. A eficiência é definida como a capacidade que o colchão viscoso tem de carrear as partículas sólidas para fora do poço de petróleo. E, seus valores são definidos de 0 a 1, onde 1 representa a eficiência máxima do colchão viscoso no processo de limpeza de poços.

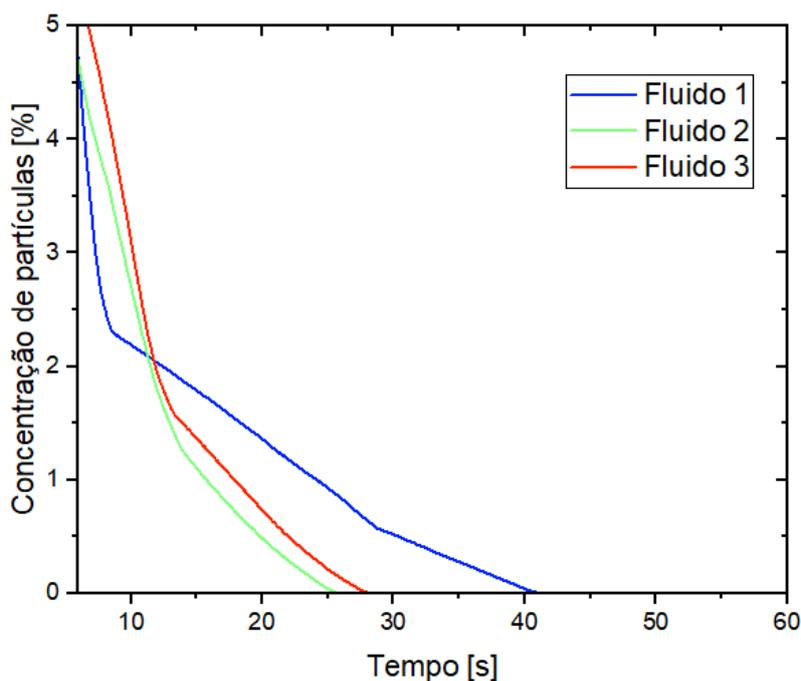
Para a realização da análise será utilizada a Equação (1), apresentada na seção 2.3, a Tabela 8 e a Figura 30. A Tabela 8 mostra o cálculo da eficiência ( $\epsilon$ ) para cada fluido, com suas concentrações de partículas, retiradas do gráfico de concentração de partículas, e tempo de medição das concentrações para o cálculo da eficiência. A Figura 30 apresenta o comparativo de concentração de partículas em função do tempo, para os três fluidos utilizados. Também é possível utilizar, para quantificar a capacidade de limpeza dos colchões viscosos, o “tempo de remoção” (TR), ou seja, o tempo que os fluidos levaram para a remoção total das partículas dentro do poço.

Tabela 8 - Cálculo da eficiência dos fluidos utilizados na simulação.

	$M_0$	$M_f$	$t_i$ (s)	$t_r$ (s)	Eficiência ( $\epsilon$ )	TR (s)	Tempo de CPU (h)
Fluido 1	4,726	1,359	6	20	0,78	58,89	26,74
Fluido 2	4,702	0,487	6	20	0,91	25,79	11,36
Fluido 3	5,393	0,733	6	20	0,88	28,13	13,95

Fonte: elaborado pela autora

Figura 30- Comparativo das concentrações de partículas para cada fluido utilizado, analisados a partir de  $t = 6$  s.



Fonte: elaborado pela autora

Ao realizarmos a comparação entre a Figura 30 com a Tabela 8, é possível concluir que o Fluido 2, maior viscosidade, foi o que apresentou a maior eficiência para a limpeza de poços de petróleo. Além disso, também foi percebido que o Fluido 2 possui o menor tempo de remoção (TR), ou seja, leva menos tempo para realizar a limpeza total do tubo, quando comparado com os outros fluidos. O Fluido 3 também apresentou eficiência alta,



maior fator de consistência (Fluido2) para uma melhor realização do processo de remoção de partículas de cascalhos dos poços.

Para que seja possível ratificar o que foi apresentado na revisão bibliográfica a respeito da eficiência dos colchões viscosos no processo de carregamento de cascalhos em poços horizontais, torna-se necessária a realização de mais simulações variando os parâmetros responsáveis pelo aumento/diminuição da viscosidade e variando, também, a densidade do fluido. A Tabela 9 apresenta a proposta de uma grade de testes para trabalhos futuros.

**Tabela 9- Proposta de grade de simulações.**

	m [Pa.s <sup>n</sup> ]	n	$\rho_f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Re
Fluido 5	0,95	0,64	1012,15	100
Fluido 6	0,2825	0,7	1012,15	299
Fluido 7	0,6	0,64	1012,15	159
Fluido 8	0,2825	0,5	1012,15	446
Fluido 9	0,4	0,64	1012,15	238
Fluido 10	0,2825	0,1	1012,15	994
Fluido 11	0,1	0,64	1012,15	953
Fluido 12	0,2825	0,64	500	167
Fluido 13	0,2825	0,64	1500	500
Fluido 14	0,2825	0,64	2000	667
Fluido 15	0,7	0,3	1100	292

**Fonte: elaborado pela autora.**

#### **6.4 Síntese do capítulo**

Neste capítulo foram apresentados os parâmetros das simulações numéricas realizadas e seus resultados para os três fluidos propostos. Assim, foi possível analisar e avaliar a eficiência dos colchões viscosos no processo de carregamento de partículas de cascalho e, definir qual a melhor configuração para efetuar adequadamente esse processo.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 Conclusões

No presente trabalho foi apresentado o estudo numérico a respeito da limpeza de regiões anulares horizontais, com o intuito de compreender a importância da relação dos parâmetros de entrada na eficiência do processo de limpeza de poços de petróleo.

A fim de que o objetivo citado acima fosse alcançado, foi utilizado durante as simulações a abordagem Euler-Lagrange para as fases líquida e sólida, nesta ordem. Portanto, a fase sólida foi monitorada individualmente, de modo que cada partícula existente no domínio computacional foi analisada separadamente. O *software* usado nas simulações foi a versão 15.02.009 do *STAR-CCM+*<sup>®</sup>.

Para que fosse possível avaliar a capacidade do *STAR-CCM+*<sup>®</sup> em representar corretamente os resultados experimentais, foram conduzidos casos de validação com a finalidade de reproduzir os resultados experimentais existentes na literatura. A concordância entre os resultados atingidos com os valores provenientes dos estudos experimentais mostrou-se satisfatória.

Fluidos formulados com características diferentes do fluido de perfuração (fator de consistência e índice de potência) mostraram-se eficazes para a realização do processo de remoção de partículas de cascalhos dos poços, apresentando menores tempos de remoção (TR) para a realização da tarefa quando comparados com o fluido de perfuração.

### 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

A principal sugestão é a modelagem do colchão viscoso com propriedades de tensão limite de escoamento e maiores densidades. Dentro das categorias de fluidos não newtonianos, seria interessante efetuar estudo aprofundado do motivo do aumento de densidade do fluido que causou a elevação na velocidade das partículas e, conseqüentemente, a expulsão destas do domínio.

Outro ponto importante para a obtenção de resultados mais fiéis é a realização de estudos sobre as malhas e outros parâmetros numéricos que sejam capazes de impedir ou suavizar a existência do “*backflow*” na saída do tubo, característica não encontrada em situações físicas reais. Aumentar o comprimento do espaço anular é outra possibilidade, contudo, é opção custosa do ponto de vista computacional.

Da perspectiva do Método dos Elementos Discretos, seria significativo estudar a influência do modelo de colisão empregue para retratar o choque entre as partículas presentes no sistema. Os parâmetros fundamentais para a alimentação dos modelos de colisão também podem receber a devida atenção.

E, por fim, pode ser realizado estudo com partículas de diferentes diâmetros ou de configuração não-esférica sendo inseridas na mesma simulação. Estes aspectos atribuiriam ainda mais realismo aos resultados adquiridos com as simulações numéricas.

## REFERÊNCIAS

- ABULNAGA, B. E. **Slurry systems handbook**. [s.l.] McGraw-Hill, Inc., 2002.
- AKHSHIK, S.; BEHZAD, M.; RAJABI, M. CFD–DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 127, p. 229–244, mar. 2015.
- ALFSEN, T. E.; BLIKRA, H.; TJOTTA, H. (STATOIL A. Pushing the Limits for Extended Reach Drilling: New World Record From Plattform Statfjord C, Well C2. **spe Drilling & Completion**, n. June, p. 71-76, 1995.
- ALJUBRAN, M. J; AL-YAMI, A. S.; MADAN, M. A. Best Practices to Prevent Stuck Pipe Incidents in Offshore Shaly Formations, paper SPE, presented at the 2017 SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Kingdom of Bahrain, 6-9 March.
- AL-YAMI, A. S.; SCHUBERT, J. Drilling Fluids Consultation System: Development and Field Applications, paper SPE, presented at the 2012 Western Regional Meeting, Bakersfield, California, 19-23 March.
- AZAR, J. J.; SANCHEZ, R. A. **Important Issues in Cuttings Transport for Drilling Directional Wells**. Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. **Anais...Society of Petroleum Engineers**, 4 abr. 1997
- BASSAL, A. A. **A study of the Effect of Drill Pipe Rotation on Cuttings Transport in Inclined Wellbores**. Tese de Mestrado, U. of Tulsa, Tulsa, OK, 1995.
- BERIS, A. N. *et al.* Creeping motion of a sphere through a Bingham plastic. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 158, p. 219–244, 20 set. 1985.
- BILGESU, H. I. *et al.* Computational Fluid Dynamics (CFD) as a Tool to Study Cutting Transport in Wellbores. **SPE Eastern Regional Meeting**, 2002.
- BILGESU, H. I.; MISHRA, N.; AMERI, S. Understanding the Effect of Drilling Parameters on Hole Cleaning in Horizontal and Deviated Wellbores Using Computational Fluid Dynamics. **Eastern Regional Meeting**, p. 2–8, 2007.
- CASARIN, J. J. **Investigação numérica do escoamento de fluido viscoplástico em tubo rotativo anular na presença de partículas sólidas**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- CD-ADAPCO. **STAR-CCM+® Documentation** Siemens PLM Software, 2017.
- CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian flow and applied rheology**. Second edi ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2008.
- COSTA, S. S. **Modelagem para o escoamento transiente horizontal e quase horizontal na perfuração de poços de petróleo**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.
- CROWE, C. T. **Multiphase flow handbook**. Boca Raton, FL: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2006.
- CROWE, C. T. *et al.* **Multiphase flow with droplets and particles**. Second edi ed. Boca Raton, FL: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2012.

CZUPRAT, O. *et al.* Hole Cleaning Efficiency of Sweeping Pills in Horizontal Wells - Facts or Philosophy?, paper SPE, presented at the 2020 SPE Annual Technical Conference & Exhibition, virtual event.

DARBY, R.; CHHABRA, R. P. **Chemical Engineering Fluid Mechanics**. Third edit ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2017.

DI RENZO, A.; DI MAIO, F. P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 3, p. 525–541, fev. 2004.

DORON, P.; BARNEA, D. Flow pattern maps for solid-liquid flow in pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 22, n. 2, p. 273–283, abr. 1996.

EPELLE, E. I.; GEROGIORGIS, D. I. A Multiparametric CFD Analysis of Multiphase Annular Flows for Oil and Gas Drilling Applications. **Computers and Chemical Engineering**, p. 29, 2017.

ESCUDIER, M. *et al.* Fully developed laminar flow of non-Newtonian liquids through annuli: comparison of numerical calculations with experiments. **Experiments in Fluids**, v. 33, n. 1, p. 101–111, 2002.

FULLENBAUM, R. . *et al.* Trends in US Oil and Natural Gas Upstream Costs. n. March, p. 136, 2016.

HEMPHILL, T. A Comparison of High-Viscosity and High-Density Sweeps as Hole Cleaning Tools: Separating Fact From Fiction, paper SPE, presented at the 2010 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, 19-22 September.

HEMPHILL, T.; ROJAS, J. C. Drilling Fluid Sweeps: Their Evaluation, Timing, and Applications, paper SPE, presented at the 2002 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 29 September - 2 October.

HEMPHILL, T.; RIVI, K. Pipe Rotation and Hole Cleaning in na Eccentric Annulus, paper IADC/SPE, presented at the 2006 IADC/SPE Drilling Conference in Miami, Florida, USA, February 21-23.

ISHII, M.; HIBIKI, T. **Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow**. Second Edi ed. [s.l.] Springer, 2011.

JEFFERSON, D.; ZAMORRA, M. Hole Cleaning and Suspension in Horizontal Wells. **In: 3<sup>rd</sup> Annual North American Conference on Emerging Technologies - Coiled and Horizontal Wells**. Calgary, 1995.

JOHNSON, K. L. **Contact Mechanics**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.

KELESSIDIS, V. C. *et al.* Optimal determination of rheological parameters for Herschel-Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 53, p. 203–224, 2006.

KELESSIDIS, V. C.; BANDELIS, G. E. Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling. **SPE Drilling & Completion**, v. 19, n. 04, p. 213–227, 1 dez. 2004.

KELESSIDIS, V. C.; MPANDELIS, G. E. Flow Patterns and Suspension Velocity for

- Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled - Tubing Drilling. In: **SPE/ ICoTA Coiled Tubing Conference**. Houston, Texas, 2003.
- KUNDU, P. K.; COHEN, I. M.; DOWLING, D. R. **Fluid Mechanics**. Fifth ed. [s.l.] Elsevier, 2012.
- LI, J.; WALKER, B. J. Sensitivity Analysis of Hole Cleaning Parameters in Directional Wells. In: **SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable**. Huston, Texas, 1999. SPE 54498.
- MILNE, L. M.; THOMSON, C. B. E. **Theoretical Hydrodynamics**. Fourth edi ed. London: Macmillan & Co. Ltd., 1962.
- MORDANT, N.; PINTON, J. F. Velocity measurement of a settling sphere. **The European Physical Journal B**, v. 18, p. 343–352, 2000.
- NAZARI, T.; HARELAND, G.; AZAR, J. J. **Review of Cuttings Transport in Directional Well Drilling: Systematic Approach**. SPE Western Regional Meeting. **Anais...**Society of Petroleum Engineers, 4 abr. 2010
- OKRAJNI, S. S.; AZAR, J. J. The Effects of Mud Rheology on Annular Hole Cleaning in Directional Wells. **SPE** (Aug, 1986) 297; Trans. AIME, 285.
- PAPANASTASIOU, T. C.; GEORGIU, G. C.; ALEXANDROU, A. N. **Viscous Fluid Flow**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999.
- PARZONKA, W.; KENCHINGTON, J. M.; CHARLES, M. E. Hydrotransport of solids in horizontal pipes: Effects of solids concentration and particle size on the deposit velocity. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 59, n. 3, p. 291–296, jun. 1981.
- PEKER, Ş. M.; HELVACI, Ş. Ş. **Solid–Liquid Two Phase Flow**. First Edit ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2008.
- PILEHVARI, A. A.; AZAR, J. J.; SHIRAZI, S. A. State-of-the-Art Cuttings Transport in Horizontal Wellbores. **SPE Drilling & Completion**, v. 14, n. 03, p. 196–200, 1999.
- PIVOVARSKI, R. G.; **Estudo numérico do escoamento bifásico líquido-sólido em poços de petróleo horizontais**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- PRASHANT; DERKSEN, J. Direct simulations of spherical particle motion in Bingham liquids. **Computers and Chemical Engineering**, 2011.
- POWER, D. J. *et al.* Drilling Practices and Sweep Selection for Efficient Hole Cleaning in Deviated Wellbores, paper IADC/SPE, presented at the 2000 IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, Kuala Lumpur, Malaysia, 11-13 September.
- RAYLEIGH, LORD. On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid. **Proceedings of the London Mathematical Society**, v. s1-17, n. 1, p. 4–11, 1 nov. 1885.
- ROCHA, P. B., **Estudo da influência da coluna de perfuração na hidráulica de poços de longo alcance**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- SCHILLER, L.; NAUMANN, A. Ueber die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung. **VDI Zeits**, v. 77, n. 12, p. 318–320, 1933.
- SHOOK, C. A.; ROCO, M. C. **Slurry Flow Principles and Practice**. Stoneham, MA: Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering, 1991.
- SIFFERMAN, T. R.; BECKER, T. E. Hole Cleaning in Full-Scale Inclined Wellbores.

**SPE Drilling Engineering**, v. 7, n. 02, p. 115–120, 1 jun. 1992.

SOMMERFELD, M. **Theoretical and Experimental Modelling of Particulate Flows**. [s.l: s.n.].

TIMOSHENKO, S. **Theory of Elasticity**. [s.l.] McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951.

TURIAN, R. M.; HSU, F.-L.; MA, T.-W. Estimation of the critical velocity in pipeline flow of slurries. **Powder Technology**, v. 51, n. 1, p. 35–47, jun. 1987.

TURIAN, R. M.; YUAN, T.-F. Flow of slurries in pipelines. **AIChE Journal**, v. 23, n. 3, p. 232–243, maio 1977.

VALENTIK, L.; WHITMORE, R. L. The terminal velocity of spheres in Bingham plastics. **British Journal of Applied Physics**, v. 16, n. 8, p. 1197–1203, ago. 1965.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method**. Second Edition. Harlow, Essex: Pearson Prentice Hall, 2007.

VLASAK, P.; CHARA, Z. Conveying of Solid Particles in Newtonian and Non-Newtonian Carriers. **Particulate Science and Technology**, v. 27, n. 5, p. 428–443, 3 set. 2009.

WADNERKAR, D. *et al.* Hydrodynamics of macroscopic particles in slurry suspensions. 2016.